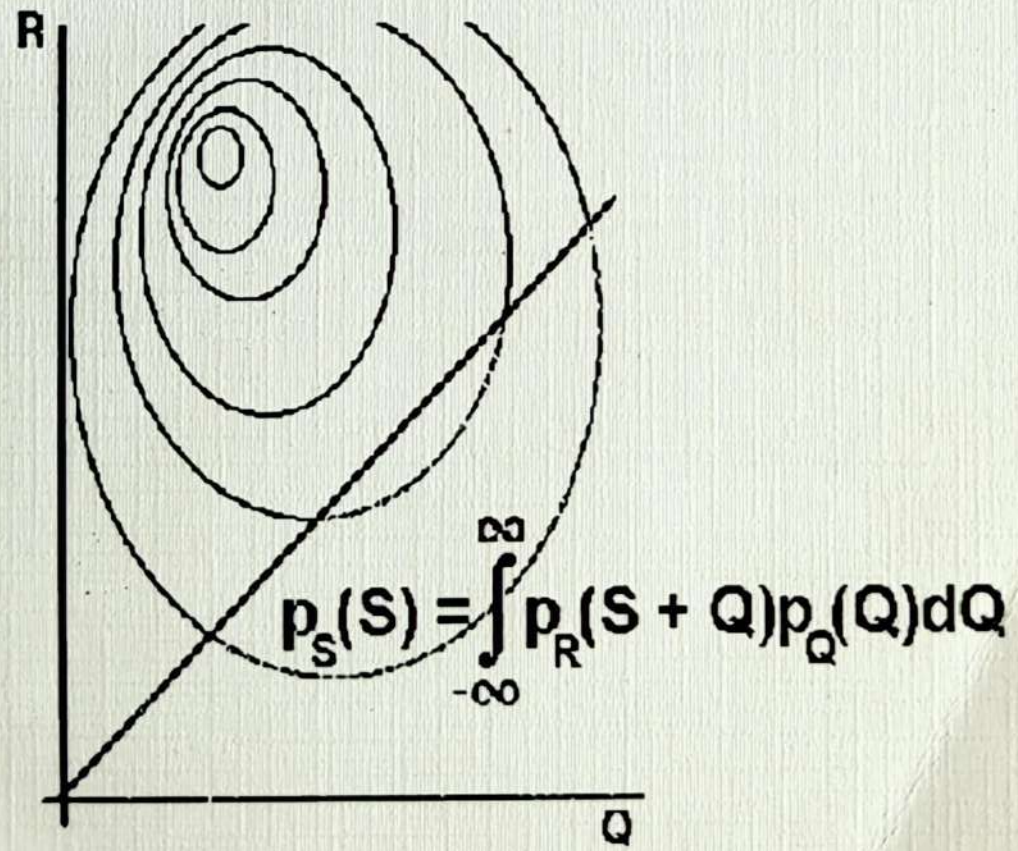
624.04
П27

А.В.Перельмутер

ИЗБРАННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ



Киев
Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция
2000

ДАТ УКРНДІПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦІЯ
ім. В. М. Шимановського
ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
ОБЛІКОВАНИЙ ЕКЗ. № 23064(б)
ЗАПИС В-1 ДАТА 12.01.2007

ББК 38.5-028
П-27

УДК 624.046.5

Перельмутер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. — 2-е изд., перераб. и доп.— Киев: Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. — 216 с.

Рассмотрены некоторые принципиальные вопросы надежности и безопасности строительных конструкций и сооружений. Обращается внимание на те стороны проблемы, которые не укладываются в традиционную оценку проектной надежности, которая обычно используется в работах по надежности строительных конструкций.

Перельмутер А. В. Вибрані проблеми надійності і безпеки будівельних конструкцій. — 2-е вид., перероб. и доп.— Київ: Вид-во УкрНДІпроектсталь-конструкція, 2000. — 216 с.

Розглянуті деякі принципові питання надійності і безпеки будівельних конструкцій і споруд. Звертається увага на ті сторони проблеми, що не укладаються у традиційну оцінку проектної надійності, яка звичайно використовується в роботах з надійності будівельних конструкцій.

Perelmuter A. V. Selected Problems of Reliability and Structural Safety.— 2nd ed.— Kiev: Ukrainian Institute of Steel Constructions, 2000. — 216 p.

Some principal problems of safety and dependability of structures and buildings are considered. The main attention is paid to some problems that are out of traditional approach to design safety which is used usually in the investigation of civil structures.

Рецензент:

Кафедра стальных конструкций Полтавского технического университета им. Кондратюка (зав. кафедрой, докт. техн. наук, проф. Пичугин С.Ф.)

ISBN 966-7589-10-2

© А. В. Перельмутер, 2000

А.В.Перельмутер

ИЗБРАННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Киев
Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция
2000

Предисловие ко второму изданию

Первое издание этой книги было тепло встречено читателями и некоторые из известных автору отзывов свидетельствовали о существовании достаточно широкой аудитории, к которой может быть обращена публикация такого рода.

Проблема адресата книги и ее стиля является одной из наиболее сложных для автора любой публикации. В специальной монографии автор адресуется прежде всего к своим коллегам по профессии и предполагает достаточную подготовленность читателя. В книге междисциплинарного или обобщающего характера основной становится некоторая посредническая функция, знакомя специалистов одной узкой подотрасли знания с тем, как выглядят интересующие его проблемы в рамках других разделов этой же или другой науки и какой общенаучный смысл может быть извлечен из сопоставления различных подходов к проблеме. Поскольку подходы, терминология и традиции сопоставляемых разделов науки часто бывают различными, то изложение материала приобретает характер популяризации, естественно со всеми предосторожностями против перехода к вульгаризаций. К тому же автор имеет определенную надежду на то, что среди читателей окажутся просто любознательные неофиты, поэтому хотелось бы быть понятным не только для знатоков[1] проблемы.

Едва опубликовав книгу, я почувствовал потребность переработать ее. Хотелось привлечь дополнительный фактический материал, уточнить некоторые положения и формулировки. Кроме того, ряд откликов и замечаний моих коллег показал, что некоторые вопросы можно было бы изложить лучше, а некоторые положения нуждаются в более детальной аргументации. Автор постарался в болшей мере подчеркнуть те различия, которые имеются в проблеме обеспечения безопасности по сравнению с обеспечением надежности (к сожалению, во многих работах эти понятия смешиваются).

Несколько расширенная по сравнению с первым изданием, эта книга остается в разряде изданий несправочного характера, она не ориентирована на читателя, которому необходим фактографический материал или точные руководства к действию. И. Гёте недаром писал, что "точно знают, только когда мало знают. Вместе со знанием растет сомнение". Наши знания распределены крайне неравномерно. В литературе по строительным конструкциям наблюдается заметный перекос в сторону чисто рецептурных подходов в ущерб аналитическим. В подавляющем числе специальных публикаций детально описываются принятые конструктивные решения и приводятся указания по их применению, но необычайно редко приводится аргументация обосновывающая выбор именно такого, а не другого конструктивного решения. Имеются и многочисленные

---

[1] На книжных прилавках сейчас имеется множество книг по компьютерным наукам с грифом "Для чайников". Мне больше нравится польский вариант этого сериала, где использована формула "Не только для орлов".

работы с описанием различных приемов расчета и результатов расчетного анализа тех или иных конструкций, но в них исследуемая конструктивная форма считается некоторой данностью. В результате таких публикаций накапливается разрыв между эмпирическим и теоретическим знанием. При написании этой книги и работе над ее вторым изданием автор стремился приложить основные усилия к тому, чтобы хоть в какой-то мере уменьшить этот разрыв.

Июнь, 2000
Киев

Введение

Метод предельных состояний впервые был широко внедрен у нас в практику проектирования несущих конструкций в середине 50-х годов с принятием первой редакции Строительных норм и правил [118]. В дальнейшем он был несколько модифицирован, но без принципиальных изменений, и в настоящее время он составляет основу стандарта [27], который регламентирует применение метода предельных состояний при расчете строительных конструкций. Несколько позже метод предельных состояний был принят в других странах. Его широкое международное признание можно связать с появлением в 70-х годах первой редакции стандарта ИСО [141] и в особенности с серией Еврокодов [133], при этом в упомянутых международных документах метод получил название метода частных коэффициентов надежности.

Несмотря на почти пятидесятилетний период использования метода предельных состояний и его неоднократное описание в специальной и учебной литературе, применение метода в инженерной практике до сих пор в большей степени является формальным. Практикующие инженеры-проектировщики дисциплинированно исполняют предписания действующих нормативных документов, которые основаны на методе предельных состояний, и, казалось бы, никакой проблемы здесь нет. Но в любой мало-мальски нестандартной ситуации, когда прямые рекомендации норм отсутствуют, оказывается, что практики недостаточно знакомы с идеологическими основами метода и плохо представляют себе его достоинства и недостатки (о наличии последних учебная литература вообще не упоминает, а в специальных научных изданиях об этом упоминается только вскользь). Такое положение, не в последнюю очередь, связано с отсутствием специализированного курса в программе вузовской подготовки, где по сложившейся традиции метод предельных состояний с повторами и недомолвками отрывочно излагается в курсах железобетонных, стальных или деревянных конструкций. При этом вообще не затрагиваются проблемы нормирования нагрузок и воздействий, а другие проблемы рассматриваются чаще всего лишь рецептурно, без анализа мотивов, которые влияли на выбор тех или иных рекомендаций нормативных документов.

Имеются многие публикации (см., например , [95], [3] или [147]), в которых можно найти обоснования подходов к назначению тех или иных значений расчетных коэффициентов метода предельных состояний (чаще всего коэффициентов надежности по материалу или по нагрузке), однако почти невозможно найти современные публикации, посвященные идеологии метода и выявлению его принципиальных позиций. Исключение составляют, например,

сборники [87] и [60] или же книги типа [93], рассчитанные на специалистов по составлению норм, а не на проектировщиков-практиков.

Есть еще одно важное соображение, которым автор руководствовался при работе над предлагаемой книгой. Сложилась традиция рассматривать две «надежности» строительных объектов. В одной из них основным предметом внимания является проблема обеспечения проектной надежности путем использования подходящих расчетных процедур (чаще всего — на основе вероятностного подхода к проблеме), другая, получившая даже специальное название «эксплуатационной надежности», — основное внимание уделяет проблеме долговечности, ремонтам и т.п. Такое разделение представляется принципиально порочным, автор хотел бы в силу своих возможностей разрушить традицию раздельного рассмотрения этих взаимосвязанных вопросов общей проблемы надежности.

Многие работы, среди которых следует отметить монографии В.В.Болотина [15], [16], А.Р.Ржаницына [95], В.Д.Райзера [92], [93] и других авторов были посвящены вероятностному обоснованию метода предельных состояний и нормативному обеспечению расчета конструкций. Однако в этих, безусловно, выдающихся работах основное внимание обращалось на вопрос «как сделать» (точнее — «как надо было бы сделать»), а не на проблему «как практически сделано». Кроме того в них основное внимание уделялось технике вероятностного расчета уровня безотказности конструкций, а не проблемам выбора критериев для назначения этого уровня. Последнее оставалось и во многом остается скрытым от внимания специалистов, поскольку в этой части практика нормирования основывалась на использовании традиции и прецедента и почти не обсуждалась в научной и учебной литературе. В последней вообще укоренилась традиция сообщать рецептурные данные начинающиеся фразой «... СНиП требует», и далее излагать такие требования без какого-либо критического анализа. По-видимому, авторы таких учебников боялись смутить разум любознательного студента каким бы то ни было сомнением в справедливости нормативных требований или же следуя Ланцошу [51], были глубоко убеждены, что «...современный студент — это, что угодно, но только не философский ум».

Предлагаемая вниманию читателей работа ориентирована на специалистов, которые хотели бы устранить пробелы в восприятии метода предельных состояний, при этом предполагается, что некоторое знакомство с методом (хотя бы на уровне использования терминологии) у читателя уже имеется. Автор специально останавливается на некоторых недомолвках или противоречиях, которые нашли себе место в нормативных документах, а также рассматривает возможности совершенствования метода предельных состояний, которые возможны внутри этого метода. Это заметно отличается от предложений [93], где практически выдвигается альтернативный подход, основанный на полном вероятностном анализе и не рассчитанный на прямое использование в проектной практике. Позицию автора не следует рассматривать как оппозицию указанному

вероятностному подходу, а скорее как ориентацию на более прагматические цели работы, которая предназначена не для составителя норм, а для специалиста, использующего такие нормы и, быть может, поставленного в условия их расширительного толкования.

В работе [9] указываются пять основных аспектов проблемы надежности зданий и сооружений — философский, технический, математический, экономический и организационный. Из них наибольшее внимание мы уделим первым двум, сосредоточив основные усилия на осмыслении критериев отказов отдельных конструкций зданий и сооружений и их оценкам по значимости, классификации зданий и сооружений, классификации отдельных конструктивных элементов по их роли в общей надежности объекта, вопросам о роли защиты и т.п. Вместе с тем нам представляется важным не ограничиваться словесными аргументами даже при обсуждении чисто концептуальных проблем, а апеллировать к опыту проектирования и эксплуатации в форме расчетного анализа. При этом в силу профессиональных интересов и личного опыта чаще всего будут рассматриваться стальные конструкции зданий и сооружений. И еще одно замечание — выбрав название «Избранные ...», автор решил очень сложную для себя проблему архитектуры всей работы, поскольку оно допускает, а быть может, даже предусматривает некоторую фрагментарность. Возможно было бы правильнее использовать название «Этюды о ...», но это уже несущественно. Фрагментарное изложение связано и с некоторыми повторами, которые допускались сознательно для удобства непоследовательного чтения.

В работе над книгой автору помогло общение с рядом крупных специалистов по теории надежности и по строительным конструкциям, в беседах (а зачастую и в острых дискуссиях) с которыми выявлялись противоречия и оттачивалась аргументация. Автор с благодарностью вспоминает сотрудничество с такими профессионалами, как М.М. Арошенко, А.А. Бать, В.Л.Гейфман, А.В. Геммерлинг, В.Н.Гордеев, И.Д. Грудев, А.Я. Дривинг, Е.В. Горохов, М.И. Казакевич, А.И. Конаков, И.И. Крылов, М.А. Микитаренко, В.А. Пашинский, С.Ф. Пичугин, Д.М. Подольский, В.Д. Райзер, А.Р. Ржаницын, М.М. Сахновский, Е.Н. Селезнева, Б.И. Снарскис, Н.Н. Стрелецкий, А.М. Титов. Их роль в формировании той системы взглядов, которая представлена в этой книге, трудно переоценить.

Рукопись книги внимательно читали проф. М.И. Казакевич и проф. С.Ф. Пичугин. Их ценные советы и замечания автор с благодарностью старался учесть в окончательной редакции.

1. Основные понятия и характеристики надежности

Каждая страна и каждый город — да, по сути, и каждый человек — сами решают, какой уровень безопасности он в состоянии обеспечить. И некоторые проектировщики, кажется, порой забывают, что так называемый коэффициент безопасности может прикрыть невежество и ошибки кого угодно, но только не их собственные.

Р. Бирн

Появившийся три-четыре десятка лет назад «анализ надежности» относился в первую очередь к радиоэлектронной аппаратуре, хотя без использования соответствующей терминологии само понятие надежности и многие методы появились намного раньше и применялись к строительным и другим более традиционным объектам техники. Достаточно указать на такую систему резервирования отказов паросиловых установок на первых пароходах, как предусматривающуюся возможность использования парусов, или на те коэффициенты запаса (по отношению к экспериментально устанавливаемой прочности), которые традиционно использовались в строительстве мостов. Наконец, настороженность инженеров и персонала по отношению к отказам и авариям всегда считалась правильной стратегией поведения, а ее отсутствие признаком непрофессиональности или беспечности («Титаник» считался непотопляемым судном, и за этот миф создателей корабля, воспринятый его командой, заплачено очень дорого).

Теория надежности строительных конструкций, зданий и сооружений представляет собой весьма специфическую ветвь общей теории надежности. Ее развитие, с одной стороны, определяется рядом факторов, которые не играют существенной роли в задачах надежности других технических объектов, а с другой, — многие подходы общей теории надежности, получившие широкое применение в таких, например, областях техники, как надежность радиоэлектронной аппаратуры, имеют весьма ограниченное применение в строительной области. Причин здесь несколько, но одна из них — это резко различные масштабы сроков жизни объекта и их тиражности. Эти обстоятельства привели к тому, что даже основные понятия, определяемые для строительной отрасли стандартом [27], а для других отраслей техники — стандартом [26], неполностью эквивалентны. В связи с этим целесообразно рассмотреть суть некоторых основных понятий и выявить особенности их использования применительно к строительным объектам.

1.1 Надежность, безотказность и долговечность

В общетехническом стандарте [26] надежность определяется как сложное свойство системы и ее элементов выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого времени. Надежность оценивается такими характеристиками, как безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость. Для различных объектов и различных условий эксплуатации эти свойства могут иметь различную относительную значимость.

Безотказностью — свойство системы (элемента) сохранять работоспособность в течение некоторого заданного срока без вынужденных перерывов. В качестве количественных характеристик, оценивающих это свойство, чаще всего используются вероятность безотказной работы, вероятность отказа и интенсивность отказов.

Долговечность — свойство системы (элемента) сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Количественными характеристиками долговечности являются средний срок службы или средний срок службы до капитального ремонта. Эти сроки могут измеряться в единицах календарного времени, числом характерных рабочих циклов, объемом произведенной работы (выпущенной продукции) и в других единицах.

Основное различие первого и второго свойств связано с понятием непрерывности работы системы. Для многих строительных объектов, эксплуатация которых практически не может быть приостановлена (например, для несущих конструкций), характеристика безотказности превалирует, перекрывая фактически характеристику долговечности, а для других объектов (например, инженерного оборудования зданий и сооружений) различия этих двух характеристик весьма существенны. Однако и в первом и во втором случаях нужно различать безотказность и долговечность системы в целом или ее составных частей. Нетрудно представить себе конструкцию, непрерывная работоспособность которой реализуется за счет своевременной замены или ремонта некоторых элементов, причем такого рода ремонтные работы выполняются без остановки объекта в целом. Практически таким образом выполняются почти все текущие, а также многие капитальные ремонты зданий и сооружений. В других отраслях техники такое зачастую невозможно. Достаточно представить себе ремонт автомобиля, чтобы убедиться в этом.

В связи этим становится ясным, почему понятие долговечности строительных конструкций скорее рассматривают как проблему замедления скорости деградации служебных свойств конструкции (процессов коррозии, гниения, накопления повреждений и т.п.), чем как задачу оценки продолжительности ремонтных остановок или установления дисциплины обслуживания. Проблема долговечности строительных конструкций, рассматриваемая как задача учета постепенного изменения (ухудшения) свойств конструкции, с точки зрения общей теории надежности, скорее является

проблемой оценки по отношению к так называемым параметрическим (постепенным) отказам .

Ремонтопригодность — свойство конструкции быть приспособленной к предупреждению, обнаружению и устранению отказов и неисправностей путем проведения технического обслуживания и ремонта. К сожалению, в строительстве практически не используются такие количественные показатели ремонтопригодности, как вероятность восстановления, среднее время простоя, среднее время восстановления. Это связано с глубоко укоренившейся традицией пренебрежительного отношения к проблемам эксплуатации и ремонта. Характерным показателем такого отношения можно считать тот факт, что бывший Госстрой СССР снял с себя ответственность за все проблемы эксплуатации и упразднил шестую часть СНиП, первоначально предназначавшуюся для нормативных документов по эксплуатации. Лишь теперь в структуре государственных строительных норм Украины такой раздел предусматривается снова.

Сохраняемость — свойство системы сохранять свои показатели качества во время транспортирования, складирования, хранения и монтажа. Это свойство чаще всего относят не к строительному объекту в целом, а к его отдельным элементам заводского изготовления, хотя имеются такие объекты, как мобильные здания или инвентарные сооружения, для которых сохраняемость является общей характеристикой.

Если тот набор эксплуатационных показателей, которые в надежной системе сохраняются в заданных пределах в течение требуемого времени, определить как соответствующее мерило качества, то надежность представляет собой характеристику качества, развернутую во времени.

1.2 Технические состояния объектов

В стандарте [26] приводится ряд терминов, определяющих основные технические состояния объектов, однако используемые там формулировки ориентированы, в основном, на изделия электроники и машиностроения, поэтому применительно к зданиям, сооружениям и строительным конструкциям они не всегда приемлемы. В работе [72] были предложены, а в нормах [28] приняты в качестве официальных следующие определения возможных технических состояний:

исправное — при выполнении всех требований проекта и нормативных документов, действующих на момент классификации объекта;

работоспособное — при частичном отступлении от требований проекта и действующих норм, но без нарушения требований по предельным состояниям первой группы и при таких нарушениях требований по предельным состояниям второй группы, которые в конкретных условиях объекта не ограничивают возможность нормального функционирования основных производственных процессов или другого применения объекта по основному назначению;

ограниченно работоспособное — в случаях, когда для обеспечения нормального функционирования основных производственных процессов или другого применения объекта по основному назначению необходимо использовать ограничения и специальный контроль за состоянием конструкций, продолжительностью их эксплуатации или параметрами технологического процесса (например, ограничения по использованию грузоподъемности установленных мостовых кранов или требование очистки кровли от снега при определенной интенсивности снегоотложений);

неработоспособное — при обнаружении уже состоявшегося нарушения требований по предельным состояниям первой группы или невозможности предотвратить такое нарушение в течение прогнозируемого срока эксплуатации.

Необходимо обратить внимание на некоторые детали приведенных выше определений.

Во-первых, классификация технического состояния объекта выполняется в процессе его эксплуатации и не является одной из операций по проектированию, поскольку оценивается именно объект, а не его замысел. Поскольку классификация может производиться и для давно существующих объектов, проектирование которых выполнялось по ранее действовавшим и уже отмененным нормативным документам, то важным является упоминание о нормативных документах, действующих на момент классификации объекта, при формулировке исправного состояния. Если требования общества изменились за время, прошедшее после постройки, то объект не может быть признан исправным, однако вполне может считаться работоспособным и продолжать использоваться по первоначальному или измененному назначению. Замечание относительно изменения способа использования также является существенным: трудно представить себе, что даже хорошо сохранившийся средневековый замок будет использован в качестве укрепления или резиденции органов управления (первоначальная функция), но он может использоваться как музей или оригинальная гостиница. Само по себе исправное состояние является определенной идеализацией, используемой как точка отсчета для оценки других состояний. Один опытный профессионал сказал, что исправных объектов попросту не бывает, как и не бывает объектов, которые сдаются в эксплуатацию без недоделок.

Во-вторых, надо четко сознавать, что работоспособный объект может быть неисправным. Простейший пример — это строение, которое не удовлетворяет эстетическим требованиям (даже если таковые декларируются нормативными документами), но способное выполнять свои основные функции. Конечно, пример не является подходящим применительно к объекту, основным предназначением которого является именно украшение окрестности. Подавляющее число эксплуатируемых конструкций находится именно в работоспособном состоянии.

В-третьих, для строительных объектов, выведение которых из эксплуатации или постановка на ремонт занимают обычно длительное время, применение ограничительных мер и, следовательно, классификация объекта как

ограниченно работоспособного является скорее правилом, чем исключением. Что касается ограничений, то они могут быть связаны с самыми разнообразными условиями, начиная от запрета на пребывание людей и заканчивая эксплуатацией в облегченном режиме. Не исключено и использование системы временного раскрепления конструкций.

Наконец, неработоспособное состояние необязательно является предаварийным или аварийным, поскольку оно может быть признано таковым по отношению к предполагаемым изменениям условий применения объекта (например, при необходимости преобразования пешеходного моста в автодорожный). Кроме того здесь могут сказываться условия не только физического, но и морального износа объекта. К сожалению, инженерная практика, равно как и некоторые документы рекомендательного характера, слишком часто оперирует понятием аварийного состояния, относя, например, к нему все те неработоспособные состояния, которые определяются возможными (но еще не реализованными) нарушениями требований первого предельного состояния конструкции. По нашему мнению, здесь уместна более точная терминология, которая указывала бы на опасность ("потенциально аварийное состояние"), но вместе с тем фиксировала бы состояние на момент наблюдения.

1.3 Живучесть

Анализ аварий промышленных и гражданских сооружений показывает, что во многих случаях процесс разрушения конструкции носил лавинообразный характер, если отказ отдельных элементов и подсистем (даже неполный) инициировал возникновение других более серьезных отказов и разрушений. Однако имеются и многочисленные примеры систем, где изолированные отказы отдельных элементов не приводят к аварии, что связано с некоторыми резервными возможностями, присущими структуре системы. Свойство системы сохранять несущую способность при выходе из строя одного или нескольких элементов естественно называть живучестью.

При создании новых систем, для которых сведения о надежности аналогов отсутствуют, а также для систем, функционирование которых может быть связано с реализацией весьма интенсивных редких воздействий аварийного характера, перед инженером-проектировщиком стоит задача, вообще говоря, не имеющая вероятностного описания — как создать систему, которая могла бы функционировать (возможно, с резко ухудшимся качеством) в условиях возможного отказа какой-то ее части. Подобного рода подход был сформулирован в 30-е годы академиком А.Н. Крыловым, когда он изучал непотопляемость корабля, получившего некоторое число пробоин. По сути это было первое осознанное и целенаправленное использование понятия живучести.

Применительно к строительным объектам понятие живучести начало развиваться существенно позже, в первую очередь, применительно к сейсмостойкому строительству, хотя сам термин «живучесть» мог и не применяться. В частности, появилась идея выделения так называемых главных

несущих конструкций, безотказность которых обеспечивает здание или сооружение от полного разрушения при аварийных воздействиях, даже если его дальнейшее использование по назначению окажется при этом невозможным без капитального ремонта. Эти конструкции предлагается проектировать таким образом, чтобы в аварийной ситуации вероятность возникновения разрушений была очень малой. Такое может быть достигнуто за счет:

- исключения (при проектировании или путем использования специальных мер защиты) возможности разрушения любого из ответственных элементов объекта;
- проектирования объекта таким образом, чтобы в случае разрушения любого отдельного элемента весь объект или его наиболее ответственная часть сохраняла работоспособность в течение периода времени, достаточного для принятия срочных мер (например, эвакуации людей при пожаре).

1.4 Безопасность

Проблема безопасности до недавнего времени не фиксировалась в нормативных документах по проектированию и строительству зданий и сооружений. Некоторые ее аспекты рассматривались в комплексах стандартов "Охрана природы" и "Система стандартов безопасности труда (ССБТ)", однако это рассмотрение почти не привязывается к строительному обеспечению безопасности. Так, например, ССБТ, в состав которой входит более 200 государственных и 160 отраслевых стандартов, устанавливает требования к видам опасных и вредных производственных факторов и нормы на них применительно к средствам защиты работающих, но не ориентируется на обеспечение безопасности для окружающей среды и населения от тех же вредных факторов (шума, вибраций и т.п.).

Явно не учитывалось, что переход через некоторые предельные состояния является событием, связанным с нарушением условий безопасности (например, с возможностью аварийного обрушения конструкций и гибелью людей), но в систематизированной форме и с явным указанием на безопасность такие отказы не выделялись и специально не обозначались.

Для жилых зданий это, по-видимому, было впервые сделано в компендиуме ЕЭК [36], но в общей форме такой вопрос еще не решен, имеются только первые и достаточно робкие подходы, зафиксированные в стандарте Украины [34], и еще предстоит большая работа по созданию и переработке целого ряда норм и стандартов. В связи с этим целесообразно рассмотреть три списка, где названы факторы, подлежащие учету при решении вопроса обеспечения безопасности.

В списке 1.1 представлена объектная сторона проблемы экологической безопасности — человек и окружающая среда (естественная и искусственная).

Список 1.1

1. Объекты, безопасность которых должна обеспечиваться:

1.1. Человек

1.2. Окружающая среда

1.2.1. Технические объекты и сооружения

1.2.2. Продукция и вещества:

- **воздух**
- **вода**
- **почва**
- **грунты**
- **недра**
- **рельеф**
- **ионосфера**
- **электромагнитные поля**

1.2.3. Биологические объекты (на уровне генов, клеток, организмов,популяций и экосистем):

- **флора**
- **фауна**

Список 1.2

2. Факторы, воздействующие на человека

2.1. Физические:

- **движущиеся машины и механизмы**
- **запыленность и загазованность**
- **нарушение температурного режима**
- **шум, вибрации, инфразвуковые колебания**
- **влажность**
- **подвижность воздуха**
- **ионизирующие излучения**
- **недостаточное освещение или излишняя яркость**

2.2. Химические вещества:

- **токсичные**
- **раздражающие**
- **канцерогенные**
- **мутагенные**

2.3. Биологические:

- **патогенные микроорганизмы**
- **другие микроорганизмы**

2.4. Физиологические:

- **физические перегрузки**
- **нервно-психические перегрузки**

Примерная классификация источников опасности дана в списке 1.2, при этом следует иметь в виду далекую от полноты детализацию в рамках этой схемы. Происхождение указанных опасностей может быть самым различным, но чаще всего различают факторы естественного и техногенного происхождения, поскольку различна возможность влияния на них.

Наконец, в списке 1.3 перечислены основные факторы, влияющие на уровень безопасности, которые следует учитывать при составлении технической и нормативной документации.

Список 1.3

3. Факторы, приводящие к нарушению уровня безопасности:

3.1. Нарушение правил проектирования, изготовления и монтажа, транспортирования, хранения и консервации

3.2. Нарушение правил эксплуатации и ремонта

3.3. Ошибки персонала

3.4. Критические отказы техносфер

3.5. Неблагоприятные природные факторы (землетрясения, смерчи, метеориты, наводнения, карстовые провалы и др.)

3.6. Отсутствие или неэффективность мер защиты

Нетрудно понять, что большинство из указанных факторов имеет отношение к проблемам и создания и использования зданий и сооружений. В следующем разделе многие из приведенных в списках 1.1 ÷ 1.3 факторов конкретизируются.

Способы нормирования безопасности связаны с количественными и качественными требованиями. Количественные требования характеризуются уровнем допустимого риска или предельно допустимыми нормами вредных воздействий (по концентрации, времени действия и другим показателям). Качественные требования формулируются в виде конструктивных, технологических или эксплуатационных ограничений.

Все эти соображения положены в основу списка 1.4, где приводится возможная классификация требований безопасности по форме их представления в нормативно-технической документации.

Эти требования могут составлять содержание специальных стандартов (например, имеется специальная система стандартов по безопасности труда) или входить в число других требований к объекту, но во всех случаях важна прямая запись того, что речь идет об условиях безопасности. В противном случае, возникает коллизия наименований, поскольку совершенно ясная для специалиста связь требований безопасности с требованиями обеспечения прочности здания или сооружения еще недостаточна для использования специальных законодательных актов по обеспечению безопасности и приводит зачастую к юридическим недоразумениям.

Список 1.4

4. Требования к безопасности
4.1. Количественные:
4.1.1. Предельно допустимые нормы
4.1.1.1.Предельно допустимая концентрация вредных веществ
4.1.1.2.Санитарные медицинские нормы по предельной интенсивности воздействий
4.1.1.3.Предельная нагрузка на окружающую среду
4.1.2. Риск безопасности
4.1.2.1. Показатели надежности по критическим отказам:
- **прочность**
- **устойчивость**
- **старение**
- **износостойкость и др.**

4.2. Качественные:
4.2.1. Требования к конфигурации или к конструкции
4.2.1.1.Ограничения области применения
4.2.1.2. Наличие защитных устройств
4.2.1.3. Данные о видах сигнализации
4.2.1.4. Виды резервирования
4.2.2. Правила выполнения работ
4.2.2.1.Требования к технологии изготовления
4.2.2.2.Требования к условиям перевозки и хранения
4.2.2.3.Требования к условиям эксплуатации
4.2.2.4. Правила монтажа
4.2.2.5.Требования к квалификации персонала
4.2.3. Требования к контролю качества
4.2.3.1. Перечень контролируемых параметров
4.2.3.2. Список проверок

Необходимо отметить важный аспект, отличающий рассмотрение надежности от рассмотрения безопасности. В первом случае практически не рассматривается само состояние отказа, включая и аварийный отказ. Здесь важен сам факт его достижения или недостижения и вероятность такого события. В случае рассмотрения проблемы безопасности предметом самого пристального внимания становится сама авария. В соответствии со стандартом [30] аварии подразделяются на проектные и запроктные. Для первых должно быть сформулировано понятие защиты от аварии, определены функции защиты, предусмотрены системы (устройства, элементы) безопасности, с помощью которых защита реализуется.

Для запроектной аварии должен быть только определен комплекс организационно-технических мероприятий, который необходимо реализовать при ее появлении для локализации последствий такой аварии и уменьшения степени поражения. Этот аспект проблемы ни в коей мере не должен недооцениваться. Установлено, например, что многие серьезные последствия землетрясения 1988 года в Армении были связаны, в числе прочего, и с тем, что в районе катастрофы отсутствовала информированность населения о возможной опасности, а администрация не была должным образом подготовлена для проведения спасательных работ.

1.5 О случайных параметрах расчета

Вероятностная трактовка понятий надежности, изложенная, например, в работах [15], [16], [93], [95], является в настоящее время общепризнанной, однако на объяснение некоторых аспектов использования вероятностных понятий обращается недостаточное внимание, что затрудняет их осознанное использование в практике инженерных расчетов, а иногда приводит к недоразумениям. Эти недоразумения связаны, главным образом, с двумя проблемами — интерпретацией надежностных выводов применительно к конкретному находящемуся в эксплуатации объекту и оценкой тех объективных неопределенностей, которые необязательно имеют случайное происхождение.

Следуя В.В. Болотину [15], остановимся на рассмотрении тех двух основных возражений, которые выдвигают противники статистических методов — сомнение в возможности получить достаточное для статистических выводов количество исходных данных и неприменимости статистического подхода к уникальным объектам.

По поводу первого возражения доводы В.В.Болотина основываются на справедливой уверенности в техническом и научном прогрессе и сводятся по сути к утверждению о принципиальной возможности преодоления технических трудностей за счет автоматизации измерений и обработки их результатов на ЭВМ. Это, действительно, так, но необходимость в использовании статистической информации часто возникает до того, как соответствующие измерения проведены и обстановка не позволяет дожидаться того момента, когда фактические данные в необходимом количестве будут получены. Означает ли это, что в таких условиях следует отказаться от вероятностной трактовки надежности? Конечно, нет, и обычно в таких обстоятельствах используют «рассуждение по аналогии», подкрепленное принятием значений некоторых параметров «в запас надежности». Типичным примером может служить использование новой, еще недостаточно изученной марки стали. Зная, что для строительных сталей коэффициент вариации предела текучести (это основная прочностная характеристика) колеблется от 0,05 до 0,08, принимают с запасом значение около 0,12 и дальше действуют по установленной ранее схеме. В таком подходе нет ничего порочного, разве что о таком решении четко не сообщается и

у специалиста, использующего этот результат, может создаться впечатление о его полной обоснованности.

По поводу второго возражения контрдоводы сводятся к утверждению, что «..вероятность есть некоторая объективная мера возможности наступления события. Эта мера сохраняет свой смысл независимо от того, является ли событие многократно воспроизводимым или нет» [15, с.8]. Безусловно, это верное утверждение и рассматриваемые в теории надежности вероятности отказов являются некоторыми объективными характеристиками, существующими независимо от того, нравится нам это или нет. Однако очень важна трактовка такой вероятности и исследование ее генезиса.

По сути источниками вероятных отклонений параметров конструкции и параметров окружающей среды, поставляющими внешние нагрузки и воздействия*), являются:

- случайный разброс свойств материалов и конструкций, реализующийся даже при абсолютно точном выполнении всех установленных технических требований;
- вероятные ошибки людей и нарушения технологии (по небрежности, невнимательности, непониманию и т.п.);
- случайный характер природных (например, климатических) процессов и неопределенность их проявления в конкретной точке расположения объекта.

Все эти факторы нуждаются в самостоятельном рассмотрении, и наименее изученной является статистика человеческих ошибок, о закономерностях которых иногда приходится судить по весьма далеким аналогиям человеческого поведения (например, по статистике уличных происшествий).

На понятийном уровне важно разделение неконтролируемых человеком факторов на две группы [22, с.17]:

- случайные фиксированные факторы, т.е. случайные величины и случайные процессы с известными законами распределения;

---

*) Окружающая среда вызывает в сооружении разнообразные механические и другие эффекты — изменение напряженно-деформированного состояния, износ, изменение физических параметров использованных материалов и ряд других кратковременных или длительных эффектов. В прочностных расчетах строительных конструкций, в том числе и в расчетах, связанных с оценкой надежности, обычно учитываются внешние воздействия, непосредственным следствием которых могут быть изменения неких механических параметров конструкции (внутренних усилий, перемещений, деформаций). Часто внешнее воздействие может быть представлено в форме действия внешней механической силы, тогда говорят не о влиянии воздействия, а о действующей на конструкцию нагрузке. Далее мы будем говорить о влиянии нагрузок и воздействий, имея в виду именно их непосредственные механические следствия. Эта оговорка является существенной, поскольку имеются воздействия, которые непосредственно не вызывают механические эффекты (например, воздействие агрессивной среды), хотя опосредствованно через изменение некоторых параметров системы (в рассматриваемом примере через изменение размеров сечений) и могут влиять на механическое поведение конструкции.

- неопределенные факторы, для которых известна только область, внутри которых могут находиться их значения, или область, внутри которой находятся законы распределения, если фактор случаен, но закон распределения для него неизвестен.

Введение понятия о неопределенных факторах выводит проблему за рамки рассмотрения (ставших уже традиционными) подходов и требует привлечения теории игр (игры против «природы») и рассмотрения в некотором смысле наихудших гипотез. Применительно к задачам надежности такие попытки предпринимались, например, в работах [39], [82] и др. В последней работе для тех случаев, когда недостаточно исходных данных, чтобы оценить функции и параметры распределения вероятностей случайной величины жесткости, предлагается использовать классы плотностей неопределенных величин по П. Хуберу [139] в зависимости от степени информированности. Рассматриваются случайные величины ε:

- с дисперсией, ограниченной значением υ — этот случай приводит к рассмотрению Гауссова распределения с плотностью

$$f(\varepsilon) = (2\pi\upsilon^2)^{-1/2}\exp(-0{,}5\varepsilon^2/\upsilon); \qquad (1.1)$$

- со средней величиной дисперсии σ_0 — этому случаю соответствует распределение Лапласа с плотностью

$$f(\varepsilon) = (2\lambda)^{-1}\exp(-|\varepsilon|/\lambda), \quad \lambda = \sigma_0(2/\pi)^{1/2}; \qquad (1.2)$$

- расположенные в интервале от -b до b — этому случаю соответствует распределение Хубера

$$f(\varepsilon) = (1/b)\cos^2(0{,}5\pi\varepsilon/b) \qquad (1.3)$$

и др. Все эти плотности связаны с осторожным подходом, поскольку обеспечивают наибольший объем эллипсоида рассеивания результатов.

Для случайных факторов важным понятием, которое используется при вероятностных обоснованиях и отражено в стандарте [27], является обеспеченность случайной величины, под которой понимается вероятность непревышения (незанижения) случайной реализацией этой величины, опасного повышенного (соответственно, пониженного) значения. Этим определением полностью исчерпывается формальная сторона вопроса, но имеются определенные особенности интерпретации, связанные с физическим смыслом рассматриваемых случайных величин. Если природа случайности связана с неопределенностью разовой реализации свойств в случайном ряду однотипных изделий (возможно, лишь воображаемом), как, например, происходит при рассмотрении случайных величин, характеризующих физические свойства материалов, то обеспеченность связывается с той или иной долей уверенности, что качество будет приемлемым. Если же рассматриваются случайные процессы, протекающие в окружающей среде (скорость ветра, температура, интенсивность осадков и т.п.) или в самой конструкции (коррозия, эрозия и т.п.), то следует помнить о том, что речь идет о вероятности возникновения некоторой ситуации в течение времени и с обусловленностью связывается определенный (весьма

часто очень условный) срок, который фиксируется с некоторой долей уверенности. Проводя достаточно рискованную аналогию с человеческой жизнью, можно говорить о первом типе случайностей, вспоминая вероятность гибели человека при рождении, а о втором — при рассмотрении вероятности гибели в результате несчастного случая.

Заметим, что нормативные значения случайных природных воздействий (ветер, снег, температура, сейсмика) часто назначаются как величины, превышаемые в среднем один раз в T_c лет. Тогда вероятность появления за один произвольно взятый год воздействия со средним сроком повторяемости T_c лет составляет $1/T_c$, а вероятность того, что такое воздействие F_c ни разу не возникнет за срок эксплуатации в T лет, может быть вычислена по формуле

$$P = (1 - 1/T_c)^T, \qquad (1.4)$$

если считать случайные годовые максимумы статистически независимыми. Эта вероятность не так уже и велика даже при значительных T_c, что видно из табл. 1.1 [127]. Например, вероятность того, что за 50 лет эксплуатации фактическая скорость ветра превысит максимальное годовое значение, встречающееся в среднем один раз в 50 лет, весьма велика и равна 0,64, но надежность конструкций, способных нести нагрузку, строго равную значению F_c, может оказаться вполне достаточной, поскольку само значение нагрузки F_c достаточно велико.

Нормативные документы некоторых стран (в отличие от отечественных) учитывают периоды повторяемости природных воздействий. Так, рекомендации Японского института архитектуры *[127]*, в соответствии с которыми за основу взят столетний период повторяемости, дают следующие значения для коэффициента перехода R к другому периоду повторяемости T_c:

для снеговой нагрузки $R = 0{,}40 + 0{,}13 \ln(T_c)$;

для ветровой нагрузки $R = 0{,}54 + 0{,}10 \ln(T_c)$;

для сейсмического воздействия $R = (T_c/100)^{0.54}$.

Такой подход представляется весьма перспективным.

Таблица 1.1

Период повторяемости (T_c, лет) нагрузки F_c	10	30	50	100	200	500	1000
Вероятность непревышения значения F_c за срок $\bar{T} = 50$ лет	0,005	0,13	0,36	0,61	0,78	0,90	0,95

С вероятностными соображениями связана и значительная неопределенность в самой трактовке термина «предельное состояние». Если для простоты рассматривать лишь требование прочности, то достижение предельного состояния определяется равенством

$$S_Q(Q) = S_R(R), \qquad (1.5)$$

где Q — обобщенное воздействие; R — обобщенная прочностная характеристика; S_Q и S_R — функции, с помощью которых нагрузка и прочность

представляются в сопоставимой форме (например, в виде внутреннего усилия и расчетного сопротивления сечения).

Поскольку левая и правая части равенства (1.5) являются случайными величинами, то имеется бесчисленное множество пар, реализующих это определение предельного состояния, и в пространстве параметров (рис.1.1) прямая (1.5) образует границу между допустимыми ($S_Q < S_R$) и недопустимыми ($S_Q > S_R$) областями.

Поскольку попасть в допустимую область и обеспечить выполнение условия $S_F < S_R$ можно лишь с некоторой вероятностью, то очевидна необходимость привлечения вероятностных соображений для анализа ситуации. С другой стороны, действующие нормы оперируют детерминистическими понятиями расчетных значений прочности R_p и нагрузки Q_p и по сути определяют предельное состояние как

$$S_Q(Q_p) = S_R(R_p). \tag{1.6}$$

Этому условию отвечает одна единственная точка N (рис.1.2), а допустимость определяется, как одновременное выполнение условий:

$$S_Q(Q) \le S_Q(Q_p)\ ; \quad S_R(R) \ge S_R(R_p). \tag{1.7}$$

Естественно, что вероятности реализации условий (1.5) и (1.7) совершенно различны, а сама возможность их записи может привести ко многим недоразумениям [148].

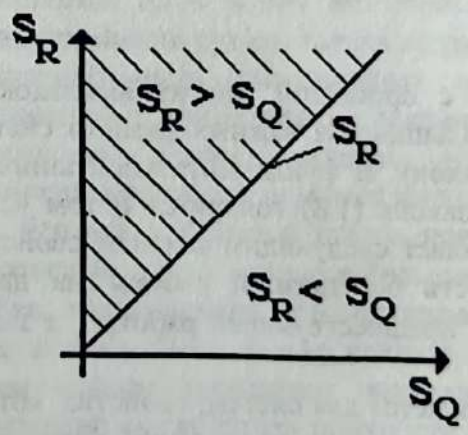


Рис.1.1. Пространство состояний и допустимая область

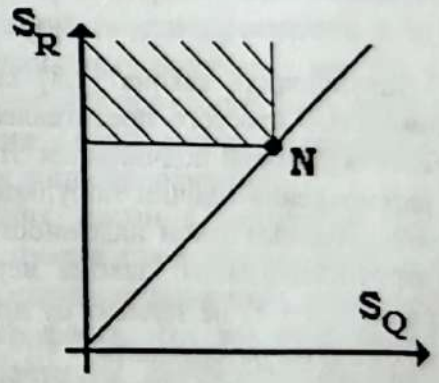


Рис.1.2. Допустимая область по нормам

Вероятностные соображения присутствуют и при оценке рисков, связанных с отказами и разрушениями конструкций или с другими проблемами обеспечения безопасности, которые становятся все более распространенными процедурами проектирования, в особенности для объектов повышенной опасности и/или ответственности. Вместе с тем само понятие риска описывается далеко не однозначно, начиная от бытового определения риска, как попытки

предпринять что-либо наудачу, без верного расчета, и кончая определением риска, как вероятности появления опасного события. Более двух десятков различных определений понятия «риск» проанализировано в работе [2].

Следует четко различать ставшую уже классической меру объективной возможности наступления нежелательного события — вероятность и меру его опасности, входящую в понятие риска. Риск сочетает в себе как оценку вероятности неблагоприятного события, так и оценку уровня последствий от его реализации (ущерб, убытки, потери и т.п.). Последнее легко проиллюстрировать двумя идеализациями крайних значений. Первая приводит к рассмотрению случая, когда вероятность возникновения события велика, но ущерб, связанный с его появлением, очень мал —ясно, что опасность невелика и риск оценивается как практически нулевой. Вторая ситуация возникает, когда ущерб от возможного события велик, но вероятность его появления весьма мала (практически равна нулю) — снова риск оценивается как очень малый. И лишь в тех случаях, когда опасность, как и вероятность ее появления, оценивается некоторыми конечными величинами, сложившаяся ситуация оценивается степенью риска.

1.6 Об экспоненциальном законе надежности

В теории надежности широко используется экспоненциальный закон надежности , в соответствии с которым опасность отказа $\lambda(t)$ не меняется с течением времени, т.е. $\lambda(t) = \lambda = const$, а функция надежности, т.е. вероятность безотказной работы за время t, имеет вид

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \qquad (1.8)$$

Популярность закона (1.8) связана с простотой многих выкладок и с возможностью простого представления большинства важных свойств системы, надежность которой подчиняется этому закону. В фундаментальной книге [24] при рассмотрении причин популярности закона (1.8) говорится о том «... что экспоненциальный закон надежности обладает следующим важным свойством: для экспоненциального закона вероятность безотказной работы на данном интервале $(t, t + \tau)$ не зависит от времени предшествующей работы , а зависит только от длины интервала τ».

Естественно, что закон (1.8) не выполняется для систем, свойства которых меняются с течением времени (например, за счет проявления физического износа) или же с течением времени меняется режим функционирования системы и условия окружающей среды. Однако и для полностью стационарных систем условие (1.8) не всегда выполняется, на что не всегда обращается соответствующее внимание. В частности, это относится к системам, случайные свойства которых определяются на множестве экземпляров, но будучи один раз реализованными в конкретном объекте, не меняются, подвергаясь последовательным воздействиям случайных нагрузок со стационарными свойствами. Казалось бы, на первый взгляд, что все условия для постоянства

опасности отказа соблюдены, но это не так. Строгое доказательство того, что для таких систем опасность отказа монотонно убывает, т.е. $d\lambda(t)/dt \le 0$, приводится в работе [24, с.107]. Там показано, что если опасность отказа является случайной величиной с законом распределения $F(\lambda)$, то функция надежности

$$P(t) = \int_0^{\bar{} } e^{-\lambda t} dF(\lambda), \tag{1.9}$$

а сама величина опасности отказа может быть определена, как

$$\lambda(t) = \frac{\int_0^{\bar{} } \lambda e^{-\lambda t} dF(\lambda)}{\int_0^{\bar{} } e^{-\lambda t} dF(\lambda)} \tag{1.10}$$

и ее производная по времени неположительная.

Применительно к строительным конструкциям этот факт обсуждался в [120], где указывалось, что экспоненциальный закон реализуется лишь в схеме независимых испытаний. Если несущая способность представляет собой случайную величину, о которой можно судить лишь по ее закону распределения, то испытания окажутся независимыми лишь тогда, когда после каждой пробы (нагружения) конструкция заменяется новым экземпляром, взятым из той же генеральной совокупности. Если же последовательным испытаниям подвергается один и тот же образец, то перед первым испытанием о его прочности можно судить только на основании плотности вероятности, а по мере увеличения числа выполненных испытаний мы получаем все большую информацию о том, какая же величина случайной прочности была фактически реализована. Таким образом, испытания оказываются зависимыми и экспоненциальный закон может выполняться лишь приближенно.

Вопрос о степени такого приближения связан с характером функции распределения $F(\lambda)$, однако в большинстве случаев для высоконадежных систем ошибка, возникающая при использовании схемы независимых испытаний, не очень велика. Этот вывод следует из того факта, что для высоконадежных систем каждое «успешное испытание» почти не добавляет информации о реализованных свойствах прочности испытанного образца, поскольку с высокой долей вероятности оно и должно было закончиться успешно. Справедливо и обратное рассуждение: чем менее надежна система (и, следовательно, чем выше опасность отказа в первом испытании), тем большую информацию о ее несущей способности мы получаем в том случае, если конструкция не отказала в этом испытании, и тем больше вероятность того, что в конструкции фактически реализовано значение несущей способности, заметно превышающее среднеожидаемый уровень. Поэтому опасность отказа убывает тем скорее, чем больше ее первоначальное (соответствующее началу эксплуатации) значение λ_0. Кроме того заметим, что использование экспоненциального закона с

первоначальным значением опасности отказа λ_0 приводит к занижению функции надежности, т.е. идет в запас.

Из сказанного следует важный качественный вывод, связанный с подходом к оценке существующих конструкций: чем более пессимистична расчетная оценка надежности давно эксплуатируемой конструкции, тем большими являются шансы на то, что реализация случайных прочностных параметров оказалась благоприятной.

1.7 О далеких экстраполяциях «хвостов» распределений

Большинство вероятностных моделей основывается на эксперименте и в основе используемых распределений вероятностей (нагрузок, прочностных свойств и т.п.) в конце концов находятся эмпирические факты и измерения. Поскольку в большинстве практически важных случаев нас интересуют редкие события, то нередко приходится экстраполировать в область малых и очень малых вероятностей те вероятностные распределения, которые хорошо обоснованы экспериментальным материалом лишь в области немалых вероятностей. Для такой экстраполяции используются сведения о теоретических свойствах распределений (например, асимптотические распределения экстремальных значений).

Если же оценки далекой асимптотики неизвестны и выводы в области малых вероятностей получены, например, простым машинным моделированием поведения конструкции на основе метода Монте-Карло или его модификаций, то это не может не настораживать исследователя. Дело в том, что при этом обычно моделируется некоторое теоретическое распределение $F(x)$ (иногда — класс распределений $F(x,\alpha)$ с неизвестными параметрами α), которому якобы подчинены исходные данные рассматриваемой задачи. Вид закона распределения $F(x,\alpha)$ (а тем более закон распределения полностью) может быть известен или из длительного и массового эксперимента, что чаще всего несправедливо при рассмотрении задач нового типа, для которых применяется метод моделирования, или же из некоторых математических и общих соображений, и это требует специального предварительного анализа.

Не имея ничего против метода Монте-Карло по существу и понимая его достоинства, связанные главным образом с универсальностью, автор хотел бы предостеречь от переоценки результатов, полученных с помощью этого метода, если эти результаты никак дополнительно не анализировались. Сказанное особенно важно для тех случаев, когда речь идет о вероятностях порядка 10^{-6} и ниже при оценке эффектов явлений и процессов, которые сами по себе недостаточно исследованы теоретически (например, при моделировании атмосферной турбулентности или сейсмического воздействия). Сторонники численного моделирования ссылаются обычно на хорошее совпадение промоделированных результатов с экспериментальными данными из теории переноса нейтронов или других проблем ядерной физики, забывая о том, что

сама математическая (и физическая) модель явления была при этом безупречной и основывалась на тщательном предварительном анализе.

Необходимо также заметить, что один из основных доводов в пользу определения надежности методом численного моделирования звучит так: метод может использоваться при полном отсутствии какой-либо информации о виде функции надежности. Но это означает, что проводимые расчеты, которые можно рассматривать как своеобразные «эксперименты» над конструкцией, должны планироваться как контрольные испытания на надежность. Как известно, для таких испытаний при полном отсутствии информации о распределениях необходимо выполнить

$$n \geq \ln(1 - \gamma) / \ln P \qquad (1.11)$$

безотказных испытаний, чтобы с доверительной вероятностью γ подтвердить уровень надежности P. Для высоконадежных систем с вероятностью отказа $1 - P \approx 10^{-6}$ при доверительной вероятности $\gamma = 0{,}95$ мы будем иметь $n \geq 3000000$, что даже для не очень сложной конструкции создает определенные проблемы при реализации расчетов.

Во многих случаях возникают сложности информационного обеспечения имитационной процедуры, о чем свидетельствует достаточно типичное рассуждение из популярной монографии [3].: "В случае существенно нелинейного поведения конструкции, когда невозможно использовать линейно-спектральный подход к расчету на сейсмические воздействия, остается единственный путь решения задачи — использование предусмотренного нормами варианта прямого динамического расчета на воздействие акселерограмм. Однако некоторые опасные состояния представляют собой редкие явления, и чтобы зафиксировать события на уровне вероятности 1% и меньше, требуется иметь сотни акселерограмм».

Конечно, не всякое значение очень малой вероятности должно нас настораживать. Имеется немало ситуаций, когда в задаче присутствуют несколько входных параметров, функции которых хорошо обоснованы имеющимися эмпирическими данными, и их значения, используемые в расчете, лежат в диапазоне не очень малых вероятностей. Совместное использование таких входных параметров в рамках корректной расчетной модели может привести и к результатам с весьма малыми вероятностями, но к ним нельзя предъявить претензий о необоснованности. По сути важным является лишь одно соображение — во всяком вероятностном выводе необходима согласованность с лежащей в основе анализа первичной статистикой данных.

По поводу сказанного полезно обратить внимание на дискуссию, которая возникла в связи с выводами, полученными методом статистического моделирования при решении одной задачи сейсмостойкости [55], [76]. Оспаривая выводы В.И.Малого, А.А.Петров ссылается на отсутствие надежно установленных зависимостей между расчетными и пиковыми значениями ускорений грунта при землетрясениях, что, по его мнению, полностью лишает доверия результаты численного моделирования, особенно в ситуации, когда

расчетная модель весьма чувствительна к случайной изменчивости входных параметров.

С эмпирическим происхождением функций распределения связано также следующее соображение. При оценке прочности некоторых конструктивных элементов и узлов используют материал испытаний и испытанные экземпляры (например, болтовых соединений) образуют основную совокупность образцов. Однако не исключена вероятность того, что имеются более слабые образцы, недостаточная несущая способность которых определяется не естественным разбросом свойств материала, а самой технологией производства или человеческими ошибками. При хорошей организации дела такие слабые экземпляры появляются столь редко, что практически исключено их появление в числе основных экспериментальных данных и они не скажутся на том распределении вероятностей, которым впоследствии будет моделироваться рассматриваемая ситуация. Однако с вероятностью их появления нельзя не считаться при серьезном тиражировании конструкции, когда без их учета можно получить ошибочные выводы.

Эту ситуацию проанализировал Джеймс Тейлор [156], который получил данные, приведенные в табл.1.2, для случая, когда в совокупности, состоящей из двух групп образцов, прочность которых распределена по нормальному закону с коэффициентом вариации 0,04, одна из групп слабее другой и составляет небольшую долю от основной.

Таблица 1.2

Средняя прочность слабой группы в % от сильной	Прочность (в % от средней прочности основной группы) с обеспеченностью 0,001, при доле слабой группы в смеси		
	1%	2%	5%
100	88	88	88
96	87	87	87
92	86	85	84
88	83	82	80
84	79	78	76
80	75	74	72

Эти результаты во многом объясняют тот общеизвестный факт, что опытные инженеры стараются иметь некоторый дополнительный запас надежности по отношению к тому, который предсказывает теория. Такой страховкой они выражают определенное недоверие к результатам на хвостах распределений и нельзя сказать, что такая осторожность полностью лишена смысла, особенно при переходе к очень малым вероятностям.

Еще одно важное соображение, относящееся к эмпирическому происхождению вероятностной информации [63], связано с тем, что фактически все реальные распределения дискретны и случайная величина принимает лишь конечное множество значений. Это вытекает хотя бы из того, что результаты

наблюдений записываются с помощью небольшого числа (два - пять) значащих цифр. В качестве примера можно указать на измерения такой величины, как скорость ветра, которая чаще всего фиксируется с точностью до 1 м/с. Именно поэтому элементы выборки могут совпадать, хотя в случае непрерывных функций распределения вероятность такого совпадения равна нулю.

Из этого часто делают вывод о необходимости использования только выборочных значений без привлечения дополнительных гипотез о виде распределения, хотя эта точка зрения представляется слишком радикальной. Более реалистичным является подход, который для обоснования непрерывных распределений использует не только все множество эмпирического материала, но и в некотором смысле расширяет его. Так, если для объема выборки n определена статистика $f_n(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, где $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — элементы выборки, то для изучения распределения статистики f_n сформируется еще n «похожих» выборок, которые получаются из исходной путем исключения какого-нибудь одного результата наблюдения. Тогда соответствующие статистики $f_{n-1}(x_1, x_2, \ldots, x_{j-1}, x_{j+1}, \ldots, x_n)$ дают возможность судить об устойчивости результатов обработки наблюдений. Генерирование множества выборок $x_1, x_2, \ldots, x_{j-1}, x_{j+1}, \ldots, x_n$ и их совместное использование получили название «будстреп-метода».

2. Набор требований к строительным объектам

Настоящий инженер должен верить своему глазу больше, чем любой формуле; он должен помнить слова натуралиста и философа Гексли: «Математика подобна жернову, перемалывает то, что под него засыпают» — и вот эту засыпку прежде всего инженер и должен смотреть.

А.Н. Крылов

2.1 Общие соображения

Каждое здание, сооружение или отдельная конструкция имеет определенное назначение и эксплуатируется в определенных условиях. Для обеспечения этих свойств должны быть выполнены некоторые условия, которым должны удовлетворять все принимаемые технические решения и меры по их практической реализации. В совокупности указанные условия образуют в пространстве параметров объекта некую допустимую область, нарушение хотя бы одного эксплуатационного требования определяет выход за границу такой области и формулируется как переход через предельное состояние. Требования, которым должны удовлетворять здания и сооружения, главным образом, касаются:

- безопасности для людей и окружающей среды;
- удобства использования по назначению, например, протекания технологических процессов, для реализации которых строится объект;
- обеспечения определенного уровня гигиены и комфорта;
- создания приемлемых условий для поддержания объекта в требуемом рабочем состоянии.

Все эти «потребительские свойства» могут быть охарактеризованы с качественной точки зрения, однако лишь некоторые из них поддаются точной количественной оценке. Поэтому для части параметров, количественная оценка которых затруднена, производится их подмена различными «рабочими характеристиками» всего здания или его отдельных частей, с помощью которых может достигаться удовлетворение соответствующих качественных требований.

С целью возможно большей четкости формулировок, по-видимому, целесообразно установить некую иерархию понятийных уровней, для которых формулируются различные требования к объекту.

На верхнем уровне формулируются требования, связанные с назначением конструкции — здесь определяются степень ее капитальности, уровень ответственности и значимость объекта для общества, выявляются связи с другими объектами, оцениваются последствия от аварийного прекращения функционирования.

На втором уровне анализируются возможные условия эксплуатации, выявляются требования к климатическим параметрам, атмосферным нагрузкам,

сейсмическим и другим воздействиям, характеристикам грунтов, степени пожарной опасности и т.п. Здесь необходимо провести границу между уровнем воздействий, которые следует оценивать как экстремальные, но все же допустимые, и запредельным уровнем воздействий. В первом случае необходимо учитывать возможность проявления рассматриваемых воздействий в процессе эксплуатации объекта и предусматривать необходимую для их восприятия прочность конструкции, во втором — эти воздействия не учитываются напрямую, а ничтожно малая вероятность их реализации учитывается косвенно путем разработки некоторых превентивных мер по локализации нежелательных последствий аварии или выработки правил поведения персонала в нештатных ситуациях.

Следующий, третий уровень связан с формулировкой требований в терминах оценки напряженно-деформированного состояния конструкций или в другой форме, которая допускает расчетный анализ (например, в терминах скорости коррозионного износа или с использованием понятий кинетики разрушения). Предельные состояния, а точнее их расчетные критерии, вводятся именно на этом уровне иерархии. При этом используются результаты анализа на более высоких уровнях иерархии, с помощью которых в запись расчетных критериев предельных состояний вводятся некоторые дополнительные параметры, например, такие, как классификационные признаки расчетных ситуаций или значения некоторых параметров, связанных с уровнем ответственности объекта.

Следует сказать, что в действующих нормах (см., например, [27]) определение предельных состояний связывается непосредственно с условиями эксплуатации, т.е. со вторым уровнем иерархии, а не с вытекающими из них расчетно-конструктивными требованиями третьего уровня. Заметим, что такие формулировки, как "обеспечение нормальной эксплуатации", "прекращение эксплуатации" и аналогичные им, являются бессодержательными, с точки зрения тех понятий (усилия, перемещения и др.), с использованием которых формулируется рабочий аппарат проверки конструкций по предельным состояниям. Это привело к необходимости давать каждому определению предельного состояния множество разъяснений в форме списка явлений (потеря устойчивости, различные виды разрушения, значительные перемещения и т.п.), с которыми связывается то или иное нарушение эксплуатационных требований. Сами же понятия "полная непригодность к эксплуатации" и "затруднение нормальной эксплуатации", с использованием которых дается формулировка предельных состояний, во многом остались непроясненными и декларативными, а по поводу сопровождающего их списка характерных явлений можно лишь высказать сомнение в полноте. Так, например, остается неясным, находится ли, с точки зрения упомянутого стандарта, в предельном состоянии конструкция, у которой полная непригодность к эксплуатации проявляется в форме абсолютно неприемлемых затрат на содержание и замена которой на другую обойдется дешевле. Этот пример является поучительным в связи с проблемой морального износа, которая почти не затрагивается действующими нормативными

документами. Другой поучительный пример дает нормирование прогибов по эстетико-психологическим критериям. Ведь здесь никаких «затруднений нормальной эксплуатации» нет и в помине, поскольку объект может нормально функционировать, но необходимость такой нормы не вызывает никаких сомнений.

Ниже приводится краткий обзор основных требований, предъявляемых к зданиям, сооружениям и их конструктивным элементам, которые обычно присутствуют в нормативной литературе. Этот обзор принципиально не может быть полным и не учитывает требования, связанные с удобством протекания технологических процессов, в силу их большой специфичности. Его целью является выработка общего взгляда на указанные требования, как на некую систему, поскольку надежность, в широком и точном смысле этого слова, трактуемая как «развернутое во времени качество», требует именно такого подхода.

2.2 Требования безопасности конструкций

Целью требований к безопасности конструкций является предотвращение аварий и обрушений здания или сооружения в целом и составляющих его частей, а также избежание других серьезных повреждений, которые могут привести к опасности для здоровья и жизни людей, к ущербу для окружающей среды или послужить причиной других аварийных ситуаций.

Аварии, конечно же, надо предупреждать, но полностью избежать сочетания неблагоприятных условий, в результате которых может возникнуть авария, принципиально невозможно. В качестве примеров можно привести случай падения крупного метеорита или же взрыва газа в результате диверсии. Понятно, что такие ситуации не могут служить предметом нормирования и на них нельзя ориентироваться при проектировании обычного жилого дома. Таким образом, можно лишь говорить о том, чтобы вероятность возникновения аварии не превышала некоторого заранее установленного предела.

Требования, касающиеся вероятности разрушения, могут быть указаны либо прямо — путем установления некоторой формально приемлемой вероятности разрушения, либо косвенно (как в настоящее время принято в большинстве нормативных документов) — путем указания некоторых пределов для усилий, напряжений или коэффициентов надежности, что соответствует определенной вероятности разрушения (к сожалению, обычно не установленной). В обоих случаях предписываемые величины дифференцируются в зависимости от возможных последствий разрушения (угрозы для жизни людей, социальных и экономических последствий). Как правило, выбор значений соответствующих параметров производится на основании опыта и с учетом экономических и социальных факторов, включая и экономические возможности общества.

Если объект спроектирован так, чтобы нагрузки и воздействия, которые могут иметь место в период строительства и эксплуатации, не могли бы с

заданной вероятностью вызвать полного разрушения всей конструкции или серьезного повреждения какой-либо важной ее части, то это еще не исключает таких опасностей, как:

- появление весьма маловероятных (так называемых запроектных) воздействий, которые обычно не учитываются при проектировании (взрывы, дорожно-транспортные происшествия, пожары и т.п.);
- грубые ошибки, допущенные специалистами при проектировании, строительстве и эксплуатации.

Требования относительно грубых ошибок в результате пробелов в информации, упущений, недопонимания, небрежности, а во многих случаях и относительно запроектных аварийных воздействий чаще всего не могут быть выражены количественными параметрами. Поэтому кроме обычных предписаний, касающихся проектных проверок прочности и устойчивости, следует соблюдать и некоторые другие рекомендации:

- выбирать схему сооружения такой, чтобы в случае неспособности любого элемента нести нагрузку от запроектного воздействия, это не приводило бы к разрушению всего сооружения или его значительной части (живучесть);
- предусматривать эффективный контроль при проектировании, производстве материалов и компонент, возведении и эксплуатации сооружения;
- заблаговременно предусмотреть необходимый комплекс организационных и технических мероприятий по эвакуации людей, аварийному водо- и энергоснабжению, оповещению населения, аварийной сигнализации и т.п.

2.3 Требования пожарной безопасности

Пожарная безопасность людей, находящихся в здании или вблизи от него (персонала, жильцов, клиентов и т.п.), и спасение имущества от огня зависят от длительности различных этапов распространения пожара и принятия мер пожарной безопасности. К числу определяющих параметров относятся периоды времени:

- подачи сигнала или оповещения о возникновении пожара;
- вступления пожарных команд в борьбу с огнем;
- на эвакуацию;
- выживания в помещениях, подверженных проникновению огня и дыма;
- сопротивления конструкций здания разрушению при воздействии пламени.

Длительность этих периодов, в свою очередь, зависит от эксплуатационного качества систем сигнализации и оповещения, планировки здания, огнестойкости несущих конструкций, действий пожарных команд и спасаемых людей. Поэтому обеспечение пожарной безопасности может быть связано с различными усилиями и можно сосредоточиться либо на сокращении времени эвакуации из здания, либо на увеличении сроков выживания в различных помещениях, либо на обеспечении более энергичных действий пожарных команд, либо на разработке более эффективных автоматических систем пожаротушения и т.д.

Некоторые временные параметры могут быть рассчитаны, хотя это часто сопряжено с большими трудностями (например, временные параметры огнестойкости конструкций), другие параметры нельзя рассчитать, а иногда и измерить. Они принимаются на основании эмпирических данных (ширина аварийного выхода, требования по наличию ограждений, характеристики огнестойкости облицовочных материалов и т.п.).

2.4 Безопасность в ходе эксплуатации

Здесь имеется в виду обеспечение безопасности людей, не связанной с их производственной деятельностью и особенностью протекания технологических процессов, а определяемой строительными решениями. В первую очередь это относится к безопасности передвижения внутри здания и вблизи него. Несчастные случаи могут быть вызваны:

- падением с высоких мест, не огражденных барьером;
- падением с крутых лестниц, не имеющих перил;
- падением на горизонтальных участках вследствие наличия порогов в необычных местах или незаметных ступеней;
- ударами о низко расположенные конструкции или карнизы дверей;
- падением в помещениях, где в качестве покрытия пола использованы слишком скользкие в сухом или влажном состоянии материалы;
- плохой различимостью стеклянных поверхностей дверей и окон;
- ударами дверей, открывающихся в разные стороны.

В некоторых случаях требования безопасности в ходе эксплуатации включают в себя обеспечение защиты от вторжения людей или животных, а также другие достаточно специфические аспекты безопасности (наверное, было бы интересно проследить за концепцией безопасности у создателей египетских пирамид).

К безопасности в ходе эксплуатации относятся также все требования по безопасности лифтов и других механических подъемников, а также различного оборудования зданий (электрическое, газовое, системы отопления и горячего водоснабжения и т.п.). Соответствующие требования безопасности формулируются в специальных нормативных документах и стандартах.

2.5 Гигиенические требования

Гигиена зданий, целью которой является обеспечение здоровья жильцов или производственного персонала, включает в себя ряд факторов. В частности, могут быть выделены следующие аспекты предъявляемых гигиенических требований:

- чистота воздушной среды;
- регулирование содержания влаги;
- качество водоснабжения;
- удаление отходов и нечистот;

- качество используемых покрытий и красок;
- инсоляция;
- уровень радиационного фона.

Некоторые из этих требований, например, параметры воздушной среды или требования к качеству питьевой воды, хорошо изучены и поддаются количественной оценке; другие, такие, как требования по удалению бытовых отходов, могут быть сформулированы только в общем виде.

Далеко не все гигиенические требования упомянуты в приведенном выше списке, некоторые из них, такие, например, как требования ограничения уровня вибраций или уровня шума, описаны ниже в качестве требований комфортабельности, хотя при весьма интенсивных вибрациях и шуме возможно опасаться их воздействия на здоровье человека.

Кроме параметров, определяющих гигиенические требования к качеству окружающей среды, обычно предъявляются требования к непрерывности обеспечения этих требований. В связи с этим могут потребоваться дублирующие системы, например, в тех случаях, когда воздухообмен обеспечивается кондиционерами или вентиляторами, могут быть предъявлены требования по наличию проемов, которые открываются на случай поломок оборудования.

Необходимо отметить, что гигиенические требования могут быть тесно связаны с другими требованиями. Так, например, ограничения по содержанию влаги связаны с тем, что когда элементы конструкций пропитываются водой, происходит не только повышение влажности в здании или появление плесени, но и снижается прочность некоторых конструкций и ограждений, а также их теплоизолирующие качества. Влажность в здании вызывается многими причинами, из которых можно отметить проникновение дождевой воды из-за дефектов покрытий или стен, подъем влаги из почвы, конденсацию внутренней влаги или утечки в системах водопровода и канализации. Независимо от причин появления требование в отношении влаги однозначно — вода не должна появляться на внутренних поверхностях ни в виде капель, ни в виде пятен.

2.6 Комфорт

Под требованиями комфортабельности обычно подразумевают комфорт:

- акустический;
- визуальный;
- гигротермический;
- обонятельный ;
- антроподинамический.

Акустический комфорт связан с предотвращением вредного для здоровья влияния слишком сильного шума и с ограничением неприятных ощущений и неудобств, вызываемых менее сильным шумом, который мешает сосредоточиться, а также вызывает усталость или нарушает сон. Максимально приемлемый уровень шума устанавливается обычно в соответствии с

эквивалентным звуковым давлением и привязывается к октавным диапазонам частот.

Визуальный комфорт определяется уровнем освещенности (естественным и искусственным светом порознь). Сложилась традиция обеспечения естественной освещенности через формулировку требований к значению отношения застекленной поверхности к площади пола. Часто устанавливаются требования по наличию аварийного освещения.

Гигротермический комфорт является весьма широким понятием и его субъективные оценки имеют весьма большой размах. Следует, например, обратить внимание на то, что в стандарте Американской ассоциации по вентиляции и кондиционированию, который по общему признанию является достаточно жестким, предлагается удовлетворять требования только 85% жильцов дома, поскольку удовлетворение требований всех жильцов может оказаться слишком дорогостоящим. Кроме того требования комфорта могут обеспечиваться не каждый день в течение года, когда один раз в год зимой и пять раз в год летом допускается отклонение температуры по сравнению с уровнем комфорта (при нормальной влажности — не ниже минус 20°С зимой и не выше плюс 23°С летом). Более жесткие требования по зимней температуре связаны с опасностью для маленьких детей и больных. К требованиям гигротермического комфорта относится и такое — точка росы должна быть ниже температуры внутренней поверхности помещения.

Обонятельный комфорт, как правило, обеспечивается требованиями к чистоте воздуха и не требует других мер, кроме тех, которые связаны с обеспечением гигиены воздушной среды.

Антроподинамический комфорт связан с действием вибрации на человеческий организм. Основными параметрами, по которым определяется неблагоприятное действие вибрации на человеческий организм, являются виброскорости и виброускорения. Их предельные значения в разных частотных диапазонах достаточно хорошо изучены, известны также и предельные дозы продолжительности неблагоприятного влияния вибрации. Эти нормативы обычно делятся на два уровня — уровень дискомфорта от вибрации (помехи для работы, укачивание) и уровень вибрации, представляющий опасность для здоровья (вибрационная болезнь). Кроме того допустимые уровни и дозы вибрации дифференцируются для населения и для персонала, профессионально связанного с работой в условиях вибрации.

2.7 Эксплуатационная надежность

Требования эксплуатационной надежности связаны с тем, что конструкция может стать неудобной или вообще непригодной для использования по назначению, даже оставаясь в целом прочной и устойчивой (например, получив местные повреждения или начав неправильно работать вследствие значительных деформаций). Наиболее частым местным повреждением является заметная трещина в защитных слоях, которая может привести к быстрому коррозионному

износу несущих конструкций или же нарушить требуемую непроницаемость конструкции (например, стенки резервуара). Значительные перемещения несущих конструкций могут приводить к неправильной работе оборудования (например, затруднять или вообще не допускать перемещения мостовых кранов или лифтовых подъемников). Такие же затруднения могут быть связаны с недопустимым уровнем вибрации.

С экономической точки зрения может оказаться неверным требование о полном недопущении местных повреждений или неправильной работы конструкций. Особенно это относится к обратимым нарушениям, когда ущербное состояние сохраняется лишь до тех пор, пока будет продолжаться воздействие, ставшее его причиной. В этих случаях одновременно с ограничениями значений нежелательного фактора (например, перемещения или угла наклона) предъявляется требование по ограничению продолжительности неправильной работы конструкции. Естественно, что при необратимых повреждениях, которые сохраняются до тех пор, пока конструкция не будет отремонтирована, требования чаще всего будут направлены на недопущение ущерба, хотя и здесь возможны некоторые градации. Они связаны с тем, что различные местные повреждения могут иметь разную скорость развития и одни из них могут ждать ремонта дольше, а другие требуют оперативного вмешательства.

Конструкции необходимо проектировать и строить достаточно надежными, чтобы их можно было использовать по назначению в течение всего предполагаемого срока эксплуатации. Это значит, что долговечность конструкций в ее рабочем режиме должна быть такой, чтобы ухудшение физических свойств материалов или неизбежный износ не приводили к недопустимой вероятности повреждения или неправильной работы в течение проектного срока службы. Поэтому конструкция чаще всего снабжается определенной защитой от преждевременного износа. Если не удается создать защиту, работоспособную в течение всего срока эксплуатации, то следует предусматривать возможность регулярного инспектирования конструкций, ее обслуживания и проведение ремонта в соответствии с установленной дисциплиной технической эксплуатации. Выполнение этих требований связано с обеспечением доступа к конструкциям, возможностью ремонта и замены ее отдельных частей и узлов, а иногда применения систем автоматизированного контроля и мониторинга.

2.8 Реновация и модернизация

Здания и сооружения являются объектами длительного пользования, поэтому условия их функционирования могут меняться на протяжении срока службы. Проектируя такой объект, следовало бы позаботиться о его пригодности к таким изменениям, наметить ожидаемые сроки реконструкции и замены оборудования, а также решить вопрос о других возможных модернизациях. К сожалению, такие исследования при проектировании обычно не делаются, что

обусловлено недостаточной методической проработкой проблемы, отсутствием достоверного прогноза развития соответствующей отрасли техники, нестабильностью рыночной ситуации и другими факторами. В связи с этим среди прочих показателей качества здания или сооружения указывается довольно неопределенное обобщенное требование о приспособленности к возможным изменениям, которое может сказаться на принятии гибких объемно-планировочных и конструктивных решений (выбор увеличенных пролетов и шагов колонн, использование свободной планировки, применение сборно-разборных конструкций и т.п.). Для некоторых типов сооружений таких, как мосты, эта функция «устремленности в будущее» реализуется путем рассмотрения нагрузок с учетом перспективы развития транспортных средств [109], однако для большинства других типов зданий и сооружений эта проблема не решена, несмотря на то, что ее актуальность была осознана уже давно [117, с.59-96].

3. Надежность и метод предельных состояний

Нет ничего тяжелее, чем преодолеть груз правильного, но слишком частного знания; пересмотреть традиции своих предшественников — это наибольшая оригинальность, которой может достичь человек.

К. Трусделл

3.1 Расчет по методу предельных состояний

Метод расчетных предельных состояний был введен в СССР в качестве руководящего принципа расчетов строительных конструкций с 1 января 1955 года при утверждении первого издания Строительных норм и правил [118]. Он базировался на исследованиях Н.С. Стрелецкого [114] , В.А. Балдина, В.М. Келдыша и И.И. Гольденблата и др. [8]. В дальнейшем расчет по предельным состояниям завоевал широкое признание во всем мире и в настоящее время он положен в основу стандарта ИСО [140] и системы Еврокодов [133], где он получил название «метод частных коэффициентов надежности».

Два названия — «метод предельных состояний» и «метод частных коэффициентов надежности» — отражают наиболее существенные стороны метода, при этом каждая из этих сторон имеет определенную независимость.

Если рассматривать метод с точки зрения использования предельных состояний, то нужно помнить, что в основе метода лежит идея отказа от детального анализа всех состояний конструкции, кроме предельных, по отношению к которым и формулируются расчетные требования к объекту. Приняв, например, за одно из предельных состояний условие прочности и запроектировав конструкцию так, чтобы с определенной степенью уверенности можно было говорить, что в течение всего срока службы это условие не будет нарушено, мы ничего не можем говорить о том, какой уровень фактических напряжений будет соответствовать нормальному (непредельному) состоянию при наиболее часто реализующихся условиях эксплуатации. И с этой точки зрения почти равноправными могут оказаться конструкция плотины, обычный уровень нагружения которой не очень далек от расчетного (например, он составляет 80% расчетного), и конструкция дымовой трубы, у которой появление расчетной нагрузки является весьма редким событием, а обычное нагружение соответствует, например, 15% расчетного. На первый взгляд такое «равноправие» неправомочно, но следует помнить, что вероятность нарушения предельного условия в обоих случаях предполагается одинаковой и исчерпание 20% запаса в первом случае реализуется с той же частотой, что и исчерпание 85% запаса во втором.

Если же фиксировать внимание на системе частных коэффициентов надежности, то увидим, что произошла замена одного общего коэффициента

запаса произведением нескольких (частных) коэффициентов, каждый из которы связан с определенной стороной проблемы безопасности —характером нагрузки свойствами материала, степенью ответственности объекта и т.п. Именн детализация в применении комбинации частных коэффициентов надежности обеспечивает (точнее, должна обеспечивать) рассматриваемую выше ситуации равной вероятности реализации предельного состояния двух объектов, обычно состояние которых резко отличается степенью близости к предельному. Следует заметить, что рассматриваемая характеристика метода чаще присутствует в его описаниях и переход от единого коэффициента запаса к дифференцированным инженеры считают если не единственным, то главным отличием метода предельных состояний от применявшегося до него метода расчета по допускаемым напряжениям. В этом смысле прижившееся в отечественной литературе название «метод предельных состояний» не выполняет своей роли и привычное объяснение скорее можно было бы отнести к наименованию «метод частных коэффициентов надежности», применяющемуся за рубежом.

Становление современного состояния разработанности метода проходило неровно и сопровождалось достаточно острыми дискуссиями. Главным образом, обсуждались следующие проблемы:

- количество предельных состояний, отличия по целям при их формулировании и отличительные особенности поведения конструкции в предельном состоянии;
- количество частных коэффициентов метода и их ролевые функции;
- пути приближения предельных состояний к реальной работе конструкции;
- принципы установления нормативных и расчетных значений нагрузок и сопротивлений;
- форма записи расчетных проверок и др.

Нам представляется правильным дать современному читателю хотя бы сжатые сведения о доводах, выдвигавшихся различными специалистами в ходе этих дискуссий, поскольку многие из них не были приняты для реализации в общих нормативных документах, как основанные на частном опыте, однако играли и продолжают играть определенную роль при рассмотрении таких частных проблем. Этому рассмотрению посвящены следующие разделы.

Необходимо также отметить, что собственно теории предельных состояний, как изложения некоего систематизированного взгляда на предмет, до сих пор нет. **Методика предельных состояний**, создававшаяся для составителей норм, не является **теорией метода предельных состояний**, которая должна стать инструментом инженера. В работе [113] справедливо отмечается, что «нормы всегда будут преследовать прежде всего утилитарные цели, они всегда будут отличаться от теории... Наверное, и впредь они не будут свободны от волевых решений и давлений фирм и директивных органов. А теория должна быть полностью научна на достигнутом уровне знаний. Нормы не будут точно следовать за теорией, а будут использовать собственные удобные для практики упрощения. Поэтому, меняя форму норм, необходимо не только сохранить суть

теории, но и развивать ее, обеспечивая возможность анализа автоматизированного расчета человеком».

3.2 Формулировка предельных состояний

В основополагающем стандарте [27] вводятся две группы предельных состояний: 1-я группа включает предельные состояния, которые ведут к полной непригодности объекта к эксплуатации, 2-я — предельные состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию объекта или уменьшающие его долговечность по сравнению с предусмотренным сроком службы. В предыдущих изданиях норм и стандартов рассматривалась и 3-я группа предельных состояний по образованию или чрезмерному развитию трещин, однако потом от ее отдельного рассмотрения отказались. Вообще количество групп предельных состояний и перечень явлений, с которыми такие состояния должны быть связаны, были предметом ожесточенных дискуссий. Достаточно типичным можно считать предложение Н.Н.Стрелецкого [112] по следующей классификации.

Аварийное нарушение эксплуатации:

Хрупкое разрушение ответственного элемента
Вязкое разрушение ответственного элемента
Усталостное разрушение ответственного элемента
Потеря устойчивости формы (общей) ответственного элемента
Потеря устойчивости положения
Качественное изменение геометрической конфигурации
Сдвиг грунта в основании

Необходимость прекращения эксплуатации:

Чрезмерные общие пластические и остаточные деформации
Опасные местные пластические деформации
Сдвиги в вязких соединениях
Сдвиги в фрикционных соединениях
Усталостная трещина
Опасная силовая трещина
Трещины в непроницаемых конструкциях
Опасные (резонансные) колебания
Потеря местной устойчивости

Затруднения для нормальной эксплуатации:

Недостаточная статическая или динамическая жесткость
Нежелательные общие остаточные деформации
Раскрытие трещин в железобетоне, снижающих долговечность
Возникновение трещин в предварительно напряженном железобетоне
Неопасные местные повреждения

Здесь выделены предельные состояния, связанные со скачкообразным изменением состояния конструкции, другие предельные состояния проявляются постепенно.

В этом перечне важно то, что выделяются состояния аварийного нарушения эксплуатации, и поскольку в официальной формулировке стандарта [27] это не сделано, то не прослеживается неравноправность ситуаций с угрозой аварии и других ситуаций, ведущих к прекращению эксплуатации. По-видимому, с этим обстоятельством связана устойчивая традиция инженеров-проектировщиков называть 1-ю группу предельных состояний предельными состояниями по прочности и устойчивости, не упоминая при этом о других причинах, по которым может стать невозможной нормальная эксплуатация объекта.

В соответствии с действующими нормами расчета конструкций по методу предельных состояний предполагается, что эксплуатация здания или сооружения прекратится ранее, чем будет исчерпана его фактическая несущая способность [116], и этот факт объявлен одним из постулатов метода расчета по предельным состояниям. Именно таким образом формулируется условие первого предельного состояния в основополагающем ГОСТ 27751-88, где к предельным состояниям 1-й группы отнесены «...предельные состояния, которые ведут к полной непригодности к эксплуатации конструкций, оснований (зданий или сооружений в целом) или к полной (частичной) потере несущей способности зданий и сооружений в целом» [27, с.2]. Эта формулировка предполагает, что кроме потери несущей способности в качестве критерия предельного состояния 1-й группы могут иметь место и такие события, как прекращение эксплуатации в связи с экономической нецелесообразностью дальнейшего содержания. Таким образом, например, завершила свое существование башня Киевского телецентра, построенная на Крещатике в начале 50-х годов, для которой переход к новым типам антенн оказался связанным со слишком дорогой модернизацией. Иными словами, формулировка ГОСТ 27751-88 предусматривает в числе причин перехода в предельное состояние 1-й группы не только физический, но и моральный износ.

Обосновывая приведенный выше постулат, указывают на то, что диаграмма работы материала не является идеальной (рис.3.1.а), а имеет возрастающую ветвь (рис.3.1.б) или на то, что постепенная потеря связности статически неопределимых систем происходит при сохранении несущей способности, однако эти доводы относятся не ко всем видам конструкций и не ко всем формам исчерпания несущей способности (например, к внезапным отказам типа потери устойчивости или хрупкого разрушения). Именно с этим, по-видимому, связан двойственный характер формулировки ГОСТ 27751-88.

Формально получается, что аварийные обрушения являются в некотором смысле занормативными событиями и статистика аварий не может быть использована для оценки фактического уровня надежности, поскольку в эту статистику не включены многие случаи безаварийного снятия конструкций с эксплуатации.

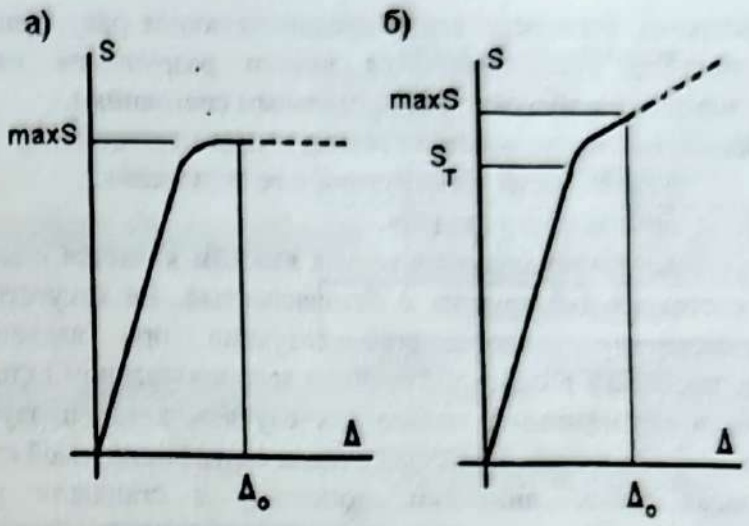


Рис.3.1. Диаграммы работы материала

Представляется, что здесь имеется определенная доля лукавства, поскольку содержательная расшифровка явлений, с которыми связаны предельные состояния первой группы (см. п.1.4 ГОСТ 27751-88), оперирует только таким списком:

- разрушения любого характера (пластическое, хрупкое, усталостное) — 1.a;
- потеря устойчивости формы, приводящая к полной непригодности к эксплуатации — 1.b;
- потеря устойчивости положения — 1.c;
- переход в изменяемую систему — 1.d;
- качественное изменение конфигурации —1.e;
- другие явления, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации (чрезмерные деформации в результате ползучести, пластичности, сдвига в соединениях, раскрытия трещин, а также образование трещин)— 1.f.

Как видно, это целиком относится к физико-механическим явлениям, и ни в какой мере не отражает экономическую сторону проблемы. Формулировка предельного состояния, приведенная выше, правильная и прогрессивная по форме, оказалась выхолощенной и сведена к простому лозунгу.

В определенном смысле последовательнее поступили составители международного стандарта [140], которые определили, что

«3.1.1. ... предельные состояния 1-й группы, которые соответствуют максимальной несущей способности (связаны с безопасностью)»

или Еврокода-1 [133], где указано, что

«3.2. (1) Абсолютные предельные состояния (ultimate limit state) — это такие предельные состояния, которые ассоциируются с разрушением или с другим подобным видом отказа.

(2) Состояния, непосредственно предшествующие разрушению, которые для простоты рассматриваются вместо разрушения как такового, относятся также к абсолютным предельным состояниям.

(3) Абсолютные предельные состояния имеют отношение к:

безопасности конструкции и ее окружения;

безопасности людей».

В приведенных формулировках весьма важным является ссылка на связь предельного состояния 1-й группы с безопасностью. Ее отсутствие в ГОСТ 27751-88 привело к парадоксальной ситуации при введении правил сертификации, поскольку в соответствующем законодательном акте говорилось о необходимости сертификации только для случаев, когда продукция может быть небезопасной для людей. В первый список сертифицируемой строительной продукции попал только линолеум, поскольку в стандарте упоминалась возможная опасность при некоторых химических составах сырья, а также шебень из пород камня с повышенной радиоактивностью. Конечно, формальный подход чиновников от сертификации был опровергнут и положение дел было исправлено, но это потребовало значительных усилий со стороны специалистов и рецидивы подобного рода не исключены до тех пор, пока явно не будет указано на связь отказов по 1-й группе предельных состояний с безопасностью.

Связь между требованиями надежности и расчетом по предельным состояниям обычно считается очевидной и указывается при помощи простого отождествления отказа (основного понятия теории надежности) достижению предельного состояния. И хотя понятие отказа в общем шире списка ситуаций, связываемых в [27] с предельными состояниями, в качестве первого приближения с этим можно согласиться, особенно если фактически несколько расширить список применяющихся формулировок предельных состояний.

Следует также заметить, что и в нормативной и в научной литературе по надежности строительных конструкций по традиции практически исключительно рассматриваются только принципы обеспечения надежности, основанные на обеспечении «безопасного ресурса», т.е. в той или иной мере сводящиеся к назначению запасов несущей способности конструкций. Путь обеспечения надежности, связанный с проведением контрольно-проверочных работ, ремонтом и заменой частей конструкций, с другими действиями при эксплуатации исследован гораздо в меньшей степени и практически не нормирован. Вместе с тем при более широком взгляде на надежность следовало бы рассмотреть весь комплекс проблем, приводящих к возможным отказам (рис.3.2). Тогда станут очевидными место и роль норм проектирования в обеспечении надежности, а также их взаимосвязь с проблемами контроля и его неполной достоверностью.



Рис.3.2. Формирование потока отказов

Схема формирования потока отказов, изображенная на рис.3.2 [89], содержит все основные этапы жизненного цикла (проектирование, заводское изготовление, работы на стройплощадке и техническая эксплуатация), которые

изображены жирными прямоугольниками. Светлыми прямоугольниками показаны регламентирующие упомянутые этапы нормативные документы.

Объективные и субъективные опасности изображены в виде двух потоков, конфигурация которых условно характеризует степень допущения объективных опасностей и возможность накопления ошибок.

Следует отметить, что опасности могут не только накапливаться при переходе от одного этапа к другому, но и взаимодействуют одна с другой – ошибки, допущенные на одном этапе жизненного цикла, стимулируют ошибки другого этапа. Простейшим примером может служить ошибка при выборе объемно-планировочного решения (этап проектирования), затрудняющего доступ к конструкции и, как следствие, инициирующая ошибку на этапе технической эксплуатации из-за некачественного ухода за конструкцией.

3.3 Возможная классификация отказов

В основе понятия «надежность» лежит представление об отказе, который обычно определяется как событие, переводящее конструкцию из работоспособного состояния в неработоспособное. Такое представление хорошо приспособлено к описанию так называемых четких отказов, однако имеются и нечеткие отказы, для которых характерна определенная размытость границы между работоспособным (нормальным) и неработоспособным (ущербным) состоянием конструкции. В связи с этим было предложено использовать определение отказа, как события, следствием которого могут быть определенные потери [119] или как события, состоящего в том, что рассматриваемая конструкция оказывается ущербной [93]. В этом случае предполагается, что возможна эксплуатация отказавшей конструкции без проведения восстановления, что, конечно, связано с определенным ущербом, однако такое положение характерно для строительных конструкций, восстановление которых (капитальный или текущий ремонт) выполняется не сразу после обнаружения большинства отказов.

Важно при этом отметить, что при рассмотрении сложной системы само по себе понятие отказа относится к определенному уровню иерархии ее подсистем и элементов. Отказы, даже приводящие к прекращению функционирования на низшей ступени иерархии, для более высокого уровня часто могут классифицироваться лишь как неисправности и не быть связанными с потерей работоспособности. Например, если в многоболтовом соединении разрушился один болт, но само соединение может воспринимать нагрузку, то для болта — это отказ, а для соединения — это неисправность.

Отказы строительных конструкций в зависимости от целей исследования можно классифицировать по различным признакам. Наиболее исчерпывающий список признаков классификации дан в РД 50-699-90 [94], на основании которого ниже приводятся некоторые полезные сведения (с учетом некоторого приспособления к специфике строительных конструкций). Заметим, что в отличие от строительной традиции, где понятия отказа и достижения

предельного состояния отождествляются, в [26] между ними делается различие, поскольку не каждый отказ («нарушение работоспособного состояния объекта») отождествляется с предельным состоянием («дальнейшее применение объекта по назначению недопустимо или нецелесообразно, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно»).

Итак, отказы (О) и предельные состояния (ПС) классифицируются по следующим признакам:

- последствия О (достижения ПС) — критические (связанные с угрозой для жизни и здоровья людей или окружающей среды со значительными экономическими потерями или с невыполнением ответственных заданий) или некритические;
- способы обнаружения О (достижения ПС) — внешний осмотр, с помощью инструментальных методов контроля, с использованием встроенных контрольных систем;
- внешние проявления О (достижения ПС) — нарушение функционирования, нарушение внешнего вида, изменение геометрических размеров и формы, увеличение расходов на эксплуатацию, срабатывание сигнальных и защитных устройств;
- механизмы возникновения О (достижения ПС) — механическое разрушение, физико-химический износ, деградация свойств;
- причины возникновения О (достижения ПС) — нарушение правил и норм проектирования, изготовления, транспортировки, монтажа, эксплуатации или естественное старение и изнашивание при соблюдении всех установленных норм и правил или, наконец, возникновение редких явлений природного или техногенного характера, являющихся запроектными для рассматриваемого объекта;
- способы восстановления после О (достижения ПС) — замена, ремонт, регулировка.

Таким образом, при решении различных задач надежности (оценка параметров, анализ отказов, прогнозирование ресурса и др.) следует различать отказы и предельные состояния по классификационным признакам, приведенным в табл. 3.1.

Необходимо отметить определенную схоластичность в спорах о числе групп предельных состояний. При введении метода предельных состояний, когда каждая из групп (их тогда было три) отождествлялась с определенными физическими событиями, наступлению которых она была призвана противостоять, такой подход имел больший смысл, чем в настоящее время, когда с определенной группой предельных состояний все чаще связывается только допустимый уровень риска и одни и те же явления могут быть отнесены к различным группам в зависимости от тяжести последствий (это относится, например, к потере устойчивости формы в стандарте [27]).

Таблица 3.1

Классификационный признак	Вид отказа
Характер изменения параметров во времени	Внезапный
	Постепенный
Проявление ущерба от отказа	Мгновенное образование ущерба (отказ-срыв)
	Накопление ущерба (отказ-помеха)
Наличие внешних проявлений	Очевидный (явный)
	Скрытый (неявный)
Возможность устранения	Устранимый
	Неустранимый
	Временный самоустраняющийся (сбой)
Характер развития на других уровнях иерархии	Развивающийся
	Локализуемый
Обусловленность другими отказами	Зависимый
	Независимый
Потери, связанные с отказом:	затраты на восстановление отказавшей конструкции; затраты на восстановление других частей сооружения; потеря прибыли от обслуживаемого производства; угроза для окружающей среды; угроза для здоровья и жизни людей

По сути регулирование допустимого уровня риска за счет введения коэффициентов надежности и ответственности размывает различие между группами предельных состояний, и это является объективным фактором подхода к нормированию, как к способу регламентирования надежности.

Если, например, рассмотреть требования прочности и устойчивости каркаса газетного киоска (формально это проблема 1-й группы предельных состояний) и нормы перемещений для перекрытия, на котором должно размещаться прецизионное оборудование (формально это проблема 2-й группы предельных состояний), то, очевидно, что допустимый уровень риска может не соответствовать обычно принимаемому соотношению для указанных групп предельных состояний.

Если бы проектирование каждого сооружения сопровождалось детальным анализом всех мыслимых вариантов его поведения (включая и варианты разрушения), то можно было бы вообще не заниматься никакой классификацией. Ее смысл в установлении некоторого числа заранее изученных стандартных ситуаций, для которых вырабатываются рекомендации по оценке их допустимости и мерам предотвращения нежелательных последствий.

При выработке подходов к установлению таких стандартных ситуаций, по-видимому, необходимо четко определить, что именно считается

неработоспособным состоянием (переход к нему не обязательно является предельным состоянием, в особенности для систем с защитными устройствами [74]) и что именно следует считать предельным состоянием. Критерии предельных состояний необходимо устанавливать на основании таких признаков, когда возникает невозможность или затруднение нормальной эксплуатации объекта по причинам:

- неустранимого нарушения требований безопасности;
- неустранимого выхода существенных параметров здания или сооружения за допустимые пределы;
- недопустимого снижения эффективности использования объекта по назначению;
- необходимости проведения реконструкции или капитального ремонта.

Уже сама конкретизация формулировки поставленных вопросов дает много для выработки правильного подхода к проблеме определения допустимого уровня риска.

3.4 Возможно ли оптимизировать допустимый риск?

Использование вероятностных методов в какой бы то ни было форме требует четкого представления о допустимом уровне риска.

Когда речь идет об экономических потерях, которые могут быть следствием отказа (так называемые системы с чисто экономической ответственностью), то все в конце концов может быть решено путем сопоставления затрат на обеспечение необходимого уровня надежности и вероятного ущерба от возможной ненадежности объекта. Естественно, что при оценке ущерба должны учитываться все компоненты:

- затраты на демонтаж поврежденных конструкций и их замену;
- затраты на восстановление или ремонт;
- потери, связанные с падением деловой активности (упущенная выгода), равные доходу, который могли бы получить за период восстановления работники предприятия;
- компенсация постороннего ущерба, связанного с нарушением договоров на поставку продукции, штрафами за загрязнение окружающей среды и т.п.

Для систем с чисто экономической ответственностью обычно используют представление об общих затратах и доходах за время жизни объекта T, заменяя при этом анализ обычной начальной стоимости сооружения C_k анализом полных ожидаемых затрат

$$C = C_k + C(T) = C_k + \int_0^T \{Y_k(t)p(t) - B(t)[1 - p(t)]\}e^{-n}dt, \qquad (3.1)$$

где C_k — стоимость конструкции при ее создании; C(T) — суммарные затраты за время эксплуатации T; $Y_k(t)$ — убытки от отказа, произошедшего в момент времени t; p(t) — вероятность отказа на интервале от t до (t + dt); B(t) — доход, который приносит объект при безотказной работе; e^{-n} — коэффициент

отдаленности затрат; r — параметр дисконтирования. Здесь предполагается, что отказ является четким, происходит в течение весьма короткого времени и отказавшая конструкция сразу же ремонтируется и возвращается в состояние, предшествующее отказу.

Естественно, что это лишь одна из возможных технико-экономических моделей, они могут быть различными, с точки зрения каждой из заинтересованных сторон (владелец объекта, строитель, эксплуатирующая организация, общество в целом), и по этому поводу часто возникают дискуссии.

Одним из таких предметов обсуждения является вопрос о дисконтировании затрат, которое реализуется введением множителя e^{-rt} в выражение (3.1) для приведения будущих затрат к начальному моменту времени. Такой способ дисконтирования реализует простое предположение о постоянстве процента с капитала r_o (вообще говоря, неверное), так что размер C_t некоторой суммы C_0, которая будет приобретена или потеряна через t лет определяется известной формулой $C_t = C_0(1 + r_o)^{-t} = C_0e^{-rt}$, где $r = \ln(1 + r_o)$.

Дисконтирование затрат учитывает точку зрения владельца капитала, который считает, что любые средства должны приносить доход, а средняя доходность экономической деятельности в обществе равна r_o, так что заметное отклонение от этого уровня доходности приводит к перетеканию капитала в другой сектор экономики, поскольку имеется возможность более разумно распорядиться капиталовложениями. Дисконтирование «удешевляет» будущие затраты и заставляет дорожить сиюминутными затратами больше, чем перспективными доходами и расходами, которые очень быстро убывают и при относительно небольшом $r_o = 0{,}08$ уже для $t = 50$ получим $C_{50} = 0{,}018C_0$. Однако с точки зрения эксплуатирующей организации, работающей в этом будущем, которая, например, арендует объект, нести текущие затраты приходится в полном объеме, а «заработанные» средства чаще всего отсутствуют (истрачены на другие нужды, достались другим лицам и т.п.). В связи с этим часто можно услышать жалобы эксплуатационного персонала на непродуманность принятых в свое время решений, недооценку эксплуатационной стадии и т.п.

Необходимо отметить, что в зависимости от принимаемых проектных решений (например, от поперечного сечения напряженного элемента) меняется и вероятность отказа и полные ожидаемые затраты. По данным практически всех известных исследований зависимость между этими величинами имеет характерный вид, показанный на рис.3.3.

Важной особенностью этой зависимости является то, что при увеличении вероятности отказа по сравнению с оптимальным значением полные ожидаемые затраты растут гораздо быстрее, чем при уменьшении этой вероятности, т.е. избыток надежности стоит меньше недостатка надежности. Такая зависимость выражается тем ярче, чем более ответственным является сооружение, поскольку тогда стоимость увеличения надежности, определяемая затратами на само сооружение, становится намного меньшей стоимости аварии, определяемой назначением и значимостью объекта. По-видимому, этими особенностями

зависимости C = C(p), быть может, воспринимаемыми на полуинтуитивном уровне, руководствуются инженеры, принимая в сомнительных случаях решение «в запас надежности», хотя все же основными доводами здесь является соображения безопасности.



Рис.3.3. Зависимость затрат от уровня надежности

Главное, что для рассмотренных систем с чисто экономической ответственностью можно решать оптимизационную задачу на минимизацию функционала (3.1) и получать таким образом некоторые данные о допустимом уровне риска.

Для систем с неэкономической ответственностью, отказ которых может быть связан с жертвами или моральным ущербом, проблема существенно усложняется и по поводу методов ее решения идут многолетние дискуссии.

Вот как излагается существо проблемы в известной монографии Г. Аугусти, А. Баратта и Ф. Кашиати — «...не все виды ущерба могут быть оценены в денежном выражении. И тем не менее, многие исследователи пытаются и в этом случае решать задачу с помощью целевой функции, получая абсурдные результаты. К этому же приводят и попытки включить цену человеческой жизни в целевую функцию как дополнение к общим потерям.» [3, с. 309-317]. Далее авторы книги обращают внимание на то, что оптимизация по критерию минимизации суммарных затрат H_{tot}, в которые включена стоимость жизни, приводит к условию

$$\Delta H_{tot} / \Delta v = 0, \qquad (3.2)$$

где Δv — количество спасенных жизней при увеличении затрат на ΔH_{tot}. Утверждается, что «это условие можно истолковать следующим образом:

сообществу невыгодно платить ни одного доллара за дополнительно спасенную жизнь» и делается вывод, что оптимизационное решение практически неприемлемо.

Однако условие (3.2) можно выразить и другими формулировками, звучащими абсолютно нецинично. Например, такой: «поскольку экономические возможности любого общества ограничены, то оно не имеет возможности платить ни на один доллар больше за дополнительно спасенную жизнь» или такой: «сообществу невыгодно платить ни одного доллара за дополнительно спасенную рассматриваемым способом жизнь, поскольку при других способах использования ограниченных средств (например, за счет организации ранней диагностики рака) можно спасти больше жизней».

В качестве возможной альтернативы авторы монографии [3] рассматривают возможность представлять лицам, принимающим решение, три характерных показателя безопасности: величину y_{min}, соответствующую решению уравнения оптимальности (3.2), величину y_b, при которой суммарная «стоимость» дополнительно спасенных жизней равна затратам на проведение защитных мероприятий, и величину y_b, соответствующую такой стоимости, что абсолютно такая же сумма денег, вложенная в другие мероприятия по предотвращению риска, приведет к спасению значительно большего числа жизней, чем одна. При этом говорится, что «такой подход не противоречит здравому смыслу и морали», хотя и не обсуждается вопрос об образе действия лиц, принимающих решение. Кроме того утверждается, что наиболее правильной процедурой была бы такая: определяется чисто экономический оптимум и далее рассматривается непрерывная последовательность других возможных решений, которым соответствует увеличение надежности при наименьших возможных потерях полезности. В пользу такого подхода говорит то, что при этом допустимая надежность не задается априори, а выбирается лишь после исследования различных возможных решений с учетом экономических последствий ее увеличения и в пределах расходов, допустимых с точки зрения ограниченных возможностей общества. «Какое из этих решений принять, решается не из технических соображений, в зависимости от того, кто сколько хочет или принужден потратить в форме снижения экономической выгоды для уменьшения не поддающихся оценке потерь [3, с. 317]».

Следует отметить, что имеются и другие доводы в пользу применения оптимизационных подходов при выборе решения о допустимом уровне риска. Они связаны с идеей С.К. Блэка и Ф. Нихауса [14], которые обратили внимание на то, что расходы на обеспечение безопасности обычно следуют экономическому закону уменьшения отдачи. Основная зависимость этого закона в некоторых условных единицах измерения имеет вид, подобный показанному на рис. 3.4. Из этого графика видно, что первоначально можно снизить относительно большой риск до значительно меньшего уровня при относительно малых затратах, а потом снижение риска обходится все дороже. Тем не менее создается впечатление, что если не считаться с затратами, то существует возможность сократить риск до любого наперед заданного уровня. Однако сами

по себе усилия по снижению риска связаны с определенными действиями (строительными работами, установкой защитного оборудования и др.), при реализации которых также возможны потери здоровья и жизни людей, о чем свидетельствует статистика несчастных случаев в народном хозяйстве.

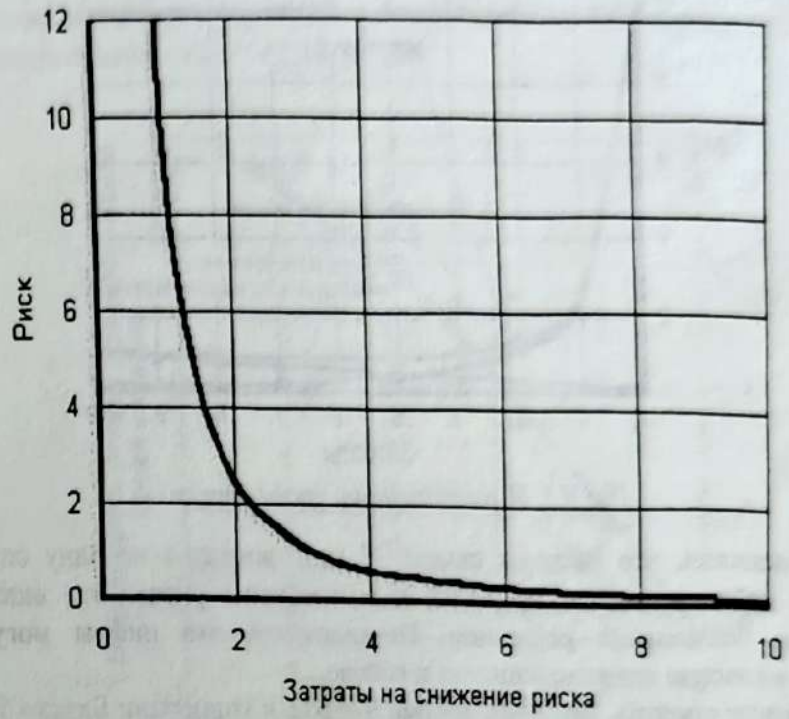


Рис.3.4. Закон уменьшения отдачи

В связи с этим на графике эффективности затрат появляется дополнительный линейный член, который практически не меняет его вид при относительно малых затратах, но реализует минимум на суммарной кривой (рис.3.5).

Важный вывод, который был сделан из самого факта существования минимума эффективности затрат состоял в подтверждении того факта, что может быть обоснована замена ранее использовавшегося принципа ALAPA (as low as practicably achievable) — «настолько низко, насколько это практически возможно» — новым принципом ALARA (as low as reasonably achievable) — «настолько низко, насколько это целесообразно». Эта замена часто использовалась и ранее, но ее применение всегда было связано с острыми дискуссиями.

Что касается числовых оценок, то на основании анализа данных по Германии С.К. Блэк и Ф. Нихаус пришли к выводу о том, что на каждый 1 млн. долларов, затрачиваемый на производство оборудования и выполнение работ по повышению безопасности, приходится $12{,}28\times10^{-3}$ смертей, в результате:

аварий на производстве — $7{,}86\times10^{-3}$;

автомобильных аварий — $4{,}12\times10^{-3}$;
профессиональных заболеваний — $0{,}306\times10^{-3}$.



Рис.3.5. К оптимизации уровня риска

Выяснилось, что расходы свыше 33 млн. долларов на одну спасенную жизнь в действительности приводят к возрастанию риска. Это оказывается «слишком безопасным» решением. По-видимому, эти цифры могут быть приняты в качестве ориентировочных и сейчас.

Следует отметить, что идея, весьма близкая к концепции Блэка - Нихауса, была предложена для выработки решений по обеспечению безопасности саркофага над аварийным четвертым энергоблоком Чернобыльской АЭС*) . Сопоставлялось снижение уровня радиационной опасности для населения, ожидаемое при различных вариантах степени восстановления работоспособности и долговечности саркофага, с возможным радиационным поражением ремонтных рабочих. Оптимизация «бэрозатрат» привела к выводу о нецелесообразности использования подходов к безопасности, зафиксированных в действующих нормативных документах для атомной энергетики, и необходимости поиска менее традиционных решений. Такая идея заслуживает самого пристального внимания и является альтернативой применявшемуся при «ликвидации последствий аварии ЧАЭС» в 1986 году подходу, следствием которого стало то, что во всей военной авиации бывшего СССР практически не осталось ни одного вертолетчика, не получившего предельно допустимую дозу облучения.

*) Предложение М.В. Сидоренко

3.5 Сопоставительный анализ рисков

Детальные решения оптимизационных задач для выбора уровня допустимого риска требуют анализа достаточно больших объемов информации, при этом многие статистические данные оказываются недостаточно достоверными, а зачастую совсем недоступными. В связи с этим, а также во избежание возможных упреков в цинизме большой популярностью пользуется метод сопоставительного анализа рисков.



Рис.3.6. Вероятности отказов:
1 - сейсмостойкие здания (США); 2 - здания (США); 3 - мосты (Германия); 4 - мосты (Великобритания); 5 - стационарные морские платформы (Веритас); 6 - торговые суда (Ллойд)

При этом используются оценки для ранее построенных и «успешно эксплуатирующихся» аналогичных или похожих сооружений, оценки риска, обеспечиваемого при использовании существующих нормативных документов и правил расчета, включая нормы, предназначенные для проектирования других похожих сооружений. Некоторые данные такого рода [135] представлены на рис. 3.6. Были также выполнены подсчеты ожидаемого числа жертв при авариях различного типа (рис.3.7), из которых видно, что источником наиболее массовых несчастных случаев являются землетрясения.

Поскольку, как уже отмечалось ранее, экономические возможности общества ограничены, то представляется разумным следующий подход: общие средства, выделяемые обществом на обеспечение безопасности, должны быть распределены так, чтобы ожидаемое количество возможных жертв по всем видам опасностей было бы минимальным. Конечно, никто такую глобальную экономико-социальную задачу не решает, однако сама ее формулировка является принципиально важной, поскольку она, во-первых, отвергает часто

используемый спекулятивный лозунг о «неограниченной ценности человеческой жизни» и, во-вторых, служит основой для сопоставления рисков от различных мероприятий и в различных областях деятельности.



Рис.3.7. Оценка количества возможных жертв аварий

Несмотря на имеющийся риск общество продолжает использовать технику, в принципе подверженную отказам и являющуюся источником опасностей, при этом оно приходит к некоторым приемлемым решениям эволюционным путем. Известные специалисты в области надежности Б.В. Гнеденко, Б.А. Козлов и И.А. Ушаков пишут об этом «...Как и во всех других областях техники, где возникают неформализуемые или еще неформализованные задачи, решение в этой области принимается на основании интуиции специалистов, подкрепленной анализом существующего уровня качественных характеристик изделий. Конечно, здесь имеют место постоянные ошибки, ... однако в общем процессе развития техники происходит своеобразный «естественный отбор», в результате которого слишком неправильно спроектированные изделия «вымирают».

Таким образом, осуществляется формирование целесообразных норм многих характеристик, и в том числе характеристик надежности: множество субъективных мнений формирует объективное представление о критериях целесообразного [25, с. 20]».

Наконец, каждая крупная техническая авария является событием, которое вызывает определенный общественный резонанс и вырабатывает негативное отношение как специалистов, так и населения к конструкции объекта, с которой произошла авария. Такого рода эффекты значительно увеличиваются при повторных авариях однотипных объектов и часто бывает достаточным, чтобы после двух-трех аварийных отказов утвердилось прочное мнение об абсолютной ненадежности конструкции некоторого типа. При этом практически

игнорируется фактический уровень аварийности и, например, три близких по времени аварии на миллион эксплуатируемых объектов могут вызвать более негативное отношение, чем аналогичная по тяжести последствий единичная авария, приходящаяся на тысячу эксплуатируемых объектов, хотя реализовавшаяся при этом вероятность отказа 1:1000 намного выше, чем 3:1000000.

При использовании сравнения с риском в других ситуациях необходимо учитывать некоторые особенности, которые присутствуют при формировании общественного мнения. Так, например, многочисленные опросы, проведенные еще до аварии на атомной станции «Три Майл Айленд» и до Чернобыльской катастрофы, показали, что люди считают АЭС очень опасными объектами, несмотря на то, что уровень реальной угрозы атомной энергетики занимал тогда лишь двадцатое место, уступив место курению, автомобильным авариям, несчастным случаям при купании и пр. По-видимому, решающее значение тут имеет разница между добровольным риском и риском по принуждению. Риск собственной жизнью и здоровьем является атрибутом личной свободы, которая высоко ценится, а принуждение к подобному же риску других людей есть покушение на личную свободу, принципиально оцениваемое негативно. В связи с этим при оценке потенциальной опасности следует дифференцировать опасность для персонала и для населения. В табл. 3.2, составленной на основании работы [45], приводятся, например, весьма поучительные сравнительные данные по принимаемому и непринимаемому добровольному риску.

По данным [35], в среднем мировая практика использует следующую классификацию рисков:

недопустимый риск — значение более 10^{-4};

жесткий контроль риска — при значениях от 10^{-4} до 10^{-5};

приемлемый риск — значение менее 10^{-5}.

В некоторых странах границы допустимого риска установлены законодательно. Так, например, в Нидерландах принято, что максимально приемлемый риск соответствует вероятности гибели человека в течение одного года на уровне 10^{-6}, а риск порядка 10^{-8} считается пренебрежимо малым. Между этими границами допускается «поиск компромисса между социальными выгодами и финансовыми убытками» [35]. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) *[61]* используют такие понятия риска, как: «пренебрежимо малый риск», «принятый риск» и «верхняя граница индивидуального риска». При этом годовая величины рисков при оценке облучения принимаются равной: для пренебрежимо малого риска — $1 \cdot 10^{-6}$; для приемлемого риска — $1 \cdot 10^{-4}$ (персонал) и $1 \cdot 10^{-5}$ (население); для риска индивидуального облучения — $1 \cdot 10^{-4}$ (персонал) и $5 \cdot 10^{-5}$ (население).

Таблица 3.2

Риск смертельного исхода в расчете на одного человека в год			
принимаемый добровольно		с которым мирятся	
Действие	Риск ($\times 10^{-5}$)	Действие	Риск ($\times 10^{-7}$)
Курение (20 сигарет в день)	500	Наезд транспорта на пешехода	500
Алкоголь (1 бут. вина в день)	75	Наводнение	22
Игра в футбол	4	Землетрясение	17
Автогонки	120	Торнадо	22
Скалолазание	4	Бури	8
Вождение автомобиля	17	Молнии	1
Вождение мотоцикла	200	Авиакатастрофы	1
Противозачаточные таблетки	2	Радиоактивный выброс АЭС	1
Употребление арахисового масла	4	Прорыв дамб	1
Рентгеновская диагностика	1	Ядовитые укусы	1
Нахождение в одной комнате с курильщиком	1	Перевозка нефти	0,2
		Падение метеорита	0,0006
		Заболевание гриппом	2000

Второе соображение связано с оценкой числа людей, одновременно подвергающихся риску. Нетрудно проследить, например, по реакции прессы, что одновременная гибель определенного числа людей в авиационной или морской катастрофе оценивается более остро, чем гибель такого же числа пассажиров, наступившая в результате нескольких автомобильных катастроф, которые произошли в течение одной недели в различных местах. При этом можно также наблюдать, что большие катастрофы воспринимаются уже почти одинаково при гибели ста человек или пятисот (эффект насыщения). Ряд исследований подтвердил, что функциональная зависимость между величиной риска и ожидаемой «выгодой» выражается нелинейной зависимостью [103], как это показано на рис.3.8.

Построенная на этом рисунке кривая делит координатную плоскость на две части. Справа от кривой расположены значения, которые могут быть при известных условиях приняты, слева располагаются неприемлемые точки.

Таким образом, можно отметить два эффекта, наличие которых игнорируется в большинстве исследований по оценке риска:

- явное отклонение от принципа равнообеспеченности рисков объектов одинаковой ответственности, но различной тиражности;

- наличие нелинейной зависимости между остротой реакции общества и масштабом аварии.

В последующих разделах эти явления будут подвергнуты более детальному анализу.



Рис.3.8. Нелинейный характер реакции на риск

Возвращаясь к проблеме сопоставления рисков, следует отметить еще одну сторону такого сопоставления. Дело в том, что в принципе нельзя избежать некоторой доли субъективности при выборе технических решений тем или иным лицом (например, проектировщиком системы). И здесь, по-видимому, равнение на безопасность, существующую в повседневной жизни и деятельности, является одной из возможных форм снижения уровня этой субъективности.

3.6 О принципе сбалансированного риска

Принцип сбалансированного риска заключается в том, что ограниченные средства, предназначенные на обеспечение надежности и безопасности объекта, распределяются оптимальным образом (экономически сбалансированного) между различными вариантами защитных мероприятий с учетом ожидаемого ущерба от каждого из возможных типов отказов. В зарубежной литературе считается, что принцип сбалансированного риска был сформулирован в явном

виде в 1972 году в работе [158]. В действительности он был обоснован на десять лет раньше в серии работ Б. И. Снарскиса [106], где этот принцип (без его современного названия) был распространен на любые объекты, включая и те, где возможен и неэкономический ущерб от отказа.

В частности, в этих работах было предложено использовать некоторые масштабные коэффициенты D, умножением на которые осуществляется переход к шкале экономического измерения неэкономического ущерба. Эти коэффициенты представляют собой **денежную оценку возможностей общества** по защите здоровья и жизни человека или каких-либо других уникальных ценностей (культурных, исторических, природных и т.п.). Поскольку общество в целом имеет ограниченные ресурсы, заставляющие принимать решения с конечными измеримыми затратами даже в случае высокой неэкономической ответственности объекта, и поскольку меры защиты различных объектов, независимо от вида их ответственности, в конце концов реализуются на основе физически одинаковых (следовательно, одинаково оцениваемых) ресурсов, то упомянутые переходные коэффициенты объективно существуют. И это не зависит от спекулятивных утверждений о «бесконечной ценности человеческой жизни», «невозможности все оценить и взвесить» и т.п.

К сожалению, пионерные результаты Б. И. Снарскиса были сформулированы в столь отвлеченной и абстрактной форме, что абсолютно правильные и глубокие соображения автора не вошли тогда в инженерную практику. Лишь сейчас начинает преодолеваться барьер общественного неприятия монетарной оценки неэкономических факторов риска. В частности, в нормах радиационной безопасности Украины НРБУ-97 *[62]* денежный эквивалент риска рекомендуется рассчитывать с учётом величины валового национального дохода на одного жителя (экономическая компонента) и компенсации на психологическое восприятие риска; при этом экономическая компонента составляет 5÷10% от психологической.

Будем предполагать, что в нашем распоряжении имеется фиксированная сумма C, причем ее можно распределить между несколькими способами действий

$$C = \sum_{j=1}^{m} a_j . \qquad (3.3)$$

Кроме того считаем, что отказы системы реализуются в виде *n* различных форм.

Если выбрано распределение затрат a_j, то можно постараться минимизировать суммарный ущерб

$$F = \sum_{i=1}^{n} c_i(a_1,...,a_m)p_i(a_1,...,a_m), \qquad (3.4)$$

где $c_i(a_1, \ldots, a_m)$ — денежная оценка ущерба, связанного с i-й формой отказа (возможно, переведенная в экономическую форму с использованием коэффициента перехода D_i); $p_i(a_1, \ldots, a_m)$ — вероятность возникновения i-й формы отказа.

Если минимизировать (3.4) при условии (3.3), то необходимо использовать функцию Лагранжа

$$G = \sum_{i=1}^{n} c_i p_i - \lambda \left[\sum_{j=1}^{m} a_j - C \right], \tag{3.5}$$

а условия минимума (3.5) выражаются как

$$\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial c_i}{\partial a_j} \right) p_i + \sum_{i=1}^{n} c_i \left(\frac{\partial p_i}{\partial a_i} \right) - \lambda = 0. \tag{3.6}$$

Для вероятности отказа по i-й форме (модальной вероятности) будет применено выражение

$$p_i(a_1,...,a_m) = p_i^0 \left[1 - \sum_{j=1}^{m} r_{ij} \left[1 - \exp\left(-a_j / u_{ij} \right) \right] \right], \tag{3.7}$$

где возрастание надежности при увеличении доли средств, отпускаемых на обеспечение безопасности (см., например [58], стр.302]) описывается экспоненциальной функцией. Здесь константа p_i^0 соответствует некоторому «базовому» значению вероятности отказа конструкции по i-й форме; r_{ij} — предельное значение этой вероятности при максимально возможной защите; u_{ij} — характеристика скорости изменения вероятности отказа i-й форме при увеличении затрат на обеспечение надежности по j-й форме. Коэффициенты u_{ij} могут принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от того, приводят ли усилия по уменьшению i-й вероятности к уменьшению или увеличению j-й вероятности. Примером такого конфликта усилий может служить случай, когда увеличение жесткости антенного сооружения, направленное на уменьшение вероятности прекращения связи на радиорелейной линии от ветровых воздействий, приводит к заметному возрастанию сейсмической нагрузки, что увеличивает вероятность прекращения той же связи из-за возможных повреждений при землетрясении.

Естественно, что должны выполняться условия, вытекающие из самого понятия вероятности

$$0 \le r_{ij} \le 1, \tag{3.8}$$

$$\sum_{j=1}^{m} r_{ij} \left[1 - \exp\left(-a_j / u_{ij} \right) \right] \le 1. \tag{3.9}$$

Для модального ущерба принимается выражение с обратной степенной зависимостью от увеличения доли средств, отпускаемых на обеспечение безопасности [132]

$$c_i(a_1,...,a_m) = c_i^0 \left[1 - \sum_{j=1}^{m} s_{ij} \left[1 - \left(1 + a_j / v_{ij} \right)^{-q_{ij}} \right] \right], \tag{3.10}$$

и при этом, естественно, должны выполняться условия

$$0 \le s_{ij} \le 1; \tag{3.11}$$

$$\sum_{j=1}^{m} s_{ij}\left[1-\left(1+a_j/v_{ij}\right)^{-q_{ij}}\right] \le 1. \tag{3.12}$$

В выражении (3.10) через c_i^0 обозначен ущерб при начальном уровне обеспечения надежности; s_{ij} — предельное значение этого ущерба при максимально возможной защите; v_{ij} — характеристика скорости изменения ущерба при отказе по i-й форме при увеличении затрат на обеспечение надежности по j-й форме; q_{ij} — показатель степени, характеризующий эффективность расходования средств на защиту.

Из условий (3.7) и (3.10) легко получить значения производных

$$\frac{\partial p_i}{\partial a_j} = -\frac{p_i^0 r_{ij}}{u_{ij}} \exp\left(-a_i/u_{ij}\right), \tag{3.13}$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial a_j} = -\frac{c_i^0 s_{ij} q_{ij}}{v_{ij}}\left(1+\frac{a_{ij}}{v_{ij}}\right)^{-(q_{ij}+1)}. \tag{3.14}$$

Разрешающие уравнения получаются после подстановки в (3.5) и (3.6) выражений (3.7), (3.10), (3.13) и (3.14). Решая их, можно получить рекомендуемые вклады a_j, с помощью которых определяются затраты, соответствующие сбалансированному риску.

Полученные уравнения являются нелинейными и могут быть линеаризованы с использованием первых членов разложения в ряд Тейлора в окрестности некоторого начального приближения a_j^0.

Пусть F_{ij}^0 является значением целевой функции в точке линеаризации a_j^0, а f_{ij}^0 — значение ее производной в этой же точке. Тогда (3.5) аппроксимируется в форме

$$\sum_{i=1}^{\cdot}\left(A_{ij}+B_{ij}a_j\right)=\lambda \quad (j=1,\ldots,m), \tag{3.15}$$

где

$$A_{ij}=F_{ij}^0-a_j^0 f_{ij}^0; \quad B_{ij}=f_{ij}^0. \tag{3.16}$$

Значения F_{ij}^0 и f_{ij}^0 определяются выражениями:

$$F_{ij}^0=\alpha_{ij}\beta_{ij}+\gamma_{ij}\delta_{ij}; \quad f_{ij}^0=-\left(1-q_{ij}\right)\frac{\alpha_{ij}}{v_{ij}}\left(1+\frac{a_j^0}{v_{ij}}\right)^{-1}\beta_{ij}-\gamma_{ij}\frac{\delta_{ij}}{u_{ij}}+2\alpha_{ij}\delta_{ij}, \tag{3.17}$$

а прочие величины равны:

$$\alpha_{ij} = \frac{-c_i^0 s_{ij} q_{ij}}{v_{ij}} \left(1 + \frac{a_j^0}{v_{ij}}\right)^{-(q_{ij})+1}; \tag{3.18}$$

$$\beta_{ij} = p_i^0 \left[1 - \sum_{j=q}^{m} r_{ij} \left(1 - \exp\left(-a_j^0 / u_{ij}\right)\right)\right]; \tag{3.19}$$

$$\gamma_{ij} = c_i^0 \left[1 - \sum_{j=1}^{m} s_{ij} \left[1 - \left(1 + a_j^0 / v_{ij}\right)^{-q_{ij}}\right]\right]; \tag{3.20}$$

$$\delta_{ij} = \frac{-p_i^0 r_{ij}}{u_{ij}} \exp\left(-a_j^0 / u_{ij}\right) \tag{3.21}$$

Из уравнения (3.15) определяется решение

$$a_j = \frac{\lambda - \sum_{i=1}^{n} A_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} B_{ij}}, \tag{3.22}$$

в котором

$$\lambda = \frac{C + \sum_{j=1}^{m} \left[\sum_{i=1}^{n} A_{ij} / \sum_{i=1}^{n} B_{ij}\right]}{\sum_{j=1}^{m} \left[1 / \sum_{i=1}^{n} B_{ij}\right]}. \tag{3.23}$$

Это решение затем можно уточнять в итерационном цикле, линеаризуя разрешающие уравнения в окрестности найденных значений модальных затрат.

Часто можно пренебречь влиянием роста модальных затрат на модальные стоимости, считая, что меняются только вероятности отказа. Тогда величины c_i становятся константами, и мы будем иметь $\alpha_{ij} = 0$ и $\gamma_{ij} = c_i$, что упрощает все формулы.

В качестве примера рассмотрим случай распределения средств на устройство защиты мостовой конструкции от следующих опасностей [18]:

повреждение вследствие недостаточной прочности конструкции — в качестве защитного мероприятия предусматривается увеличение некоторых сечений элементов несущей системы;

повреждения от коррозионного износа —предусматривается применение более надежной антикоррозионной защиты;

повреждение от усталости вследствие колебаний, вызванных аэродинамической неустойчивостью — в качестве защитного мероприятия предусматривается установка гасителей колебаний.

Значения модальных вероятностей и соответствующие затраты (в некоторых условных единицах на погонный метр мостового перехода) представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Мода	p_i^0	s_i^0	a_j^0
i = 1	0,00095	1500	30
i = 2	0,00010	400	20
i = 3	0,01000	100	1

Матрицы предельных значений вероятности возникновения опасности и скоростей изменения этих вероятностей имеют вид:

$r_{ij} =$

0,5	0,2	0
0	0	1,0
0,7	0,1	0

$u_{ij} =$

30	20	0
0	0	1
20	80	0

Если считать, что можно пренебречь влиянием роста модальных затрат на модальные стоимости, и исходить из первоначального распределения затрат в виде $a_1^0 = 30$ у.е./м, $a_2^0 = 20$ у.е./м, $a_3^0 = 1$ у.е./м, то в результате вычислений для различных вариантов значения общих затрат получаем значения модальных затрат, приведенные в табл. 3.4 и на рис.3.9.

Таблица 3.4

C, у.е./м^2	a_1, %	a_2, %	a_3, %	Суммарный ущерб по формуле (2)
20	124,2	-28,6	3,4	1,644
30	100,9	-3,9	3,0	1,461
40	88,7	8,5	2,7	1,314
50	81,4	16,0	2,6	1,195
60	76,5	21,0	2,5	1,098

Отрицательные значения модальных затрат (а также превышение уровня 100% для модальных вкладов a_i), которые получены для значений $C \le 35$ у.е./м, говорят о том, что предварительно заданные величины a_i^0 для этих случаев были завышенными.

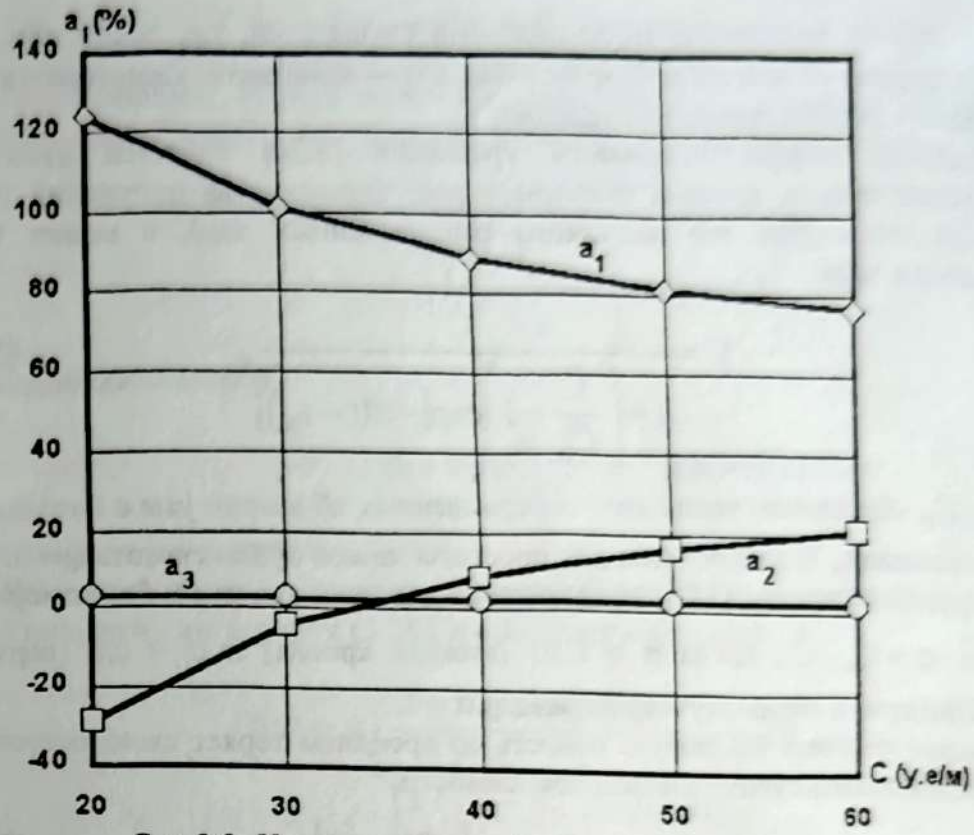


Рис.3.9. Изменение распределения удельных затрат

3.7 Модель формирования общественного мнения

Выше уже отмечалась роль психологических факторов и общественного мнения в принятии решений о необходимом уровне надежности. Интересно проследить за некоторыми аспектами формирования этого мнения.

Будем предполагать, что передача информации о происшедшей аварии от лиц, осведомленных о таком событии, к неосведомленным происходит примерно с постоянной интенсивностью для любого человека. При этом чем больше человек принадлежит к числу осведомленных, тем большему числу лиц он может передать сведения об аварии. Однако с течением времени распространение сведений начинает замедляться за счет того, что иссякает круг неосведомленных лиц. Таким образом, скорость прироста числа осведомленных лиц C может быть представлена, как

$$\frac{dC}{dt} = \alpha C\left(1 - \frac{C}{\hat{C}}\right), \qquad (3.24)$$

где $\hat{C}$ — общее количество потенциальных слушателей, т.е. число лиц, для которых сведения об аварии небезразличны, а α — константа, характеризующая интенсивность распространения сведений.

Решением дифференциального уравнения (3.24) является известная логистическая кривая, которая описывает рост большинства популяций [6, с. 691] (в данном случае это популяция осведомленных лиц), и может быть представлена в виде

$$C = \frac{\hat{C}}{1 + \left(\frac{\hat{C}}{C_0} - 1\right)\exp[-\alpha(t - t_0)]}, \qquad (3.25)$$

где через C_0 обозначено число лиц, осведомленных об аварии уже с начального момента времени t_0. В дальнейшем для простоты записи будем считать $t_0 = 0$.

На рис. 3.10 кривая (3.25) представлена для двух значений безразмерного параметра $\sigma = C_0 / \hat{C}$, когда σ = 0,01 (нижняя кривая) и σ = 0,1 (верхняя кривая). При этом в обоих случаях параметр $\alpha = 2$.

Реакция человека на любую новость со временем теряет свою остроту и можно предположить существование зависимости

$$R(\tau) = R_0 \exp[-\beta(\tau - t)] \qquad (3.26)$$

для описания остроты реакции человека на известие об аварии, полученное им в момент времени t. Здесь через β обозначен параметр «скорости успокоения» человека.

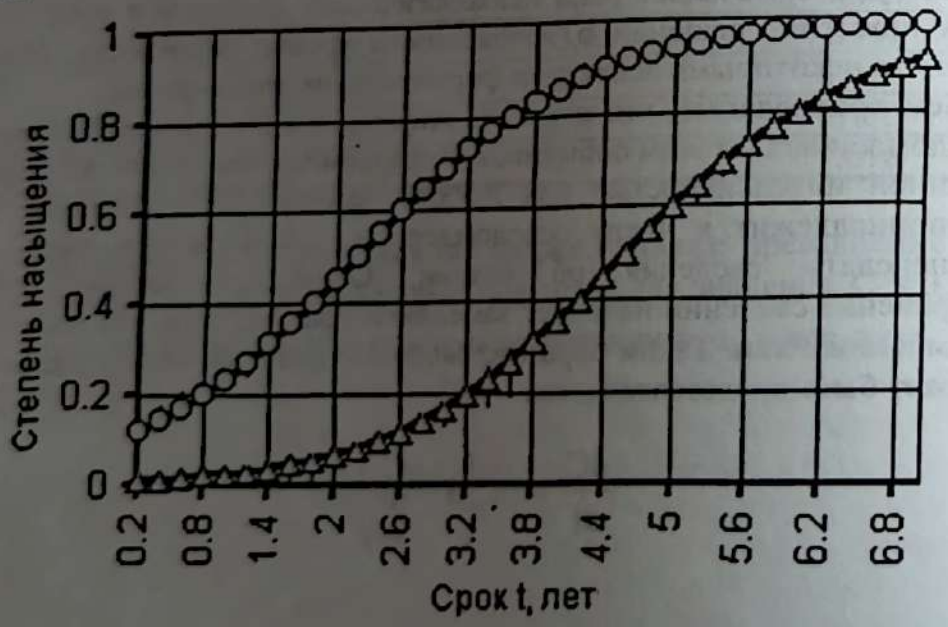


Рис.3.10. Рост популяции осведомленных лиц (кружки — $\sigma = 0,1$, треугольники

$-\sigma = 0{,}01$)

Таким образом, группа людей в количестве dC(t), узнавшая об аварии в момент времени t, к моменту τ будет иметь остроту восприятия события

$$R(\tau)dC = \frac{A\exp(-\beta t)}{\left[1+\left(\frac{\hat{C}}{C_0}-1\right)\exp(-\alpha t)\right]^2}, \qquad (3.27)$$

где введено обозначение

$$A = \alpha R_0 \hat{C}\left(\frac{\hat{C}}{C_0}-1\right)\exp(-\beta\tau) \qquad (3.28)$$

для множителя, не зависящего от t.

Выражение для суммарной реакции общества U на момент времени τ можно получить, интегрируя (3.28), и оно будет иметь вид

$$U(\tau) = A\int_0^{\tau}\frac{\exp(-\beta t)}{\left[1+\left(\frac{\hat{C}}{C_0}-1\right)\exp(-\alpha t)\right]^2}dt. \qquad (3.29)$$

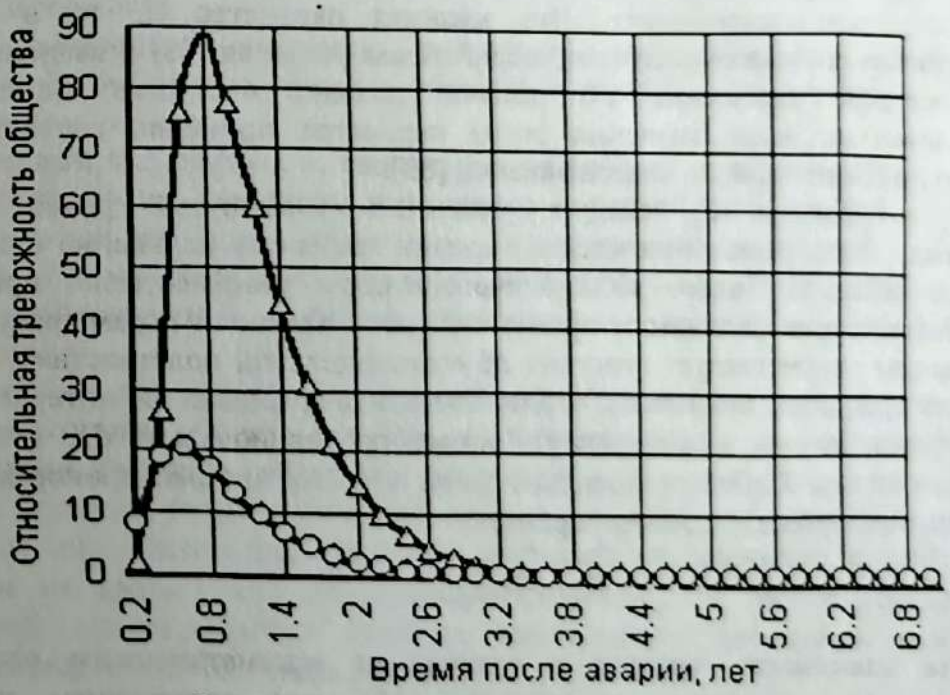


Рис.3.11. Изменение уровня тревожности (кружки — $\sigma = 0{,}01$, треугольники — $\sigma = 0{,}1$)

На рис.3.11 показаны характерные кривые относительной величины $U(\tau)/\hat{C}R_0$, вычисленные при $\beta/\alpha = 0{,}5$ и тех же значениях безразмерного параметра $\sigma = C_0/\hat{C}$, что и на рис.3.10. Видно, как первоначальное нарастание относительной тревожности сменяется ее падением вследствие потери остроты восприятия.

Очевидно, что в условиях рассмотренного примера при аварийных событиях, происходящих реже, чем один раз в пять лет практически отсутствует эффект суммирования тревожности. Если же средний период между авариями окажется равным одному году, то такое суммирование неблагоприятных впечатлений будет иметь место.

Будет разумным, если предположить, что некоторые из параметров построенной выше математической модели окажутся связанными с масштабом аварии (величиной возникающих материальных потерь, количеством пострадавших или каким-либо другим измерителем). Рассмотрим, какого рода зависимости здесь могут оказаться уместными.

Очевидно, что чем больше масштаб аварии M, тем большее число лиц оповещается о ней и, следовательно, можно предполагать существование зависимости типа

$$\sigma = c_0 M. \qquad (3.30)$$

Линейная связь между σ и M предлагается как простейшая и, вообще говоря, будет справедлива в некоторых пределах изменения параметров и при более сложных зависимостях. Что касается параметра c_0, то в первом приближении его можно получить, обрабатывая указания [83] и вычисляя круг лиц, которым сообщение об аварии должно поступать немедленно. Использованные выше значения этого параметра примерно соответствуют авариям I и II категорий по классификации [83].

Для параметра R_0 следует учитывать упомянутый ранее эффект насыщения, когда реакция на масштаб аварии возрастает нелинейно и затухает по мере роста M. Такого рода психологическая реакция давно привлекла внимание в теории полезности применительно к азартным играм (разумеется, что в нашем случае следует говорить об «отрицательной полезности»). Даниил Бернулли предложил принимать, что полезность приращения dX интереса X (он рассматривал интерес к выигрышу) прямо пропорциональна dX и обратно пропорциональна X. Это равносильно тому, что сам интерес пропорционален логарифму выигрыша, т.е. можно принять

$$R_0 = \ln(r_0 M). \qquad (3.31)$$

Эта зависимость, которая в отличие от математического ожидания является «психологическим ожиданием» [21], при подходящем подборе параметра r_0 позволяет учесть наблюдаемые особенности поведения людей при получении известия об аварии.

3.8 Объективные и субъективные опасности

Каждый объект в процессе своего жизненного цикла может подвергаться риску объективных (природных) и субъективных опасностей.

Возникновение объективных опасностей почти не зависит от человеческой деятельности и их можно лишь предвидеть, чтобы оценить вероятность их появления и по возможности нейтрализовать нежелательные последствия таких опасностей. Смысл слова «почти» в предыдущей фразе связан именно с возможностью предвидения, которая иногда позволяет изменить, например, место расположения объекта (поместить его в районе с другим уровнем сейсмичности, в другом ветровом районе и т.п.) и тем самым повлиять на возможность возникновения объективных опасностей. В этом случае деятельность человека влияет на объективные опасности, но, конечно, не на сам факт их появления в природе.

Все прочностные, геометрические и жесткостные характеристики объекта, а также все воздействия на него представляют собой случайные величины или случайные процессы. Поскольку для большинства из них нет возможности указать на какие-либо ограничения (за исключением самых грубых оценок), то гарантировать стопроцентную уверенность непоявления нежелательных значений этих параметров практически невозможно. Кроме того, даже если бы это было возможно, то экономически нецелесообразно выдвигать столь жесткие требования. Таким образом, для любого объекта из числа возможных опасностей исключается только некоторая (и немалая) часть, а другая принимается в виде допустимого риска.

Субъективные опасности возникают как следствие человеческой деятельности и связаны, главным образом, с ошибками людей при создании и єксплуатации объекта.

Первый вид ошибок возникает при разработке нормативных документов, регламентирующих все этапы жизненного цикла объекта (см. рис. 3.2.). Как правило, они являются следствием недостаточной изученности реальных явлений, хотя можно привести примеры небрежного или нечеткого изложения, а также неоправданного переноса нормативных указаний в новые области деятельности.

Второй вид ошибок возникает при реализации любого из этапов жизненного цикла объекта, начиная от проектирования и кончая эксплуатацией. Эти ошибки являются следствием небрежности или некомпетентности, причем обе эти причины встречаются достаточно часто и трудно отдать предпочтение одной из них. Интересные данные о статистике человеческих ошибок и их влиянии на аварийность приведены в [146]. В этой работе показано, что причиной отказа обычно является совокупность нескольких ошибок и предлагается критерий отказа в форме

$$m + n > 3, \tag{3.32}$$

где m — число человеческих ошибок, а n — количество неучтенных отклонений в характеристиках конструкции (недостаточная прочность) и окружающей среды

(нагрузки и воздействия). Там же приведены грубые оценки вероятности появления грубых человеческих ошибок:

- архитектора (А) — 0,1;
- инженера-проектировщика (И) — 0,4;
- производителя работ (П) — 0,5;
- контролера (К) — 0,1.

Поскольку ошибки не имеют никаких практических последствий, если не допущена ошибка контроля, то реально следует оперировать значениями (А)(К) = 0,01; (И)(К) = 0,04 и (П)(К) = 0,05 (вероятностью одновременного появления трех и более человеческих ошибок можно пренебречь). Учитывая (3.10) и исходя из гипотезы о независимости ошибок, можно получить общую оценку вероятности аварии вследствие человеческих ошибок в диапазоне 10^{-3} … 10^{-9}. В действительности ошибки, допускаемые исполнителями на разных этапах, не являются полностью независимыми и имеются многочисленные факты, указывающие на связь ошибок проектировщика с ошибками производителя работ [4], но учесть этот факт достаточно трудно.

Одной из наиболее опасных ошибок инженера-проектировщика является неправильный выбор расчетной схемы сооружения.

3.9 Нечеткие отказы и их анализ

В научной и нормативной литературе по надежности строительных конструкций до сих пор превалирует анализ, связанный с предельными состояниями 1-й группы, а предельные состояния 2-й группы обойдена вниманием. Это объясняется тем, что отказы такого рода не сопряжены с опасностью аварий, хотя даже такое убедительное объяснение не может заменить самого анализа ситуации.

Затруднение нормальной эксплуатации (напоминаем: именно так характеризуются предельные состояния 2-й группы) очень редко наступает сразу же после преодоления некоторого порога. Чаще всего граница, определяющая переход к такому состоянию, размыта и соответствующие отказы называются нечеткими. Кроме того важно различать обратимые и необратимые запредельные состояния 2-й группы, что характерно именно для нее, поскольку для предельных состояний 1-й группы обратимость является редким исключением.

Если затруднения в нормальной эксплуатации полностью исчезают при благоприятном изменении условий (например, затруднения, связанные с недопустимыми перемещениями в упругой стадии работы, исчезающими при уменьшении нагрузки) и никакие негативные последствия не сохраняются, то становятся важными такие характеристики, как средний интервал между отказами или продолжительность непрерывного пребывания в запредельном состоянии, т.е. характеристики относительной длительности отказового состояния. Однако бывают случаи, когда отказ рассматриваемого типа связан с возможностью накопления ущерба, т.е. его нельзя рассматривать как полностью

обратимый, и мы имеем случай системы с нормируемым уровнем накопленного ущерба. Типичным примером может служить проявление перемещений от ползучести материала. Различие подходов в оценке отказов с полностью обратимым и накапливаемым ущербом мало отражено в действующих нормативных документах, хотя представляется, что оно является принципиальным и должно учитываться.

И с методологической и с практической точек зрения проект нормативного документа [59] считает необходимым различать два возможных случая проявления ущерба во времени:

- мгновенное образование ущерба при первом же возникновении отказового состояния;
- постепенное накопление ущерба, связанное с общей продолжительностью (в единицах календарного времени или в наработке) пребывания в отказовом состоянии.

Вполне возможно, что для каждого из этих случаев необходимо предусматривать различные уровни допустимого риска и, следовательно, проверки при различных значениях нагрузок. Так, в проекте норм [104] предусмотрено:

«Нагрузки для проверки предельных состояний 2-й группы устанавливаются в зависимости от характера проверки рассматриваемой конструкции:

если выход за предельное состояние 2-й группы может быть допущен один раз в T_e лет, то используются эксплуатационные расчетные значения G_{de} постоянных основных воздействий, а также предельные расчетные значения $Q_{dm}(T_e)$ переменных и импульсных основных воздействий, соответствующие периоду повторяемости T_e;

если в процессе эксплуатации конструкции выход за предельное состояние 2-й группы может быть допущен на протяжении определенной доли установленного срока службы конструкции μ, то для расчета используются эксплуатационные расчетные значения G_{de} постоянных основных воздействий, а также эксплуатационные расчетные значения $Q_{de}(\mu)$ переменных основных воздействий, соответствующие этой доле μ.»

Необходимо остановиться еще на одной характеристике рассматриваемой группы отказов — чаще всего вероятный ущерб связан не только с продолжительностью пребывания в отказовом состоянии, но и с «глубиной» проникновения в запредельную область, поскольку в ситуациях с нечетким отказом контролируемые пределы являются условными и имеется монотонная зависимость ущерба от степени нарушения запрета.

Для рассмотрения этого свойства в работе М. Холицкого и Л. Остлунда [138] предложена модель нечеткого отказа по схеме рис. 3.12,а, на котором показана функция, отображающая степень удовлетворения требованию эксплуатационного качества V_s. Предполагается, что фактическая величина качественного показателя есть случайная величина со средним $V_r = 1 - V_s$, что схематически показано на рис. 3.12,б.

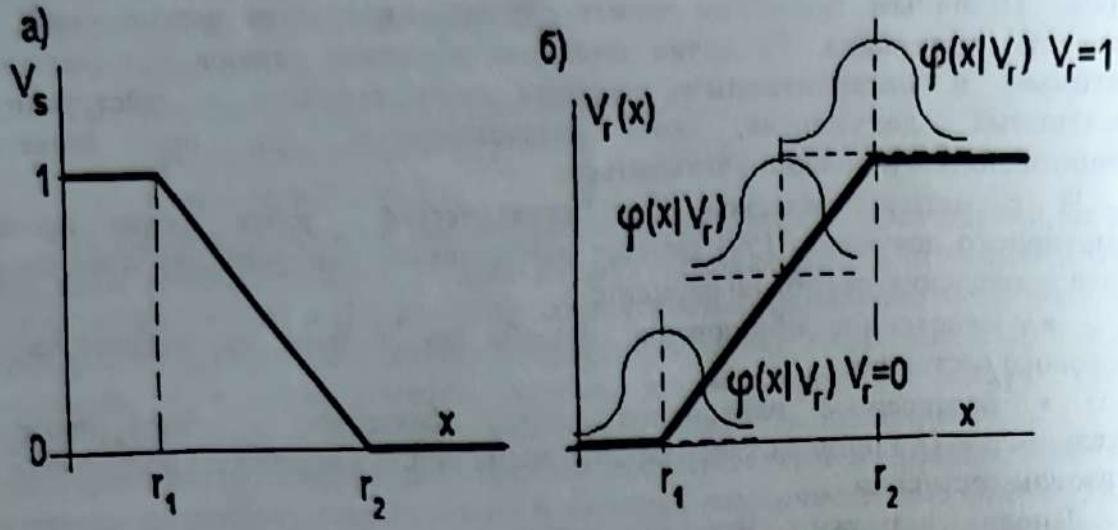


Рис.3.12. К оценке ущерба нечеткого отказа

Вводится показатель потери качества

$$D_r(x) = (1/N)\int_0^1 V_r\left(\int_0^x \varphi(z|V_r)dz\right)dV_r, \qquad (3.33)$$

где N — нормирующий множитель, с помощью которого функционал D_r отображается на интервал $\langle 0,1 \rangle$. На рис. 3.13 показан график функции $D_r(x)$ при условии нормального распределения с различными значениями безразмерного стандарта σ_R.

Для практического использования функции потери качества D_r необходимо провести достаточно представительное сопоставление ее вычисленных значений с рядом известных решений зданий и сооружений, которые, по мнению специалистов, являются достаточно комфортабельными и удобными. Это позволило бы выровнять ныне используемую шкалу (например, для допускаемых прогибов) со шкалой значений функции D_r. Такое сопоставление было сделано в упомянутой выше работе М. Холицкого и Л. Остлунда [138], где в качестве примера рассматривались прогибы междуэтажных перекрытий. По нормам различных стран допустимые прогибы находятся в диапазоне 0,003L (L/300) ... 0,017L. (L/60). При $\sigma_R = 0{,}3r_1$, $r_1 = 0{,}002L$ и $r_2 = 0{,}016L$ для характеристического значения $r_k = L/200$ получено D = 0,05, а для $r_k = L/333$ — D = 0,001.

Проблема выработки нормативов для предельных состояний 2-й группы, связанных с оценкой комфортабельности, имеет еще одну сторону — зачастую требуется иметь некоторую обобщающую характеристику объекта взамен точечной оценки. Такая постановка задачи правомерна именно в силу нечеткости рассматриваемых отказов. Поскольку здесь переход через граничное значение и реализация «недопустимой» ситуации (равно как и представление о «допустимых» ситуациях) во многом являются условными, то всякого рода

осреднения, с которыми неизбежно связывается выработка обобщающих характеристик, оказывается возможным. Это вряд ли возможно применительно к предельным состояниям 1-й группы, где осреднение аварийных конструктивных элементов и элементов, надежно выполняющих свои функции, ведет к ситуации известной шутки о средней температуре в больнице. А утверждение о среднем уровне потери комфортабельности для здания в целом или его значительной части не вызывает протеста, хотя и точечная оценка каждого конструктивного элемента имеет свой смысл.

Ниже на примере оценки высокого здания по уровню комфортабельности при ветровой вибрации*) иллюстрируется положение о создании упомянутых обобщающих характеристик [150].

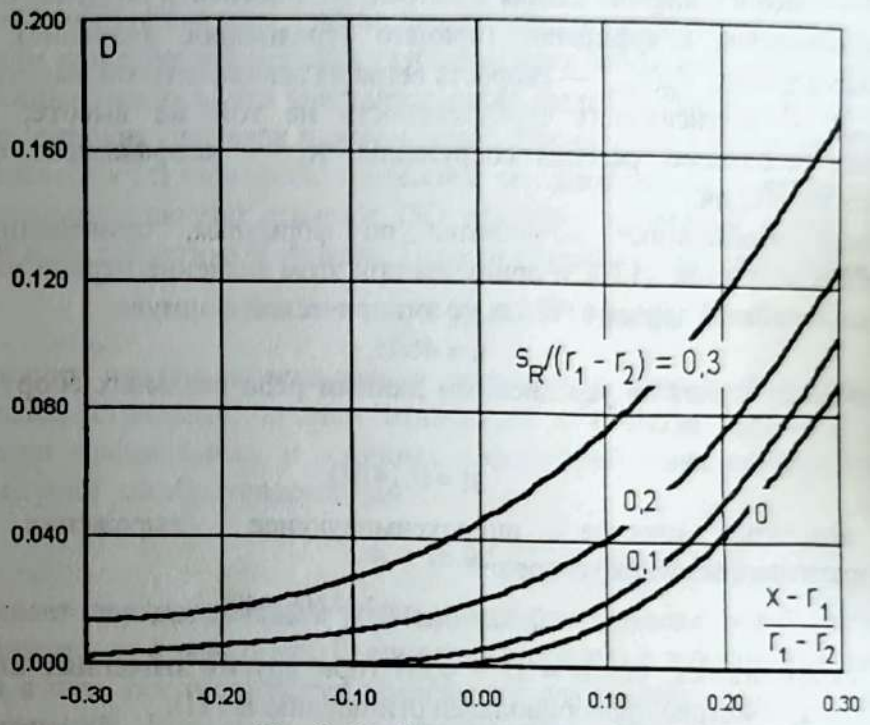


Рис.3.13. Функция потери качества

Ограничения на уровень виброускорений, регламентируемые стандартом [140], отнесены к достаточно редким событиям. Они связаны с действием расчетного шторма с вероятностью появления один раз в пять лет и относятся к 10-минутному интервалу, во время которого могут возникнуть предельные виброускорения. Вместе с тем не исключаются замечаемые людьми действия ветровых вибраций уровня, меньшего чем предельный. Если такие явления возникают достаточно часто, то персонал также может ощущать чувство

*) Для простоты рассматриваются только колебания в одной плоскости, хотя в общем случае требуется рассмотрение колебаний в двух плоскостях изгиба одновременно с кручением здания (так называемый «танец кобры»)

дискомфорта (настороженность, тревогу), хотя укачивание в полном смысле этого слова, возможно, и не будет наблюдаться. По-видимому, с явлениями такого рода были связаны описанные в [42] жалобы больных и медперсонала (происхождение вибраций в этом случае было вызвано не действием ветра, а практически постоянно действующей промышленной сейсмикой).

Основным параметром вибрации, по которому можно судить о комфортабельности здания, является виброускорение. Среднеквадратичное значение ускорения в точке, расположенной на высоте z, нормы [133] рекомендуют определять по формуле

$$\sigma_x(z) = (z/H)^2 [\rho B C_f V_m^2(z_{equ}) / \mu] I_v(z_{equ}) R_x K_x, \qquad (3.34)$$

где H и B — высота и ширина здания в метрах; ρ - плотность воздуха; $C_f = 1,3$ — аэродинамический коэффициент (принято усредненное значение); μ — погонная масса здания; $V_m(z_{equ})$ — скорость ветра на эквивалентной высоте $z_{equ} = 0,6H$; $I_v(z_{equ})$ — интенсивность турбулентности на той же высоте; R_x — безразмерная резонансная реакция сооружения; K_x — коэффициент формы собственных колебаний.

Проводя необходимые вычисления по формулам, приведенным в приложении В документа [133], и принимая при этом значение первой частоты собственных колебаний здания в герцах по эмпирической формуле

$$n = 46/H, \qquad (3.35)$$

а погонную массу здания по усредненным данным ряда реальных сооружений [145], как

$$\mu = 0,14BD, \qquad (3.36)$$

можно получить простое аппроксимирующее выражение для среднеквадратичного значения ускорений

$$\sigma_x(z) = 0,00596(z/H)^2 V^{2,249} H^{0,166}, \qquad (3.37)$$

при этом предполагалось, что $B = D = 0,2H$ (при других значениях ширины здания результат примерно пропорционален отношению B / H).

Следуя работе [151], ветер рассматривался как случайный процесс с эффективной частотой ω_{ef}, а ветровое давление как распределенное по закону Вейбулла с плотностью

$$p_q(q) = \beta \Gamma(1 + 1/\beta)^\beta \upsilon_q (q/q_o)^{\beta-1} \exp\{-[(q/q_o)\Gamma(1 + 1/\beta)]^\beta\}, \qquad (3.38)$$

где параметр формы β, коэффициент вариации υ_q и среднее значение q_o для трех ветровых районов Украины приведены в табл. 3.5.

Изменчивость величин β и υ_v относительно невелика и можно использовать их средние значения, что для скоростей ветра приводит к

$$p_v(V) = 1,33 (V/V_o)^{-0,808} \exp[-(1,2824(V/V_o)^{1,192}]. \qquad (3.39)$$

Таблица 3.5

Ветровой район	β	q_o, Па	Vo, м/с	υ_q	υ_v	ω_{ef}, 1/с
I	0,5862	8,6	3,75	1,81	1,34	7.61×10^{-5}
II	0,5941	14,6	4,88	1,78	1,33	$5,97\times10^{-5}$
III	0,6078	22,3	6,03	1,73	1,31	$6,27\times10^{-5}$
Средние	0,5960				1,32	

Допустимые величины горизонтальных низкочастотных колебаний определяются, главным образом, стремлением избежать явления укачивания (морская болезнь). Оценка влияния на человека низкочастотной вибрации различной интенсивности проводилась применительно к качке судов, колебаниям конструкций морских глубоководных оснований, а также вибрациям зданий. Обнаружилось, что чувствительность людей к колебаниям изменяется в довольно широких пределах и результаты различных исследователей в большей мере относятся к установлению тенденций, чем дают точные значения допусков.

Основополагающий стандарт ISO различает пороговый эффект действия вибраций и их допустимый уровень. Первый случай с виброускорениями

$$a_1 = 3{,}6\ f^{-0.453} \quad (\text{мм/с}^2) \tag{3.40}$$

соответствует началу возникновения неприятных ощущений и, по мнению составителей стандарта, должен относиться в качестве предела к случаям выполнения специальных и точных работ, требующих особого внимания. Второй случай с виброускорениями

$$a_2 = 26{,}0\ f^{-0.413} \quad (\text{мм/с}^2), \tag{3.41}$$

ограничивает двухпроцентным уровнем возможное число людей, жалующихся на укачивание, при действиях 10-минутного шторма с вероятностью появления один раз в пять лет и считается предельным для обычных зданий по величине виброускорений. При этом, если продолжительность вибраций оказывается меньшей чем десять минут, то допускаются виброускорения повышенного уровня.

В (3.40) и (3.41) f обозначает частоту возбуждения (Гц). Воздействие ветра имеет достаточно широкий спектр возмущающих частот, но здание является хорошим фильтром вибраций и основные частоты вынужденных колебаний сосредоточиваются вокруг собственной частоты, поэтому с достаточной степенью точности можно считать справедливым равенство f = n и, используя (3.35), выразить нормативные ограничения через высоту здания:

$$a_1 = 0{,}6351\ H^{0.453}\ (\text{мм/с}^2)\ ; \quad a_2 = 5{,}3434 H^{0.413}\ (\text{мм/с}^2)\ . \tag{3.42}$$

Если приравнять к этим значениям величину виброускорения (3.37), то получим уравнения:

$$0{,}00596(z_1/H)^2V^{2.249}H^{0.166} = 0{,}6351\ H^{0.453}\ ; \qquad (3.43)$$

$$0{,}00596(z_2/H)^2V^{2.249}H^{0.166} = 5{,}3434H^{0.413}\ , \qquad (3.44)$$

из которых можно найти высоту той части здания z, начиная с которой при действии ветра со скоростью V начинают нарушаться требования стандарта:

$$z_1 = 10{,}32277\ V^{-1.1245}H^{1.1435}\ \ (\text{м})\ , \qquad (3.45)$$

$$z_2 = 29{,}94249\ V^{-1.1245}H^{1.1235}\ \ (\text{м})\ . \qquad (3.46)$$

Естественно, что такое нарушение начинается при скоростях ветра не меньших, чем скорость V*, такая, что z*(V*) = H, следовательно, в здании высотой H началу возникновения неприятных ощущений соответствует скорость ветра

$$V_1 = 7{,}9717\ H^{0.1276}\ \ (\text{м/с})\ , \qquad (3.47)$$

а ограничения по комфортабельности наступают при скорости ветра

$$V_2 = 20{,}5513\ H^{0.1098}\ \ (\text{м/с}). \qquad (3.48)$$

Подсчитанные вероятности $P(V_1)$ и $P(V_2)$ превышения таких скоростей таковы, что для многих случаев частота появления ветров со скоростью, большей V_1, превышает 12 раз в год (0,0055), а это было принято в качестве допустимой меры при проектировании здания международного торгового центра в Нью-Йорке [102]. Вероятность нарушения скорости V_2, связанной с ограничением по предельному ускорению, гораздо реже превышает значение, соответствующее одному наблюдению за пять лет, что при шести наблюдениях в сутки составляет $1/(5x365x6) = 9{,}132x10^{-5}$. Необходимо напомнить, что сказанное относится к районам Украины, где скорости ветра относительно невелики по сравнению с другими регионами Европы и мира.

Предложенный в [137] и включенный в стандарт ISO критерий допустимого уровня дискомфортности, предусматривающий ограничение количества возможных жалоб уровнем 2% от числа лиц, находящихся в зоне наиболее интенсивных вибраций при действии шторма, возникающего один раз в пять лет, является в некотором смысле "точечным", поскольку учитывает только зону наиболее интенсивных вибраций (этаж или даже часть этажа) и кроме того не рассматривает время эксплуатации в целом, а ограничивается лишь кратковременными отрезками действия сильных штормов. По сути весь спектр ветров со скоростями между V_1 и V_2 игнорируется, хотя он уже связан с превышением порога чувствительности человека к ветровым вибрациям.

Для построения модели учета ветровых вибраций высоких зданий, возникающих в широком диапазоне скоростей ветра, используется квазиэнергетическая гипотеза типа [91], которая оперирует характеристикой

средней мощности, поглощаемой телом человека во время вибраций и пропорциональной квадрату ускорений.

Величина превышения в некоторой точке здания ощущаемого человеком уровня виброускорения (3.42) характеризует степень дискомфорта в этой точке. С учетом (3.37) превышение определяется выражением

$$\Delta(z,V;H) = 0{,}00596(z/H)^2 V^{2.249} H^{0.166} - 0{,}6351\, H^{0.453}. \qquad (3.49)$$

Для оценки дискомфортности здания в целом введем в рассмотрение усредненную характеристику эквивалентного превышения допустимого уровня виброускорений

$$D_v = (1/H) \int_{V_1}^{V_2} \left(\int_{z_1}^{H} [\Delta(z,V;H)]^2 \; p_v(V)\, dz \right) dV. \qquad (3.50)$$

Мера дискомфортности D_v учитывает, что превышения допустимого уровня $\Delta(z,V;H)$ соответствуют определенной скорости ветра и, следовательно, реализуются с вероятностью $p_v(V)$. Учет этого обстоятельства позволяет просуммировать все ветровые условия. Суммирование именно квадратов превышений связано с отмеченным выше квазиэнергетическим подходом.

Значения D_v, подсчитанные по формуле (3.50), представлены в табл. 3.6.

Для того, чтобы судить о допустимых значениях меры дискомфортности, необходимо вычислить значения этой меры для ряда реальных сооружений, чьи характеристики признаны удовлетворительными (или, наоборот, неудовлетворительными). Например, можно использовать данные об известном комплексе зданий Всемирного торгового центра В Нью-Йорке, где считалось допустимым появление на верхнем этаже ускорений порядка 100 мм/с^2 (1%g) до двенадцати раз в год [136]. Известны положительные отзывы об уровне комфорта, полученные при эксплуатации других высоких зданий, которые дают возможность предварительно указать на допустимую границу значения D = 50. Однако систематическое исследование по установлению нормы еще предстоит выполнить.

Таблица 3.6

Высота здания H, м	Мера дискомфортности D_V для районов со средней скоростью ветра V_o, м/с:		
	6,03	4,88	3,75
60	28,63807	5,30295	0,44046
90	44,56702	7,77236	0,58645
120	60,40603	10,07472	0,70725
150	76,05397	12,23735	0,81037
180	91,47444	14,28097	0,90022
210	106,65588	16,22146	0,97967

240	121,59757	18,07129	1,05073
270	136,30378	19,84047	1,11483
300	150,78118	21,53721	1,17308

3.10 Система коэффициентов безопасности

Используемый в настоящее время вариант методики расчета по предельным состояниям требует выполнения проверок, представляемых в виде неравенства

$$g(F_d, f_d, A_d, C, \gamma_n, \gamma_d, T_{ef}) \geq 0, \qquad (3.51)$$

где g(•) – некоторая функция параметров системы, такая, что g(•) < 0 означает реализацию запредельного состояния.

Расчетные значения нагрузок

$$F_d = \gamma_f F_n, \qquad (3.52)$$

определяются через их нормативные значения с помощью коэффициента надежности по нагрузке γ_f, а расчетные значения характеристик прочности материалов или сопротивления грунтов

$$f_d = f_n/\gamma_m \qquad (3.53)$$

через соответствующие нормативные значения f_n коэффициента надежности по материалу γ_m.

В основное неравенство (3.51) входят также:

A_d — расчетные значения геометрических характеристик;

C — ограничения на контролируемый параметр (например, допустимое предельное раскрытие ширины трещины);

γ_n — коэффициент, учитывающий значимость конструкции и объекта в целом, а также возможные последствия отказа (коэффициент надежности по ответственности);

γ_d — коэффициент надежности модели (коэффициент условий работы), учитывающий неопределенность расчетной схемы и другие аналогичные обстоятельства (например, чувствительность конструкции к локальным повреждениям, начальные неправильности или же повышенную скорость изнашивания). Этим же коэффициентом учитываются все прочие «...факторы, которые не имеют приемлемого аналитического описания» [27].

Неравенство (3.51) описывает принципиальную структуру проверочного условия и должно уточняться для конкретных условий с учетом того, что F_d, f_d и a_d - это, как правило, несколько величин, а каждое из упомянутых условий может представлять не одно, а несколько совместных неравенств (например, F_d может представлять целый перечень одновременно действующих нагрузок, а применительно к проверке железобетонной конструкции символом f_d может быть представлена прочность как бетона, так и арматуры).

Количество и наименование системы коэффициентов надежности γ_f, γ_m, γ_n и γ_d не всегда было таким, как это предусмотрено ныне действующими нормами,

но практически всегда первые два коэффициента связывались (по крайней мере в идеологии) со статистическими свойствами нагрузок и материалов и форма их вхождения в основное неравенство (3.51) оставалась одинаковой и не подвергалась сомнениям.

Вполне определенную роль выполняет и коэффициент надежности по ответственности γ_n, введенный в нормативные документы в 1981 году, хотя при обосновании его использования [64] предлагалось, что этот коэффициент будет определяться произведением двух коэффициентов γ_{n1} и γ_{n2}. При этом первый сомножитель γ_{n1} назывался коэффициентом неэкономической ответственности и учитывал количество людей, безопасность которых определяется надежностью сооружения, а также другие виды социального ущерба, а второй сомножитель γ_{n2} связывался с экономическим ущербом от отказа.

Наибольшей неопределенностью обладает коэффициент условий работы γ_d. Имеется огромное количество предложений по его дифференциации, уточнению или наделению некоторыми дополнительными функциями.

Так, например, в работе [99] предлагалось ввести обобщенный коэффициент условий работы γ_{co}, определяемый по сумме баллов как $\gamma_{co} = 1{,}00$ при сумме 21 и более; $\gamma_{co} = 0{,}95$ при сумме баллов от 17 до 20; $\gamma_{co} = 0{,}90$ при сумме баллов от 13 до 16; $\gamma_{co} = 0{,}85$ при сумме баллов от 9 до 12; $\gamma_{co} = 0{,}8$ при сумме баллов 8. Сами баллы (применительно к стальным конструкциям) определяются в соответствии с рекомендациями табл. 3.7.

В других работах предлагалось значение коэффициента γ_d связывать со скоростью износа [92, с. 172], специфической ролью проверяемого элемента в составе системы и с другими факторами. Все это является попытками решить задачу дифференцированного подхода к надежности весьма разнообразных конструкций в рамках формально одинакового подхода и в какой-то степени устранить основной недостаток действующих нормативных документов — отсутствие гарантий равной надежности объектов одинакового назначения и ответственности, запроектированных из различных материалов и для различных условий применения [93].

Здесь необходимо отметить, что такие попытки иногда основываются на не совсем корректном применении метода расчетных предельных состояний. Достаточно типичным примером может служить предложение о введении в состав частных коэффициентов специального коэффициента надежности противокоррозионной защиты γ_{zn}. При этом понимается, что с помощью такого коэффициента можно учесть ожидаемое изменение геометрических характеристик прокорродированного сечения [29]. Такой подход, по нашему мнению, не соответствует одному из основных постулатов метода расчетных предельных состояний, который понимает частный коэффициент надежности, как способ учета возможного случайного разброса значений и **отклонений от номинала** одного из параметров расчетной модели (нагрузки, свойств материала, условий работы).

Таблица 3.7

Учитываемые факторы	Характеристика	Балл	Учитываемые факторы	Характеристика	Балл
Доминирующее воздействие	Статическое	3	Контроль качества	Сплошной физический	3
	Динамическое	2		Выборочный физический	2
	Атмосферное	1		Визуальный	1
Расчет на прочность и устойчивость	Статический и динамический	3	Перевозка конструкций	Железнодорожным транспортом	3
	Квазистатический	2		Автомобилем	2
	Приближенный	1		Водным транспортом	1
Материалы	С дополнительными гарантиями качества	3	Монтаж	Из готовых секций на болтах	3
	Специальная поставка	2		С укрупнительной сборкой	2
	Со склада	1		Со сваркой на монтаже	1
Изготовление на заводе	Апробированная технология	3	Эксплуатационный контроль	Регулярное наблюдение	3
	Хорошего качества	2		Эпизодическое наблюдение	2
	Осваиваемая технология	1		Наблюдения не ведутся	1

Иными словами, если предлагается учитывать влияние такого фактора, как коррозионные повреждения, то, следуя идеологии метода расчетных предельных состояний, для этого своеобразного воздействия необходимо ввести номинальные значения некоторых параметров интенсивности (например, глубины коррозионного поражения), а уже возможные случайные отклонения от этого номинала учитывать новым коэффициентом надежности γ_{zn}. При этом никто не мешает учитывать зависимость номинального значения глубины коррозионного поражения от материала конструкции или от формы поперечного сечения, подобно тому, как номинальное значение ветровой нагрузки связывается с формой конструкции. Но сам коэффициент надежности по ветровой нагрузке является мерой именно ее изменчивости, а не каких бы то ни было других факторов.

За счет возможности манипулирования значениями предусмотренных нормами расчетных коэффициентов надежности метод предельных состояний обладает определенной гибкостью при установлении нормативных требований к надежности конструкций и это дает принципиальную возможность в определенной мере выровнять надежностные требования к различным конструкциям, однако правила нормирования для конструкций из разных материалов и различного назначения складывались во многом стихийно и в настоящее время такое выравнивание практически отсутствует.

Во многом такое положение связано с тем, что, подведя некую единую базу под процесс нормирования и уже существующие надежностные требования (правда, на момент введения метода заданных неявно), метод предельных состояний не определил правил установления этих надежностных требований.

Таким образом, теоретический прорыв, связанный с введением метода расчета по предельным состояниям, оказался не реализованным практически и это привело к тому, что с целью совершенствования действующего в настоящее время основополагающего стандарта [27] в Украине и в Российской Федерации началась разработка проектов новых нормативных документов [59], [104], которыми предусматривалась и процедура установления надежностных требований.

3.11 О расчетных схемах

Расчет конструкций и оснований должен по возможности наиболее достоверно отражать характер действительного поведения и условия эксплуатации объекта, соответствующие рассматриваемой расчетной ситуации. Расчет должен выполняться на основании расчетной модели, которая может учитывать все факторы, оказывающие существенное влияние на напряженное и деформированное состояние конструкций или оснований. При формировании расчетной модели в случае необходимости следует учитывать нелинейные эффекты (геометрическую и физическую нелинейность элементов и системы в целом, влияние деформаций конструкции на действующие на нее нагрузки и др.).

Требования и рекомендации по выбору расчетных моделей обычно обосновываются специальными исследованиями, результаты этих исследований закрепляются традицией и практикой проектирования, а иногда отражаются в нормах проектирования. Этими же нормами могут быть определены и возможные конструктивные решения, обеспечивающие реализацию принятых расчетных предпосылок.

К сожалению, эти положения не очень часто выполняются на практике — требования норм, как правило, связаны с определенной расчетной схемой, но ее описание в нормативном документе не приводится и создается ложное впечатление универсальности нормативного требования. Если при этом нормативное требование построено на использовании достаточно грубой расчетной модели, то зачастую создается следующая парадоксальная ситуация

— уточнение расчетной модели приводит к менее экономичным решениям, чем те, которые основаны на грубой модели нормативного документа.

По-видимому, правильным выходом из рассматриваемой ситуации является установление некоторых правил обоснования расчетных моделей. Первый шаг в этом направлении сделан Еврокодом [133], где разработано специальное приложение с указаниями по правилам обработки экспериментальных данных при обосновании значений тех или иных параметров, входящих в расчетные зависимости норм.

Если трактовать понятие эксперимента достаточно широко, не исключая численного моделирования, то в некоторых ситуациях может появиться возможность применения результатов расчетов по детализированной расчетной модели. Проектом нормативного документа [104] для обоснования упрощенных расчетных зависимостей и расчетных моделей рекомендовалось обеспечить условия:

$$|\Delta_i| \le \Delta_{lim}, \quad |\Delta_{cp}| \le 0{,}02. \tag{3.54}$$

Здесь обозначено:

$\Delta_i = (y_{ap.i} - y_i)/y_i$ – относительное отклонение значения некоторой величины

$$y_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \ldots, x_{ni}), \tag{3.55}$$

определенной по «точной» расчетной модели или из эксперимента и значения $y_{ap.i}$, определяемого по приближенной расчетной модели в той же точке i пространства параметров задачи;

Δ_{cp} – среднее из всех значений отклонения Δ_i;

Δ_{lim} – предельно допустимое значение одного отдельного отклонения, принимаемое равным 0,1, если отклонение идет в запас надежности, и 0,05 — в противном случае.

Общее число m точек i, для которых проверяются условия применимости приближенной модели (1), должно быть

$$m > 3^{(n-1)} + 3(n^3 + 3), \tag{3.56}$$

где n – число основных параметров x_j расчетной модели (3.55). При этом точки i должны быть достаточно равномерно распределены по рассматриваемой области пространства параметров.

Рассматривая вопросы надежности, следует отметить следующую характерную особенность — все большая детализация схем с переходом к анализу многоэлементных конструкций (например, здания в целом) требует привлечения очень большого числа параметров, с помощью которых такая схема описывается. Если эти параметры являются случайными величинами, вероятностные свойства которых имеют статистическое обоснование, то с увеличением числа таких параметров возрастает степень неопределенности расчетной модели в целом. Так, если некоторый результат расчета линейно зависит от N независимых случайных параметров (например, внешних нагрузок

в узлах системы), то стандарт этого результата пропорционален стандарту входных данных (в этом случае нагрузок) с множителем порядка $(N)^{1/2}$. Нетрудно оценить, какова достоверность результатов расчета при очень больших значениях N.

Имеются более детальные предложения по определению влияния точности исходных данных на результаты расчета (см., например, [82]). Они свидетельствуют о том, что при отсутствии весьма детальной информации о входных параметрах более целесообразно применять простые расчетные модели. Такая особенность расчетного моделирования связана с тем, что потеря информации из-за неполноты исходных данных может значительно превысить накопление информации за счет уточнения расчетной схемы. Этот факт интуитивно используют опытные расчетчики, но всеобщее распространение средств вычислительной техники и легкость выполнения «уточненных» расчетов, якобы учитывающих все детали конструктивного решения, зачастую склоняют проектировщика к неоправданному переусложнению задачи.

Полезно отметить, что прямой учет возможной неточности исходных данных [82], с помощью которого можно получить оценки ошибок для вычисленных перемещений и усилий, приводит к тому, что слабо нагруженные конструктивные элементы системы «догружаются». Опытные расчетчики интуитивно учитывают и этот факт. Например, при расчете стропильных ферм со слабо растянутыми раскосами в середине пролета они учитывают возможность того, что такие раскосы в действительности окажутся сжатыми и проектируют их соответствующим образом.

Сказанное выше ни в коей мере не следует рассматривать как панегирик «старым добрым временам», когда все решалось с использованием формулы $qL^2/8$ и подсчетом на логарифмической линейке. Просто на смену бездумному усложнению расчетных схем должна прийти новая культура их использования, включающая в себя и оценку возможной неопределенности решения. Такое станет возможным тогда, когда разработчики программных систем поймут, что без такой оценки, результаты расчета не следует представлять пользователю. Сейчас же мы, имея современные возможности расчета сложных и сверхсложных систем, решаем их в постановке задачи, в большей мере соответствующей XIX веку, чем концу XX.

Следует отметить, что существенного изменения подходов к самой процедуре расчета и построению соответствующей расчетной модели требуют вероятностные расчеты. В детерминированном варианте предполагается полная идентичность параметров всех одинаковых элементов сооружения. Считается, например, что все поперечники пространственного каркаса имеют одинаковые пролеты, все колонны этих поперечников — одинаковые сечения и т.п. При этом все элементы такого типа сводятся к одному представителю, а иногда и к одному его сечению. Такой подход приемлем при принятом в СНиП подходе к расчету, основанному на полувероятностном методе предельных состояний, поскольку все вероятностные характеристики формулируются и оцениваются вне расчетной схемы, а в расчет вводятся лишь некоторые гарантированные

наихудшие статистические оценки средних, стандартов, квантилей и др., которые действительно одинаковы для всех идентичных элементов, поскольку одним из определений их «идентичности» как раз и является одинаковость закона распределения.

Переход к истинно вероятностному расчету связан с тем, что приходится оперировать не с параметрами распределений случайных величин, а с самими распределениями, когда случайные параметры начинают работать не вне, а внутри расчетной схемы. И в такой схеме каждая из «идентичных» подконструкций должна быть определена в виде набора взаимно независимых (или корреляционно связанных) случайных величин (может быть, функций) с одинаковыми законами распределения. В такой постановке уже нельзя представить себе расчетную схему, например, плоской задачи, предполагающей тождественность (или жесткую коррелированность с коэффициентом корреляции, равным единице) всех параллельно расположенных плоских подсистем.

Здесь представляется уместным процитировать важную и хорошо сформулированую мысль Л.В.Клепикова: «Вероятностный расчет конструкций, опирающийся на более общие модели и математические методы (по сравнению с традиционным расчетом) демонстрирует новые *теоретические* возможности, однако, чем чище и последовательнее вероятностная модель, тем больше трудностей в истолковании и опытной проверке результатов. Реальная задача (нормативная, проектная) требует выхода из абстрактного круга к действительности: поиск исходных данных и обоснование статистических параметров, учет условий создания и использования конструкции, особенностей ее поведения, оценка последствий отказов разного типа и допустимых значений вероятности отказов и многое другое. Чем обобщеннее вероятностная модель, тем больше волевых решений приходится принимать на стадии ее реализации.

Вероятностные модели *полезны* для упорядочения сопоставимости объектов того или иного рода, но они чрезвычайно *чувствительны к принимаемым условиям анализа* и уровню полноты исходных данных. К сожалению, в наших нормах, книгах, дискуссиях эти условия определяются крайне небрежно, невнятно или только подразумеваются, результатом чего являются досадные заблуждения, искренние или подстроенные. Поэтому лишь с большой сдержанностью можно рассматривать вероятность как объективную характеристику человеческой деятельности и ее результатов. По-видимому, в сфере познания Высшего духа существует объективная категория вероятности, но это мало влияет на достоверность расчета несущих конструкций» [44].

Рассматривая вопрос об обосновании выбора расчетных схем в контексте проблематики настоящей работы, следует остановиться еще на одной проблеме. Как правило, статические и динамические расчеты выполняются для упругой стадии работы сооружения и немногочисленные решения, учитывающие перераспределение усилий перед потерей несущей способности конструкции, относятся только к ограниченному числу расчетных моделей (например, к неразрезным балкам). Поэтому всякого рода нормативные проверки прочности и

устойчивости элементов конструкций «с учетом пластической стадии работы», при которых используются усилия, найденные в результате упругого расчета системы, являются в значительной мере условными (по крайней мере для элементов статически неопределимых систем).

Аналогичное замечание относится и к использованию расчетных длин сжатых элементов, которые определяются путем расчета упругой системы на устойчивость. Насколько корректен такой бифуркационный расчет в упругой стадии по отношению к реальной работе конструкции, где на потерю устойчивости оказывают влияние совместные эффекты текучести материала и геометрической нелинейности, остается неясным. Вместе с тем от того, будет ли принят коэффициент свободной длины μ равным 0,75 или 0,85, теоретическое значение несущей способности сжатого стального стержня зачастую зависит больше, чем от величины коэффициента формы сечения η, с помощью которого учитывается неупругое выпучивание. После сказанного уже не кажутся парадоксальными результаты А.Я. Дривинга [33], который на примере простой прямоугольной стержневой системы показал, что неучет предусмотренной СНиП II-23-81* пластической стадии работы материала (при взятой из этих же норм завышенной расчетной длине) приводит к менее экономичному решению, чем упругий деформационный расчет системы, который определяет правильное значение расчетной длины стойки.

Учесть эффекты геометрической и физической нелинейности для большинства используемых расчетных схем современных зданий и сооружений в принципе не очень сложно. Сложности начинаются после выполнения таких расчетов. Дело в том, что если не выполняется принцип суперпозиции, то неизвестно, что нужно делать с результатами нелинейных расчетов, выполненных для различных случаев нагружения системы. Выделить одно определяющее нагружение из множества возможных в большинстве случаев не удается (редкие исключения, подобные конструкции плотины, где расчетное нагружение самоочевидно, лишь подтверждают этот тезис). А систем, работающих только на один вариант нагружения, практически не бывает.

Таким образом, приходится мириться с тем, что большинство массовых расчетов будет выполняться по схемам, для которых адекватность реальной работе сооружения достаточно сомнительна, и необходимая «балансировка» будет достигаться путем использования достаточно усредненных поправочных коэффициентов (таких, как коэффициент условий работы γ_c), значения которых обосновываются экспериментально. В этих условиях еще большему сомнению следует подвергнуть увлечение использованием переусложненных расчетных схем, поскольку как к результатам статического или динамического расчета по упрощенной модели, так и к результатам детального статического или динамического расчета будет применен один и тот же набор коэффициентов, которыми нормы проектирования оперируют безотносительно к происхождению используемых значений усилий, перемещений и т.п.

3.12 О классификации нагрузок и воздействий

Самостоятельное нормирование нагрузок и воздействий, которое реализуется в рамках метода расчетных предельных состояний, связано с их достаточно детальной классификацией. В частности, нормы [107] вполне однозначно определяют, что проверка 1-го предельного состояния реализуется при расчетных значениях нагрузок, а проверка 2-го предельного состояния — при нормативных значениях. Однако эта классификация составляет лишь первый уровень, далее следуют другие, не менее важные детали.

В зависимости от причины возникновения нагрузки и воздействия обычно делятся на:

- основные, которые появляются как неизбежный результат природных явлений или человеческой деятельности;
- аварийные, которые появляются как нежелательный результат человеческой деятельности вследствие грубых ошибок или же являются результатом неблагоприятного стечения обстоятельств (к аварийным могут быть отнесены и весьма редкие воздействия природного происхождения такие, как нагрузки от смерчей, цунами и др.).

Кроме того нагрузки и воздействия делятся на постоянные и переменные, а последние в зависимости от характерной продолжительности непрерывного действия на конструкцию T_d делятся на:

- длительные, для которых продолжительность T_d сопоставима с установленным сроком эксплуатации T_{ef};
- кратковременные, для которых $T_d << T_{ef}$.

Кратковременные нагрузки в свою очередь могут быть многократно повторяющимися или эпизодическими.

Каждый из элементов этой классификации выполняет определенную роль при решении вопроса о выборе того варианта воздействия, которое будет использовано в расчетной проверке. Эти значения правильно называть расчетными и следует при этом понимать, что обычно употребляемая фраза типа «проверка выполняется по нормативным значениям» неверна, здесь следовало бы говорить, что расчетное значение совпадает с нормативным (коэффициент надежности по нагрузке $\gamma_f = 1$). В рамках такого подхода проведена излагаемая ниже классификация нагрузок и воздействий, которая была предложена в проекте нормативного документа [104].

Для каждого из основных нагрузок и воздействий предлагается установить два главных расчетных значения — *эксплуатационное (рабочее)* и *предельное*, а для каждого аварийного воздействия — одно расчетное значение. Кроме главных расчетных значений для основных воздействий могут быть установлены и дополнительные расчетные значения, связанные с идеализированной моделью их зависимости от времени и предназначенные для учета специальных эффектов изготовления и нагружения (ползучести, усадки, потерь предварительного напряжения, усталости и др.).

Для учета длительных реологичесих процессов (усадка, ползучесть) устанавливастся *идеализированное квазипостоянное значение* $Q_{di}(t)=Q_{di}$, а для учета усталостных явлений – *идеализированное циклическое значение* с зависимостью от времени в виде гармонического закона с характерной частотой ω_{di}.

Для проверки предельных состояний первой группы используются предельные расчетные значения, соответствующие установленному сроку службы сооружения T_{ef}, а также идеализированные циклические расчетные значения Q_{di}, если они являются составляющими рассматриваемых переменных воздействий. При этом предполагается, что уровень предельного расчетного значения выбран таким образом, чтобы за установленный срок службы T_{ef} он не превышался ни одного раза с заданной вероятностью, которая зависит от класса ответственности сооружения.

Нагрузки для проверки предельных состояний 2-й группы устанавливаются в зависимости от характера проверки рассматриваемой конструкции:

- если выход за предельное состояние 2-й группы может быть допущен один раз в T_e лет, то используются эксплуатационные расчетные значения, соответствующие периоду повторяемости T_e;
- если в процессе эксплуатации конструкции выход за предельное состояние 2-й группы может быть допущен на протяжении определенной доли μ установленного срока службы конструкции, то для расчета используются эксплуатационные расчетные, соответствующие этой доле μ.

Предполагается, что характер проверки, а также значения T_e и μ устанавливаются нормами проектирования конструкций с учетом их назначения, особенностей работы и условий эксплуатации. Так, например, периодичность превышения нормы жесткости T_e может приниматься равной межремонтному периоду или иному отрезку времени, характерному для режима эксплуатации данной конструкции. Доля установленного срока службы μ может устанавливаться, исходя из требуемого коэффициента готовности или эксплуатационных параметров.

Кажущаяся многочисленность*) указанных выше расчетных значений связана с тем, что имеются различные варианты проектных расчетов, отличающиеся по своей физической сути и по роли в оценках надежности и безопасности:

А — проверка прочности, устойчивости и т.п. при однократном нагружении в экстремальных условиях эксплуатации;

Б — проверка жесткости и трещиностойкости в режиме нормальной эксплуатации;

В — проверка выносливости при действии повторных нагружений;

---

*) Их количество в действительности не превышает число различных вариантов нагрузки, учитываемых в рамках действующего СНиП (расчтеные, нормативные, длительные, кратковременные, пониженные и т.п.).

Г — учет ползучести при длительном действии нагрузки.

Связь между введенной классификацией расчетных нагрузок и возможными вариантами расчетных проверок иллюстрируется в табл. 3.8 [75], где представлены только основные нагрузки. Аварийные нагрузки используются только при проверках типа А.

Таблица 3.8

Расчетные значения	Нагрузки, используемые в расчетах:			
	постоянные	переменные		
		длительные	повторные	эпизодические
Эксплуатационное	Б, Г	Б	Б	
Предельное	А	А, Б	А, Б	А
Квазипостоянное		Г	Г	
Циклическое			В	

Особо следует остановиться на проблеме определения расчетных сочетаний нагрузок. В расчетные сочетания должны включаться такие воздействия, которые оказывают наиболее неблагоприятное влияние на конструкции с точки зрения рассматриваемого предельного состояния. В расчетах конструкций могут быть использованы сочетания воздействий двух типов:

- основные, применяемые при проверке надежности в установившихся и переходных расчетных ситуациях;
- аварийные, применяемые при проверке надежности в аварийных расчетных ситуациях.

Пониженная вероятность одновременного действия нескольких случайных воздействий, как правило, учитывается путем умножения суммы нагрузочных эффектов от действия расчетных значений всех воздействий на коэффициент сочетания $\psi < 1$. Коэффициент сочетания, как правило, определяется из условия равнообеспеченности суммарного нагрузочного эффекта и расчетных значений отдельных воздействий и зависит от вида учитываемых воздействий и их долей в составе суммарного нагрузочного эффекта. При этом в отечественных нормах [107] используется совместный коэффициент сочетаний и суммарное расчетное усилие, например, определяется формулой

$$S = \psi \Sigma S_i, \qquad (3.57)$$

а во многих зарубежных нормах используются раздельные коэффициенты сочетаний, приводящие к зависимостям типа

$$S = \Sigma \psi_i S_i. \qquad (3.57)$$

В некоторых случаях используются и более сложные иерархические зависимости, включающие совместные и раздельные коэффициенты сочетаний.

Необходимость хоть в какой-то мере учитывать физическую природу нагрузок, вошедших в сочетание, приводит к тому, что коэффициенты сочетаний определяются в СНиП достаточно изощренным способом (зависимость от числа

временных нагрузок, ограничение количества одновременно учитываемых крановых воздействий и т.п.). Зарубежные нормы обычно формулируют более простые правила проверки конструкций на сочетания различных нагрузок. Так, например, нормы США [126] рекомендуют для проверки на комбинации воздействий постоянной (DL), полезной временной (LL), ветровой (WL) и сейсмической (EL) нагрузок, а именно, предлагается проверить восемь возможных сочетаний:

1.4 DL
1.2 DL + 1.6 LL
0.9 DL ± 1.3 WL
1.2 DL ± 1.3 WL
1.2 DL + 0.5 LL ± 1.3 WL
0.9 DL ± 1.0 EL
1.2 DL ± 1.0 EL
1.2 DL + 0.5 LL ± 1.0 EL.

В этих же условиях Еврокод [134] рекомендует проверить комбинации:

1.35 DL
1.35 DL + 1.50 LL
1.35 DL ± 1.50 WL
1.00 DL ± 1.50 WL
1.35 DL + 1.35 LL ± 1.35 WL
1.00 DL ± 1.00 EL
1.00 DL + 1.5*0.3 LL ± 1.0 EL.

Коэффициенты, с которыми нагрузки входят в представленные комбинации, подобраны из условия обеспечения примерно одинаковой вероятности реализации рассматриваемых сочетаний нагрузок и подбираются по результатам так называемой калибровочной процедуры *[3*, с.456]. В целом же проблема корректного и вместе с тем практически приемлемого по сложности учета роли сочетаний нагрузок, где должны приниматься во внимание частотные характеристики отдельных видов нагрузки, еще ждет своего решения, хотя уже имеются весьма перспективные результаты *[67]*, *[78]*.

4. Анализ проектной надежности конструкций *)

Раньше чем разрывать навозную кучу, надо оценить, сколько на это уйдет времени и какова вероятность того, что там есть жемчужина.

А.Б. Мигдал

4.1 Причины аварийности

Наиболее разработанным в теории надежности строительных конструкций является направление, развивающее представление о надежности, как о функции коэффициента запаса прочности, при этом сами понятия «коэффициент запаса» и «прочность» толкуются в достаточно обобщенном смысле [15], [93], [95]. На первый взгляд такой подход выглядит разумным, но при более детальном анализе выясняется, что в числе причин отказов конструкций, кроме случая превышения случайной нагрузкой случайного значения несущей способности (т.е. недостаточность коэффициента запаса), присутствуют и многие другие (неизученность работы конструкции, ошибки при проектировании, изготовлении и монтаже, нарушения правил эксплуатации и т.п.). В этих условиях выбирать в качестве меры повышения надежности только увеличение коэффициента запаса неразумно и следует иметь в виду также альтернативные способы увеличения надежности. К ним относятся: совершенствование схем конструкций, разработка ремонтопригодных решений, организация наблюдений за состоянием конструкций, совершенствование службы эксплуатации и многие другие подходы, направленные на повышение адаптируемости конструкции со случайными свойствами к неопределенным условиям ее работы. Таким образом, в число рассматриваемых проблем должны включаться не только технические, но и эргономические задачи, т.е. проблемы взаимодействия человека (проектировщика, строителя, эксплуатационника) и сооружения на протяжении всего жизненного цикла объекта.

Подтверждением сказанному выше могут служить причины аварий стальных конструкций, данные о которых, заимствованные из различных источников и относящиеся как к зданиям и сооружениям общего назначения, так и к специальным объектам, приведены в табл. 4.1.

Из табл. 4.1 видно, что к причинам, с которыми связаны классические направления исследования надежности, в лучшем случае можно отнести не более 29,1% случаев, выбранных из строк «недоработка норм проектирования» и «неудачное проектное решение». Следует отметить, что в табл. 4.1 учтены только отказы, приведшие к аварийному обрушению конструкций. Более полная статистика может быть получена при обработке данных обследований

*) Раздел написан совместно с В.А. Пашинским

эксплуатируемых конструкций, однако, несмотря на многочисленные публикации по статистике дефектов и повреждений, выполнить необходимый анализ не представилось возможным.

Таблица 4.1

Причина аварии	Причины аварий (%) зданий и сооружений различного назначения по данным						Усредненно
	[100]	[13]	[31]	[48]	[149]	[130]	
Недоработка норм проектирования	5,6	8,2	10,0	—	—	—	4,0
Неудачное проектное решение, ошибки проекта	25,0	26,2	35,0	19,6	34,0	11,0	25,1
Низкое качество материалов	5.6	14,7	2,0	—	—	14,0	6,0
Дефекты изготовления и монтажа	38,8	41,0	39,0	57,2	48,9	65,0	48,3
Неправильное содержание (профилактика и ремонт)	25,0	9,9	12,0	23,1	17,1	7,0	15,7
Прочие причины и их сочетания	—	—	2,0	—	—	—	0,3

Это связано с тем, что по традиции причины появления дефектов и повреждений не классифицируются, поскольку (в отличие от аварийных обрушений) не ставится задача выявления ответственных лиц и организаций. Вместе с тем в отчетах об оценке технического состояния эксплуатируемых конструкций превалируют такие дефекты, как существенный коррозионный износ или повреждения элементов, возникшие в результате наезда транспортных средств или неграмотной подвески грузов. Все эти повреждения также почти не связаны с величиной коэффициента запаса.

При рассмотрении статистики причин аварий следует считаться с определенным перекосом оценок в сторону завышения причины «Неудачное проектное решение, ошибки проекта». Это связано с тем, что в отличие от других участников строительного процесса проектировщики находятся в невыгодном положении, особенно в тех случаях, когда причина аварии не очевидна и ее сразу не удалось установить. Конкретный дефект изготовления или монтажа обрушившейся конструкции (например, дефектный сварной шов или отсутствие требуемого количества болтов) трудно отыскать в груде исковерканного металла (см., например, рис.4.2). В то же время проект, по которому было возведено сооружение, может быть детально и всесторонне проанализирован и наличие даже незначительных ошибок, фактически, быть может, и не приведших к аварии, всегда будет обнаружено квалифицированной экспертизой и отмечено в акте расследования аварии.

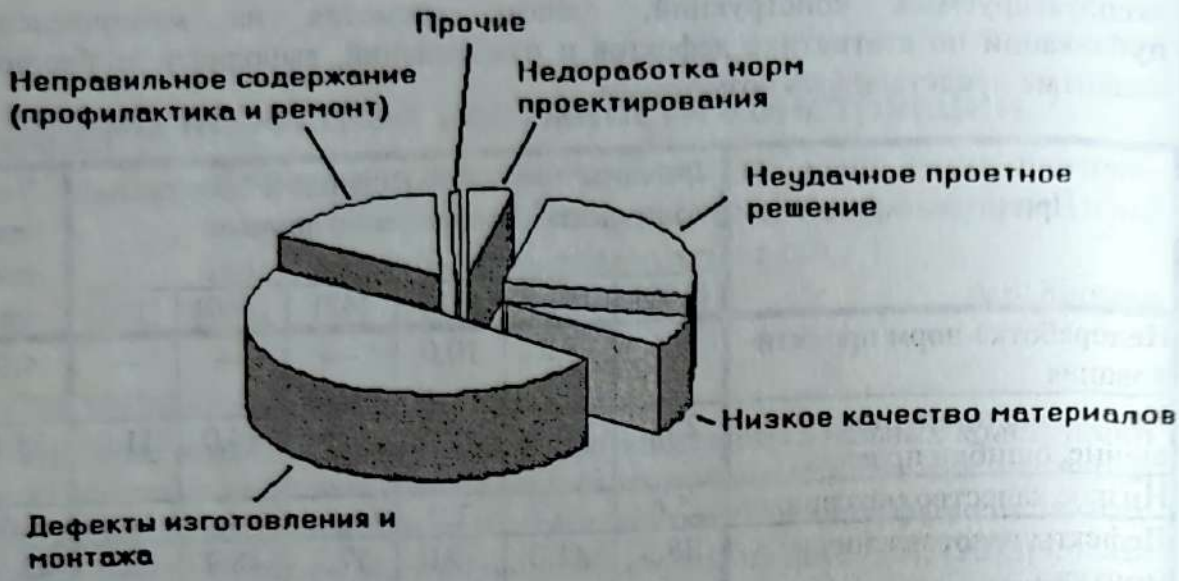


Рис.4.1. Усредненные причины аварий

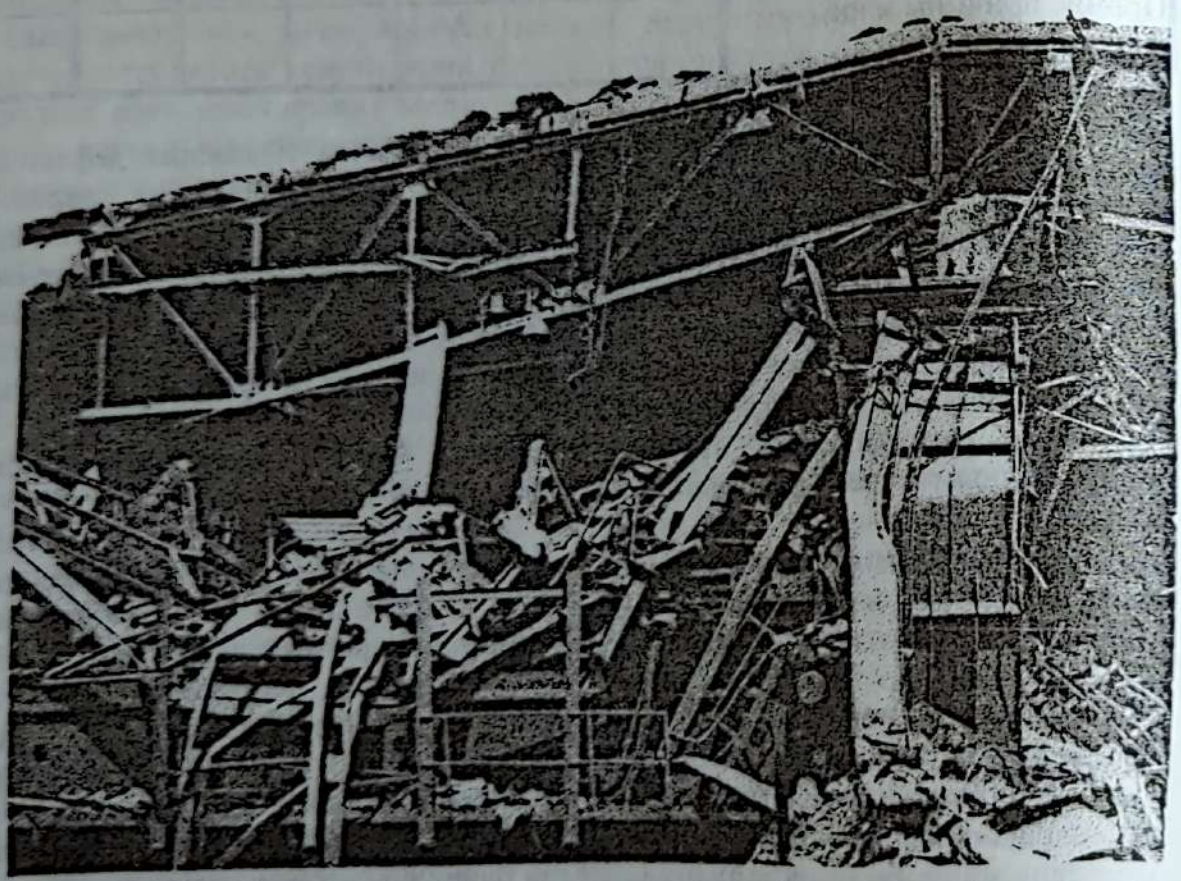


Рис.4.2. Обрушившиеся конструкции производственного здания

Авария — всегда ошибка специалиста вне зависимости от того, вызвана ли она недооценкой внешней нагрузки или недостаточной несущей способностью, которая сформировалась в процессе создания и эксплуатации объекта (при изысканиях, в процессе проектирования, при возведении, во время эксплуатации или при ремонте). Поэтому анализ аварий является не только предметом горячих споров об ответственности той или иной группы специалистов, но и серьезной школой, обучение в которой, правда, стоит очень дорого, а преподавание не всегда ведется на понятном языке.

Недостатком опубликованных статистических материалов, включая и те, на основании которых построена диагарамма на рис.4.1, является их «однопричинность». Указывается в лучшем случае наиболее вероятная причина аварии, а иногда и не сама причина, а тот «спусковой крючок», который породил обрушение. Сама же природа взаимосвязи различных причин, которые, как правило, в совокупности привели к аварии, редко становится достоянием публикаций. Достаточно типичным является, например, такое описание явления — сверхрасчетный снегопад привел к обрушению семи из тридцати шести ферм покрытия, в качестве причины аварии указывается перегрузка (может быть и дефект норм проектирования). Но ведь обрушение только части ферм связано с тем, что именно они имели дефекты изготовления или монтажа. Это соображение уже не найдет своего отражения в статистике аварийности. Или другой пример из работы [50], когда в качестве причины обрушения металлической башни монтажного крана названа "хландоломкость металла из-за подъема примерзшего груза " и остается загадкой: была ли неправильно выбрана марка стали или же нарушены правила эксплуатации крана, запрещающие «срывать» груз.

Анализируя публикации по оценке аварийности строительных объектов, замечаем, что так называемая статистика аварий несовершенна и в других смыслах. И речь идет не только об отсутствии хорошо поставленного учета отказов и аварий, но и о методологии обработки данных, которая чаще всего является чрезвычайно уязвимой. Достаточно типичным примером может служить работа Л. Ринкевича [154], в которой приведена статистика аварий на строительных объектах Польши за двадцать лет с 1973 по 1993 год.

Приводятся, например, данные о том, что обрушения каркасных конструкций составили 25%, плитных — 15%, а оболочечных — 20%. Однако без данных об относительном числе каркасных, плитных и оболочечных систем в общей численности строительных объектов эта «статистика» практически ни о чем не свидетельствует. То же самое можно сказать о данных по авариям конструкций из различных материалов (15% — стальные конструкции; 10% — деревянные; 34% — железобетонные; 26% — каменные). Таким образом искажаются представления о необходимом направлении усилий по обеспечению безаварийности. Более убедительные сведения даются по причинам аварий (см. табл. 4.2), поскольку они представлены в сопоставимой форме.

Таблица 4.2

Причина аварии	Доля в общем числе
Проектирование	0,2330
В том числе:	
недостаточность знаний	0,0860
недостатки нормативных документов	0,0083
ошибочность конструктивного замысла	0,0555
ошибки расчета	0,0055
ошибки изображения	0,0055
небрежность в проектировании	0,0416
другое	0,0305
Исполнение	0,3689
В том числе:	
недостаточность знаний	0,0503
дефекты качества элементов	0,0335
недостаточная квалификация исполнителей	0,0503
небрежность исполнения	0,1132
отступления от проекта	0,0587
другое	0,0628
Эксплуатация	0,3495
В том числе:	
недостаточность знаний	0,0843
ошибки надзора	0,0868
чрезмерное нагружение	0,0149
случайные перегрузки	0,0397
небрежное обслуживание	0,1091
другое	0,0149
Другие причины	0,0485

Весьма поучительны данные работы [149], в которой собрана статистика по 594 случаям обрушения стальных конструкций, произошедших в Германии примерно за 50 лет. В табл. 4.3 представлена зависимость между сроком эксплуатации и аварийностью, а в табл. 4.4 — распределение аварийных случаев по типам зданий и сооружений

Таблица 4.3

Продолжительность эксплуатации до обрушения, лет	Число аварий	Проценты
1-10	142	32,4
11-20	87	19,9
21-30	38	8,7
31-40	17	3,9
41-50	33	7,5
51-60	21	4,8
61-70	29	6,6
71-80	11	2,5
Более 80	9	2,1
Не установлено	51	11,5
Всего	430	100,0

Данные табл. 4.3 не дают основания для вывода об относительном снижении аварийности с возрастом конструкции, хотя элементы такой тенденции имеются. Дело в том, что «выбытие» неудачных конструктивных решений и объектов, изготовленных с дефектами, обычно происходит при небольших сроках эксплуатации. Поэтому «выжившие» конструкции живут дольше (кроме того за очень старыми конструкциями часто устанавливается более тщательный уход и щадящий режим эксплуатации).

Однако нам представляется, что зависимость между числом аварий и продолжительностью эксплуатации, представленная в табл. 4.3, определяется не этим обстоятельством, а связана с тем, что фактическое число старых конструкций невелико вследствие массовых разрушений периода войны и ускоренного строительства в последние десятилетия.

Таблица 4.4

Тип сооружения	Число аварий	Проценты
Здания	223	39,5
Автодорожные мосты	79	14,0
Железнодорожные мосты	80	14,2
Инженерные сооружения	40	7,1
Крановые конструкции	88	15,6
Прочие	22	3,9

Распределение аварий по типам зданий и сооружений дает косвенную информацию о режимах эксплуатации стальных конструкций, при этом понятие «режим эксплуатации» должно трактоваться весьма широко. Более детально влияние режима эксплуатации и условий работы на поведение отдельных конструкций и объекта в целом проявляется при выполнении специальных исследований по определенным типам зданий или сооружений.

Представляется полезным привести такие данные по двум типам весьма ответственных сооружений, опубликованные в недавнее время.

В работе [88] приводятся обобщающие данные 62 аварий резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Обращается внимание на характерное распределение сроков эксплуатации до происшедшей аварии, когда наибольшее число разрушений приходится на первые годы эксплуатации (рис.4.2). Указывается и на то, что более 80% всех разрушений начинаются в сварных швах, в том числе расположенных :

около люка лаза — 12,9%;
в пределах 1 + 5 пояса стенки — 37,1%;
в уторном соединении — 21,0%;
в монтажном стыке — 8,1%;
по границам вставки — 4,8%.

Совершенно очевидны те напрвления конструкторских, технологических и организационных усилий, которые вытекают из этих данных.

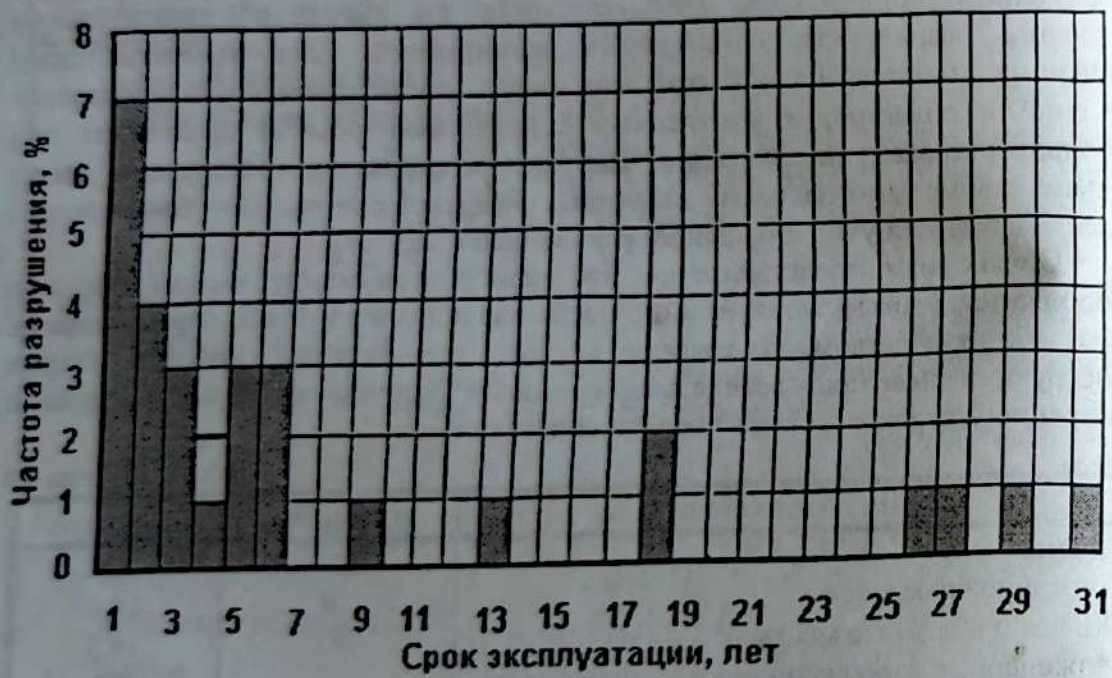


Рис.4.2. Частота разрушения резервуаров в зависимости от срока эксплуатации

Весьма поучительна информация работы [43], где проанализирован мировой опыт аварий бетонных плотин на скальных основаниях. Отмечается, что из 36235 плотин, зарегистрированных в 33 странах-членах Международной ассоциации по гравитационным плотинам, на 1105 из них регистрировались аварии, из них 380 аварий на бетонных плотинах и в том числе 240 связаны со скальными основаниями.

Распределение отказов скальных оснований, классифицированное по значимым факторам многофакторной модели, представлено в табл. 4.5.

В табл.4.6 приведены данные по числу человеческих жертв в результате аварий плотин. Годовая величина риска гибели людей оценивается в диапазоне $1{,}4\times10^{-7}$ — $5{,}1\times10^{-8}$. Уровень годовой интенсивности отказов бетонных плотин с учетом фактической наработки на отказ составляет:

по разрушению — $0{,}34\times10^{-4}$;

по повреждению — $0{,}45\times10^{-3}$.

Таблица 4.5

Значимые факторы сопротивляемости скальных оснований	Значимые факторы внешних воздействий				
	Заполнение водохранилища	Паводки	Сейсмические воздействия	Другие	Всего
Чрезмерная проницаемость	110	6	2	2	120
Деформационная неоднородность	42	2	3	2	49
Недостаточная прочность на сдвиг	24	2	4	5	35
Размываемость	7	24	—	1	32
Другие	3	—	1	—	4
Всего	186	34	10	10	240
В том числе разрушений	8	7	2	1	18

Анализ накопленных данных о причинах аварий, выполненный как в разрезе исследования определенных конструктивных элементов, так и в разрезе оценки надежности отдельных типов сооружений показывает, что путь обеспечения надежности, связанный с проведением контрольно-проверочных работ, ремонтом и заменой частей конструкций, с другими действиями при эксплуатации, исследован в гораздо меньшей степени, чем принципы обеспечения надежности, основанные на обеспечении «безопасного ресурса», и практически не нормирован. Таким образом, все сказанное выше стимулирует более внимательное рассмотрение всего комплекса проблем, приводящих к возможным отказам. Тогда станет очевидным место и роль регламентирующих документов различного типа (норм проектирования, правил производства и приемки работ, указаний по эксплуатации и др.) в обеспечении надежности, а также их взаимосвязь с проблемами контроля и его неполной достоверностью.

Однако анализ фактического уровня «проектной надежности» является одной из важнейших составных частей такой комплексной оценки, поэтому в последующих разделах этой главы он проводится достаточно детально.

Таблица 4.6

№	Наименование плотины, страна	Год	Объем водохранилища, млн.м^3	Число жертв, чел.	Убытки
1	Пуэйтес, Испания	1802	52	680	—
2	Шеффилд, Англия	1864	3	238	—
3	Хабра, Алжир	1881	30	209	—
4	Бузи, Франция	1884	7	156	40 млн. марок
5	Саут Форк, США	1889	18,5	2209	150 млн. долл.
6	Байлес, США	1911	1	75	—
7	Тигра, Индия	1917	126	1000	—
8	Глено, Италия	1923	5	500	150 млн. лир
9	Эйджи, Англия	1925	4,5	16	—
10	Сен Френсис, США	1928	46	428	100 млн. долл.
11	Зербино, Италия	1935	18	130	25 млн. лир
12	Вега де Терра, Испания	1959	8	144	—
13	Мальпассе, Франция	1959	47	421	68 млн. долл.
14	Вайонт, Италия	1963	168	1899	100 млн. долл.
15	Койна, Индия	1967	2780	216	—
16	Титон, США	1976	308	11	1 млн. долл.
17	Мачху II, Индия	1979	100	2000	—
18	Тоус, Испания	1982	50	28	360 млн. долл.
19	Кисилевское, Россия	1993	32	16	40 млрд. руб.

4.2 Какова же проектная надежность конструкций, соответствующих требованиям СНиП ?

Метод предельных состояний, положенный в основу действующих норм проектирования, требует сопоставить расчетное значение усилия в элементе Q_p с расчетным значением несущей способности R_p и при выполнении условия $R_p > Q_p$ полагает, что надежность обеспечена. При этом само значение вероятности безотказной работы в течение заданного срока (надежности) остается неизвестным. В связи с этим представляет интерес оценка фактического уровня надежности конструкций, запроектированных в соответствии с действующими нормами. Исследования, проведенные в этом направлении разными авторами (см., например, [93] и др.), показали, что разброс вероятностей отказа весьма

велик, поэтому интересно оценить минимальную надежность, обеспечиваемую нормами.

Каким срокам службы и каким вероятностям возникновения предельных состояний соответствует запроектированная в соответствии с нормами конкретная конструкция? На этот вопрос проектировщик не имеет ответа ни в прямой, ни в косвенной форме. Более детальный анализ показывает не только значительный разброс вероятностей отказа для конструкций, выполненных, например, из разных материалов, но даже для одного и того же элемента конструкции. Дело в том, что в одном и том же элементе могут возникать отказы разных видов (до 10 и более) и вероятности их возникновения оказываются различными. Так, в работе [11] на примере балки, имеющей параметры по условиям примера VII.3 из учебника [57], были определены значения индекса надежности β для некоторых возможных видов отказа:

- достижение предела текучести в срединном сечении — 4,11;
- потеря устойчивости стенки в срединном сечении — 4,85;
- потеря устойчивости поясного листа — 10,82;
- потеря устойчивости стенки в крайней панели — 8,48;
- достижение предела текучести сдвигу в опорном сечении — 6,77;
- достижение предела текучести в месте изменения сечения — 9,95;
- достижение предельного прогиба в срединном сечении — 1,65.

Напомним, что индекс надежности β (А.Р. Ржаницын использует термин «характеристика безопасности», а Б.И. Снарскис «нормальная дальность отказа») есть число стандартов, отделяющих случайную величину резерва прочности от центра распределения, в предположении, что этот резерв имеет нормальное распределение. Диапазон изменения индекса надежности от 1,65 до 10,82 соответствует диапазону вероятностей отказа от 10^{-2} до 10^{-27}. Такой большой диапазон значений проектной вероятности отказа характерен не только для отечественных нормативных документов. Так, по данным весьма поучительной работы [96], в которой детально освещен опыт Великобритании по созданию новой редакции норм проектирования мостов, диапазон изменения расчетной вероятности отказа по различным элементам сооружения колеблется в следующих пределах:

- стойки — от $3{,}16\times10^{-10}$ до $2{,}51\times10^{-17}$;
- растянутые пояса главных балок — от $1{,}25\times10^{-15}$ до $7{,}94\times10^{-28}$;
- сжатые пояса главных балок — от $1{,}58\times10^{-12}$ до $7{,}92\times10^{-20}$;
- стенки балок — от $5{,}01\times10^{-5}$ до $3{,}16\times10^{-9}$;
- настил — от $1{,}99\times10^{-3}$ до $2{,}51\times10^{-10}$.

Наличие таких больших отклонений в уровне надежности, задаваемом действующими нормами проектирования, заставляет более детально рассмотреть вопрос о происхождении этих разбросов. Такой анализ проведен применительно к вероятности отказов стальных конструкций (в отдельных случаях

затрагивались и конструкции из других материалов), и во всех случаях рассматривалась лишь вероятность отказов по первому предельному состоянию.

Для этого анализа выбраны конструкции, уровень надежности которых можно было бы не считать завышенным. Из опыта эксплуатации несущих конструкций и ранее выполненного анализа их надежности известно, что одной из наименее надежных и вместе с тем широко распространенной конструктивной формой является конструкция стропильных ферм, воспринимающих постоянную и снеговые нагрузки. По крайней мере половина отказов покрытий, которые произошли в Украине за последние 10 лет, связаны с такими конструктивными решениями. Именно поэтому тестированию были подвергнуты типовые стальные стропильные фермы серии 1.460.3-20 (с поясами из тавров) и серии 1.460.2-10/88 (из парных уголков). Анализировались конструкции без фонарей и без подвесного транспорта пролетами от18 до 36 м под расчетную нагрузку от 15 кН/м до 122 кН/м.

Статистические характеристики постоянной нагрузки от массы конструкций покрытия устанавливались с использованием данных справочников и норм. Для этого с учетом номинального веса и установленных СНиП [107] коэффициентов надежности по нагрузке γ_f подсчитаны значения нормативных $p_н$ (кПа) и расчетных p (кПа) нагрузок для различных типов покрытий (утепленная кровля по стальному профилированному настилу, холодная и утепленная кровля по железобетонным и ребристым плитам с различными видами и толщинами изолирующих слоев).

Известно, что при составлении норм нагрузок [107] нормативные значения постоянной нагрузки приняты равными среднему значению, а расчетное значение имеет обеспеченность, близкую к 0,98. Исходя из этого, для каждого из рассмотренных типов кровли были получены математические ожидания m, стандарт s и коэффициент вариации v постоянной нагрузки с использованием формул:

$$m = p_н; \qquad s = (p - p_н)/2; \qquad v = s/m. \tag{4.1}$$

В соответствии с данными, полученными таким способом для 16 типов кровли, построен график зависимости коэффициента вариации v от математического ожидания m, равного нормативному значению постоянной нагрузки. Эта зависимость близка к линейной и хорошо аппроксимируется формулой

$$v = 0{,}065 + 0{,}006\, m, \tag{4.2}$$

в соответствии с которой при реальных значениях нормативной нагрузки $0{,}7 < p_н = m < 5{,}2$ кПа ее коэффициент вариации изменяется от 0,069 до 0,096.

Статистические характеристики снеговой нагрузки установлены по данным 40 метеостанций, местоположение и число которых примерно пропорционально площадям всех шести снеговых районов по СНиП 2.01.07-85. Для каждой метеостанции была выполнена статистическая обработка выборки

годовых максимумов веса снегового покрова, определенного по результатам снегомерных съемок. Данные, полученные для открытой местности, пересчитаны в данные для местностей, защищенных от ветра, в соответствии с известной методикой.

Выполненный анализ показал, что математическое ожидание веса снежного покрова меняется от 0,371 кПа для 1-го снегового района до 3,174 кПа для 6-го снегового района. Коэффициенты вариации, наоборот, имеют тенденцию уменьшаться в зависимости от номера снегового района и меняются от 0,241 до 1,013.

Для обобщения статистических характеристик снеговой нагрузки были вычислены среднерайонные значения математического ожидания, стандарта и коэффициента вариации снеговой нагрузки. За исключением 6-го снегового района, среднерайонные значения математического ожидания близки к соответствующим нормативным нагрузкам по СНиП 2.01.07-85, а среднерайонные коэффициенты вариации уменьшаются с возрастанием номера района. Аналогичные данные по снеговому нагружению были представлены и в отчете ЦНИИСК им. Кучеренко [90]. Сопоставление приведено в табл. 4.7.

Заметим, что для значительного числа метеостанций математическое ожидание превышает установленную нормативную нагрузку для соответствующего района, что свидетельствует о некачественном нормировании снеговой нагрузки в СНиП 2.01.07-85. Печальным подтверждением этого являются многочисленные аварии, наблюдавшиеся, главным образом, в южных районах, где фактический коэффициент вариации снеговой нагрузки намного превышал принятую при разработке СНиП 2.01.07-85 среднюю для всей территории СНГ величину. Тенденция авторов норм к занижению V видна и в табл. 4.7, хотя проявляется она менее резко.

Таблица 4.7

Снеговой район по СНиП	Нормативная нагрузка, кПа	Статистические характеристики				
		m, кПа	s, кПа		V	
			по метеоданным	[90]	по метеоданным	[90]
1	0,5	0,5	0,31	0,23	0,62	0,46
2	0,7	0,7	0,32	0,28	0,46	0,40
3	1,0	1,0	0,40	0,35	0,40	0,35
4	1,5	1,5	0,50	0,45	0,33	0,30
5	2,0	2,0	0,58	0,60	0,29	0,30
6	2,5	3,0	0,85	0,75	0,28	0,30

Для каждой из типовых ферм в упомянутых выше сериях указана несущая способность, т.е. допустимое значение суммарной расчетной погонной нагрузки.

Надежность каждой фермы оценивалась при всех возможных комбинациях снеговой и постоянной нагрузок, которые при шаге ферм 6 и 12 м нагружают конструкцию до исчерпания ее расчетной несущей способности. Так, например, для фермы ФС 24-20, рассчитанной на суммарную нагрузку 49 кН/м, рассмотрено три комбинации нагрузок:

- шаг 6 м, 4-й снеговой район, утепленная кровля по профнастилу (0,953 кПа);
- шаг 6 м, 2-й снеговой район, холодная кровля по железобетонным ребристым плитам (2,353 кПа);
- шаг 12 м, 1-й снеговой район, утепленная кровля по профнастилу (0,953 кПа).

Всего проанализировано 111 вариантов ферм из парных уголков и 74 — из прокатных тавров.

Опыт статистических исследований воздействия нагрузок на строительные конструкции показывает, что большинство процессов может быть представлено в виде последовательности максимальных значений, подчиненных двойному экспоненциальному закону распределения Гумбеля. Постоянные нагрузки, а также характеристики прочности достаточно точно описываются нормальным законом Гаусса. Если же исследуется воздействие в виде суммы нагрузок, то необходимо иметь закон распределения суммарного усилия от всех нагрузок. Для таких сумм В..А. Пашинским и С.Ю. Пичугиным был предложен закон в виде линейной комбинации распределений Гумбеля и Гаусса. Поскольку при сложении случайных величин их сумма нормализуется, то распределение резерва несущей способности имеет вид, промежуточный между распределениями Гумбеля и Гаусса, принимая форму одного из них в граничных случаях.

Это распределение имеет вид

$$F(x) = C\exp\left[-\exp\left(\frac{m-x}{0{,}78s}\right)-0{,}577\right]+(1-C)\Phi(x), \qquad (4.3)$$

где $\Phi(x)$ — функция нормального распределения Гаусса; m — математическое ожидание; s — стандарт; $C = 0.87752A^2$ – весовой коэффициент; A — коэффициент асимметрии.

Коэффициент асимметрии распределения (4.3) может меняться от −1,1396 до +1,1396, что охватывает все возможные значения для распределения резерва прочности. При A = -1,1396 распределение (4.3) вырождается в распределение Гумбеля для минимумов, при A = +1,1396 — в распределение Гумбеля для максимумов, а при A = 0 — нормальное распределение Гаусса.

Проверка пригодности закона (4.3) путем сопоставления с фактическими распределениями, полученными методом Монте-Карло показала, что он не противоречит фактическим данным по критерию Колмогорова и Крамера-Мизеса-Смирнова на уровне значимости не ниже чем 0.30, а по критерию Пирсона — на уровне значимости не ниже чем 0.10.

Закон распределения (4.3) позволяет оценивать надежность элементов строительных конструкций по такой методике:

1. В результате статистической обработки данных из литературных источников получают исходные данные:

- математическое ожидание m_r и стандарт s_r нормального распределения несущей способности элемента;
- математическое ожидание и стандарт постоянной нагрузки, которая также распределена по закону Гаусса;
- для каждой временной нагрузки — математическое ожидание m_{io} и стандарт s_{io} распределения ее максимальных значений за характерное время (годовые, месячные или другие максимумы).

2. С использованием известных свойств распределения Гумбеля для всех временных нагрузок определяют числовые характеристики распределения максимумов за срок службы T:

$$m_i = m_{io} + 0{,}78 s_{io} \ln(T);\ s_i = s_{io} \qquad (4.4)$$

3. Численные характеристики резерва прочности вычисляются как

$$\begin{aligned} m &= m_r - \Sigma\, a_i\, m_i; \\ s &= [\, s_r^2 + \Sigma\, (a_i^2\, s_i^2)\,]^{1/2}; \\ A &= -\,\Sigma\, (a_i^3\, s_i^3\, A_i^3) / s^3\,, \end{aligned} \qquad (4.5)$$

где a_i — коэффициенты влияния нагрузок, которые обеспечивают переход от нагрузки к усилию в элементе; A_i – коэффициенты асимметрии, которые равняются нулю для нагрузок, распределенных по нормальному закону, и 1,1396 для нагрузок, распределенных по закону Гумбеля. Суммы в формулах (2.3) вычисляются с учетом всех действующих нагрузок.

4. Исходя из полученных числовых характеристик резерва прочности, определяют параметры распределения (4.3) и вычисляют вероятность безотказной работы элемента P(T) и вероятность его отказа Q(T) на протяжении срока службы T по формуле (4.3):

$$P(T) = 1 - F(0)\ ;\ Q(T) = F(0)\ . \qquad (4.6)$$

Вероятность безотказной работы стержня на протяжении заданного срока службы определялась путем последовательного использования формул (4.4), (4.5) и (4.3).

В каждой из 185 рассмотренных ферм анализировались четыре-пять наиболее нагруженных элементов — средние панели верхнего и нижнего поясов, опорное сечение, первый от опоры растянутый раскос и наиболее нагруженный элемент решетки, если он не совпадал с первыми двумя раскосами. Поскольку снеговая и постоянная нагрузки прикладываются как равномерно распределенные по длине фермы, суммарное нагружение можно считать однопараметрическим. При этом отказы всех элементов оказываются взаимозависимыми (они связаны функционально), а надежность всей фермы приблизительно равна надежности наиболее слабого элемента. Серии 1.460.3-20 и 1.460.2-10/88 запроектированы так, что практически каждая ферма имеет один

полностью загруженный стержень, усилие в котором равняется его несущей способности по СНиП. Именно этот стержень (обычно элемент пояса) определяет надежность всей фермы.

Анализ полученных вероятностей безотказной работы показал, что их значения для ферм из прокатных тавров и уголков в целом близки, что позволяет в дальнейшем совместно рассматривать все полученные результаты. Для большего удобства вероятности безотказной работы P(T) преобразованы в логарифмические показатели надежности (Беллы)

$$P_L(T) = - \lg[1 - P(T)] , \qquad (4.8)$$

где lg[•] — десятичный логарифм вероятности отказа. Логарифмический показатель надежности $P_L(T)$ удобен тем, что несмотря на разницу вероятностей отказа в несколько порядков, при анализе можно использовать равномерную шкалу.



Рис.4.3. Зависимость показателя надежности от доли снеговой нагрузки

Анализируя зависимость показателей надежности от факторов, которые учитывались в расчетах, приходим к выводу о том, что вероятность безотказной работы стропильных ферм уменьшается с ростом доли снеговой нагрузки $q_c / (q_c + q_n)$в суммарной нагрузке на ферму. Этот вывод иллюстрируется рис. 4.3, на котором кроме вычисленных значений (точки) показаны и линии линейного тренда для двух серий результатов — логарифмическая безотказность при расчетном сроке эксплуатации T — 5 и 50 лет.

Более детальный анализ показывает, что при близких долях снеговой нагрузки в общей расчетной нагрузке надежность уменьшается с уменьшением номера снегового района (математического ожидания снеговой нагрузки). Таким образом, наименее надежными будут фермы, запроектированные для малоснежных районов, что соответствует условиям Украины.

Таблица 4.8

Показатели	T = 5 лет	T = 50 лет
Средняя вероятность отказа по серии	0,9945	0,9613
Среднеквадратичное отклонение	0,7103	0,7175
Наименьшая вероятность отказа	0,8184	0,3862
Наибольшая вероятность отказа	0,9992	0,9964
Вероятность отказа при обеспеченности:		
• 0,80	0,9980	0,9880
• 0,90	0,9986	0,9916
• 0,95	0,9989	0,9943

В табл. 4.8 приводятся обобщенные характеристики их надежности для всей серии расчетов, равно как и для срока службы в 50 лет, между собой они связаны достаточно тесно, как это следует из рис. 4.4.

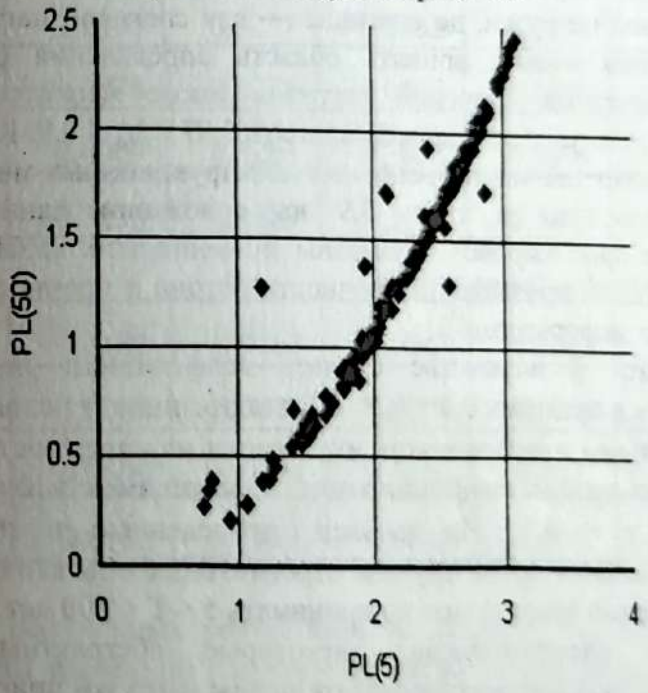


Рис.4.4. Связь между логарифмическими показателями надежности при различных сроках эксплуатации

Из табл. 4.8 видно, что вероятность безотказной работы колеблется в широком диапазоне и в некоторых случаях принимает крайне низкие значения (меньшие 0,8), которые явно не отвечают обычным представлениям о требованиях, предъявляемых к строительным конструкциям по вероятности

безотказного функционирования. Средняя вероятность безотказной работы равна 0,994 при сроке службы 5 лет и 0,961 при сроке службы 50 лет.

4.3 Оценка роли основных параметров

На расчетную надежность элемента, подверженного одному нагружению, основное влияние оказывают: коэффициент вариации нагрузки V_q и обеспеченность ее расчетного значения b_q; коэффициент вариации распределения прочности материала V_r и обеспеченность ее расчетного значения b_r; коэффициент надежности по назначению γ_n; коэффициент условий работы γ_c и срок службы T. Рассмотрим границы изменения указанных величин.

Таблица 4.9

Статистические характеристики	Сталь	Бетон	Дерево
Коэффициент вариации, V_r	0,08	0,135	0,2
Обеспеченность расчетного значения, b_r	0,9986	0,9980	0,9900

Из результатов статистических исследований известно, что коэффициент вариации годовых максимумов нагрузки может меняться от значений, близких к нулю — для крановой нагрузки, до единицы — для снеговой нагрузки. Исходя из этого для анализа можно принять область определения $0 < V_q < 1$. Обеспеченность расчетных значений нагрузок также меняется в широких пределах, но достаточно уверенно можно принять $0,37 < b_q < 0,9$. Коэффициенты вариации характеристик прочности основных конструкционных материалов и их обеспеченность приведены в табл. 4.9 на основании данных из норм проектирования, где ориентировочно указаны значения этих характеристик для предела текучести стали, призменной прочности бетона и прочности древесины при различных видах деформации.

В подавляющем большинстве случаев коэффициент надежности по назначению меняется в пределах $0,9 < \gamma_n < 1,0$, а коэффициент условий работы — $0,9 < \gamma_c < 1,05$. Учитывая аналогичность их влияния на надежность, можно при анализе заменить их одним коэффициентом, меняющимся в более широком диапазоне: $0,9 < \gamma < 1,1$. И, наконец, приведенные в проекте норм ориентировочные значения срока службы строительных объектов меняются от 25 до 120 лет, но с целью анализа можно принимать $5 < T < 200$ лет.

При анализе рассматривались некоторые абстрактные элементы конструкций, для которых математическое ожидание нагрузки приравнивалось к единице, а ее стандарт определялся с использованием указанных выше значений коэффициента вариации. Расчетное значение нагрузки определялось с использованием распределения Гумбеля таким образом, чтобы с заданной обеспеченностью оно не могло превышаться на протяжении срока службы. Так, например, при обеспеченности 0,9 расчетное значение не может быть

превышено с вероятностью 0,9, а нормированию по среднему периоду повторяемости соответствует обеспеченность 0,37.

Статистические характеристики прочности определялись с использованием нормального распределения так, чтобы их расчетные значения отвечали обеспеченности, указанной в табл. 4.9, и в точности соответствовали значению расчетного нагружения (т.е. предельное неравенство имело форму равенства). Результаты расчетов представлены в табл. 4.10 для граничных значений рассмотренных параметров.

Из табл. 4.9 видно, что для некоторых случаев вероятность отказа может принимать очень большие значения, которые вообще не отвечают общепринятым требованиям по надежности строительных конструкций. Так, например, при нормировании нагрузок по среднему периоду повторяемости (b_q = 0,37) вероятность отказа приближается к 0,5.

Таблица 4.10

V_q	γ_0	Сталь		Бетон		Дерево	
		T=5	T=200	T=5	T=200	T=5	T=200
Обеспеченность расчетной нагрузки 0,37							
0,1	0,9	0,1596	0,1237	0,0262	0,0198	0,0333	0,0296
0,1	1,1	0,0078	0,0035	0,0023	0,0015	0,0082	0,0072
1,0	0,9	0,4909	0,3263	0,3003	0,0994	0,2252	0,0717
1,0	1,1	0,3135	0,0889	0,1640	0,0202	0,1180	0,0208
Обеспеченность расчетной нагрузки 0,9							
0,1	0,9	0,0182	0,0163	0,0043	0,0043	0,0117	0,0127
0,1	1,1	0,0008	0,0005	0,0004	0,0003	0,0029	0,0031
1,0	0,9	0,0509	0,0324	0,0166	0,0071	0,0129	0,0097
1,0	1,1	0,0162	0,0046	0,0048	0,0012	0,0043	0,0026

Анализ полученных результатов показывает, что при одной и той же обеспеченности расчетной нагрузки вероятность отказа растет с увеличением коэффициента вариации, но уменьшается с сокращением срока службы. Это объясняется тем, что для распределения Гумбеля рост срока службы ведет к

уменьшению коэффициента вариации нагружения*). Таким образом, наиболее опасным может оказаться действие снеговой нагрузки на временное сооружение.

Мера влияния каждого из проанализированных факторов на надежность конструкции может быть оценена по данным табл. 4.11, где показаны характер изменения вероятности при увеличении значения анализируемого параметра, а также наименьшие и наибольшие значения отношения вероятностей отказа, вычисленные при граничных значениях этого параметра, но при различных значениях прочих параметров. Из табл. 4.11 видно, что степень влияния каждого фактора на уровень надежности в значительной мере зависит от комбинации значений других параметров и может колебаться в достаточно широких границах — от практически полного отсутствия влияния (отношение вероятностей отказа близко к единице) до изменения вероятностей на один-два порядка.

Таблица 4.11

Исследуемый параметр и границы его изменения	Характер изменения вероятности отказа	Отношение вероятностей	
		от	до
Коэффициент вариации нагрузки (от 0,1 до 1,0)	Увеличивается	1,1	71,3
Обеспеченность расчетной нагрузки (от 0,37 до 0,9)	То же	2,3	34,2
Срок службы конструкции (от 5 до 200 лет)	Уменьшается	1,0	8,1
Коэффициент надежности (от 0,9 до 1,0)	То же	1,6	35,3
Материал — сталь, бетон, дерево		1,3	6,2

При использовании метода расчетных предельных состояний уровень надежности конструкций в зависимости от их назначения и условий эксплуатации должен регулироваться коэффициентом надежности по назначению и коэффициентом условий работы. При этом желательно, чтобы изменение значений этих коэффициентов приводило к одинаковому изменению вероятности отказа всех элементов конструкции, независимости от материала, срока службы и статистических характеристик нагрузки.

---

*) Как заметил Л.В.Клепиков [44], для других распределений это совсем не обязательно. Например, если рассматривать выборку регулярных метеонаблюдений за 50 лет и взять T=50 лет, то имеем один максимум q_{50} и при этом для данной выборки $\sigma_{q50} = 0$. Если перейти к T=5, то получим десять интервалов и соответствующих им максимумов, характеризуемых некоторой изменчивостью, такой, что средние $m_{q5} < q_{50}$ и $\sigma_{q5} > 0$. При дальнейшем уменьшении длины интервала T (1 год, 1 месяц и т.д.) изменчивость максимумов возрастает, а средние значения падают.

На рис. 4.5 для значений коэффициента вариации $0,1 < V_q < 1,0$, сроков службы $5 < T < 200$ лет и обеспеченности расчетного значения нагрузки 0,37 представлены отношение вероятностей отказа элементов стальных конструкций, запроектированных при $\gamma = 0,9$, к соответствующим вероятностям отказа для элементов с $\gamma = 1,1$.

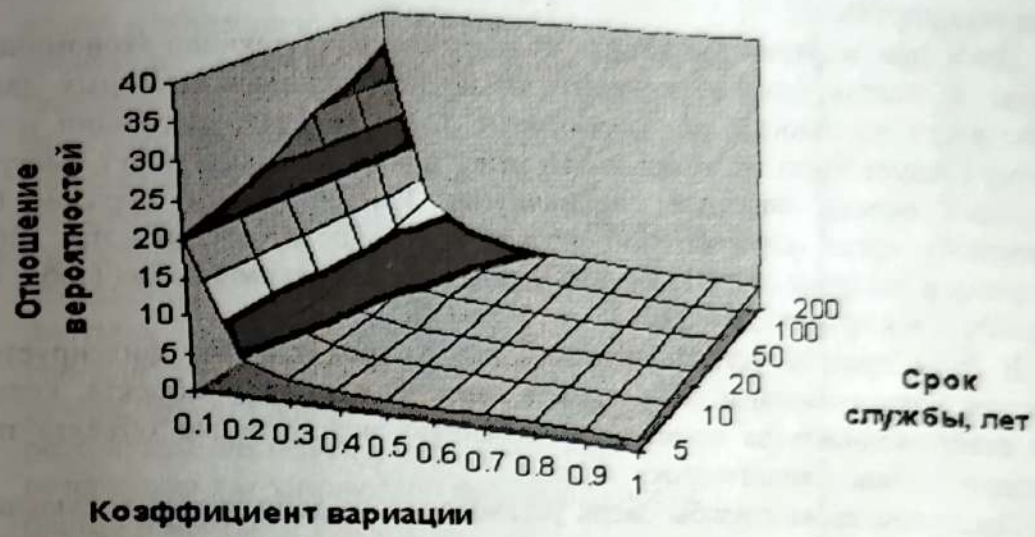


Рис. 4.5. Отношение вероятностей отказа

Из рис. 4.5 видно, что при различных значениях срока службы и коэффициента вариации нагрузки коэффициент надежности γ по-разному влияет на вероятность отказа и не обеспечивает равномерного регулирования надежности конструкций. Из этого же рисунка видно, что срок службы влияет на вероятность отказа значительно меньше, чем коэффициент вариации нагрузки, поэтому при назначении γ, в первую очередь, необходимо обращать внимание на статистические характеристики нагрузок.

4.4 Учет фактора времени

Действующие нормы проектирования практически не учитывают фактор времени и игнорируют срок службы в расчетах несущих конструкций, хотя продолжительность эксплуатации существенно сказывается на их работе. При увеличении срока службы меняются физические характеристики материалов вследствие старения, накапливаются эксплуатационные повреждения, вызываемые случайными механическими воздействиями и коррозионным износом, протекают нежелательные реологические процессы ползучести и усталости, увеличивается вероятность реализации высоких значений случайных нагрузок и воздействий.

Срок службы T зданий или сооружений должен устанавливаться при проектировании на основании технико-экономических расчетов и с учетом условий и режима эксплуатации (при предусмотренном техническом

обслуживании, но без необходимости в капитальном ремонте), а также с учетом прогнозируемого темпа изменений тех технологических процессов и производств, для организации и обслуживания которых создается строительный объект. Однако ввиду отсутствия соответствующих указаний в нормативных документах на проектирование этот аспект принятия проектных решений почти всегда игнорируется.

Даже при желании выполнить соответствующие технико-экономические расчеты не всегда удается из-за отсутствия необходимых исходных данных (темпы роста технологий, долговременные экономические тенденции и т.п.). Поэтому следует иметь некоторый ориентир, в роли которого могут выступить экспертные оценки опытных специалистов. Именно таким образом были установлены сроки службы при разработке Чешского стандарта 730031, введенного в действие с 01.01. 90 [157], аналогичная рекомендация (табл. 4.12) содержалась и в проекте ДБН [104].

В этом проекте устанавливалось, что «...срок службы фиксируется в проектной документации и должен быть известен владельцу объекта, который несет ответственность за несанкционированную эксплуатацию объекта после исчерпания установленного срока службы.

Продление срока службы сверх установленного допускается только после проведения обследования и оценки технического состояния объекта, по результатам которых устанавливается возможность увеличения Т. При этом могут быть указаны особые условия эксплуатации или выдвинуты требования об особом режиме надзора, периодичности ремонтов, мероприятиях по недопущению перегрузок и т.п. »

Если срок Т установлен, то степень долговечности основных конструктивных элементов, способы их защиты (от огня, физических, биологических, химических и других повреждений, чрезмерного деформирования оснований) и обеспечение возможности их замены после исчерпания ресурса должны быть увязаны с Т. Иными словами, необходимо обеспечивать требуемый уровень надежности на протяжении всего этого срока. В составе объекта могут быть отдельные части зданий и сооружений, конструкции и подсистемы, срок службы которых меньше Т, тогда следует предусматривать возможность их капитального ремонта или замены и при этом срок их службы целесообразно назначать кратным общему сроку службы объекта Т.

Таблица 4.12

Типы сооружений	Ориентировочное значение T, лет
Здания:	
жилые и общественные	100
производственные и вспомогательные	60
складские	60
сельскохозяйственные	50
мобильные сборно-разборные	20
мобильные контейнерные	15
Инженерные сооружения:	
мосты	100
плотины	120
тоннели	120
резервуары для воды	80
резервуары для нефти и нефтепродуктов	40
резервуары для химической промышленности	30
башни и мачты	40
дымовые трубы	30
теплицы	30

Изменение физических характеристик материалов должно учитываться при назначении их расчетных значений. Эта задача несколько упрощается для стальных конструкций, где процесс старения несущественно меняет свойства стали. Процесс набора прочности бетона реализуется достаточно быстро и успевает завершиться практически к моменту начала активной работы конструкции. Более актуальна упомянутая проблема для деревянных и пластмассовых конструкций, для которых определение характеристик длительной прочности решается с использованием специальных методов.

Процессы накопления эксплуатационных повреждений имеют свои статистические закономерности и могут быть учтены при выборе значений коэффициентов условий работы или же введением других специальных коэффициентов надежности, с помощью которых первоначальная расчетная несущая способность конструкций будет снижена до величин, ожидаемых к концу эксплуатации или межремонтного периода. Процессы ползучести и усталости материалов протекают в результате действия долговременных и повторных нагрузок и для их учета в рамках метода предельных состояний целесообразно устанавливать условные расчетные воздействия, эквивалентные реальным случайным процессам нагружения по их влиянию на конструкцию.

Действующий СНиП устанавливает единые нормативные и расчетные значения нагрузок для всех конструкций. Вместе с тем опыт разработки зарубежных нормативных документов и специальные исследования показали,

что имеется возможность устанавливать расчетные значения нагрузок в зависимости от срока службы конструкций. Исходя из этого и из представленных в проекте ДБН [104] общих формулировок предельных неравенств, запишем конкретные предельные неравенства для расчета элементов стальных или деревянных конструкций при условии их линейной работы. Для расчета железобетонных или других композитных конструкций необходимо изменить лишь правую часть неравенства, определяющую расчетное значение несущей способности.

Проверка предельных состояний 1-й группы реализуется с использованием неравенства

$$\gamma_n \gamma_{fd} \psi S [a_i, F_i(T)] \le A R \gamma_c(T) \gamma_{rd}, \qquad (4.9)$$

а предельных состояний 2-й группы — с использованием неравенства

$$\gamma_n \gamma_{fd} \psi S [d_i, F_i(T)] / \gamma_c(T) \le d_{lim}, \qquad (4.10),$$

где γ_n — коэффициент ответственности, который учитывает значимость и возможные последствия отказа объекта в целом, конструкции и ее элемента и определяется в зависимости от требуемого уровня надежности этого элемента;

$F_i(T)$ — соответствующее рассматриваемому предельному состоянию расчетное значение i-той нагрузки;

a_i — коэффициент влияния i-той нагрузки, обеспечивающий переход от нагрузки к внутреннему усилию в элементе и определяемый методами строительной механики как усилий от единичного нагружения;

d_i — перемещение некоторой точки конструкции от единичного значения i-той нагрузки;

ψ — коэффициент сочетания нагрузок, учитывающий вероятность одновременной реализации их расчетных значений, который определяется из условия равнонадежности конструктивных элементов при расчете на одну и много нагрузок;

A — геометрическая характеристика поперечного сечения элемента, соответствующая рассматриваемому виду деформаций;

R — расчетное сопротивление материала;

d_{lim} — предельно допустимое значение перемещения, определяемое из условий эксплуатационной пригодности конструкций с учетом технологических, физиологических и эстетических критериев;

$\gamma_c(T)$ — коэффициент условий работы, учитывающий нестандартные условия эксплуатации (механические повреждения, коррозионный износ, влияние низких или высоких температур и т.п.);

γ_{fd} и γ_{rd} — коэффициенты надежности модели, учитывающие неопределенность расчетной схемы и возможные неточности при определении усилий и перемещений конструкции, а также при определении несущей способности элемента.

В неравенстве (4.9) расчетное усилие, возникающее в конструктивном элементе при действии всех имеющихся нагрузок, сопоставляется с несущей способностью этого элемента. Неравенство (4.10) требует, чтобы расчетное значение перемещения выбранной точки конструкции от суммарного действия всех нагрузок не превышало установленного нормами граничного значения. В отдельных случаях предельные неравенства могут принимать другой вид. Так, например, в расчетах на выносливость срок службы конструкции учитывается при установлении расчетного сопротивления в зависимости от числа циклов нагружения, а при анализе процессов ползучести значение срока службы можно непосредственно вводить в расчетные формулы.

Расчетные значения нагрузок $F_i(T)$ и расчетные значения сопротивлений R должны нормироваться таким образом, чтобы при произвольных сроках службы T выполнение неравенств (4.9) и (4.10) обеспечивало некоторый заранее установленный уровень надежности, одинаковый для всех конструктивных элементов. Регулятором надежности при этом является коэффициент ответственности γ_n, значения которого выбираются в зависимости от уровня надежности P(T), необходимого для данного элемента. Сам уровень надежности P(T) устанавливается с учетом значимости элемента в составе несущей конструкции, а также назначения и степени ответственности этой конструкции и сооружения в целом. Такая схема регулирования надежности позволяет нормировать входящие в предельные неравенства расчетные параметры независимо от степени ответственности и схемы конструкции, учитывая эти факторы при определении необходимого уровня надежности конструктивных элементов P(T).

Коэффициент условий работы $\gamma_c(T)$ определяется таким образом, чтобы при произвольных сроках службы конструкции обеспечивалась равнонадежность элементов, эксплуатируемых в обычных и нестандартных условиях. Как правило, такие условия эксплуатации приводят к уменьшению несущей способности и жесткости элементов вследствие физического износа, в связи с чем коэффициент включается в правую часть неравенства (4.9) или в левую часть неравенства (4.10). Отметим, что для некоторых случаев коэффициент условий работы может не зависеть от срока службы.

4.5 Оптимальная обеспеченность расчетных нагрузок и расчетных сопротивлений материалов

Нормирование всех нагрузок с одинаковым уровнем обеспеченности и использование рекомендуемой действующими нормами системы расчетных коэффициентов надежности приводит к различной надежности конструкций, выполненных из различных материалов. Точное решение, гарантирующее равнонадежность конструкций, сводится к индивидуальному подбору расчетных значений нагрузок и несущих способностей для каждого частного случая, как предлагается в [17], [119]. Однако кроме практических затруднений в условиях обычного проектирования при этом во многом теряется привычный подход

метода расчетных предельных состояний, применение которого ориентировано на раздельное нормирование нагрузок и несущей способности.

Более реалистичным решением было бы установление ряда унифицированных уровней обеспеченности расчетных значений нагрузок и расчетных сопротивлений материалов, с использованием которых можно было бы добиться примерной равнонадежности. Ниже анализируется такая возможность, ориентированная на привычный подход, когда обеспеченность расчетного сопротивления зависит только от материала конструкции, а обеспеченность расчетной нагрузки — только от ее статистических характеристик.

Уровень надежности конструктивного элемента объективно определяется взаимным положением кривой распределения усилия в элементе и кривой распределения его несущей способности. При этом для заданного уровня надежности можно выбрать бесчисленное количество пар взаимозависимых расчетных значений. Мы попробуем осуществить этот выбор таким образом, чтобы разброс вероятностей отказа различных элементов был минимально возможным. При использовании закона Гумбеля для аппроксимации распределения максимумов нагрузки увеличение срока службы приводит к уменьшению коэффициента вариации нагрузки, максимальной за срок службы. Это позволяет заменить два параметра (срок службы и коэффициент вариации годичных максимумов) на один — коэффициент вариации максимума нагрузки за срок службы. Из формул (4.4) следует, что при коэффициентах вариации годичных максимумов от 0,1 до 1,0 и сроках службы от 5 до 200 лет коэффициент вариации максимума нагрузки за расчетный срок службы V_{qt} не превысит 0,5. Таким образом, будут варьироваться только два параметра — коэффициент вариации характеристики прочности материала V_r и коэффициент V_{qt}.

Задача решалась с минимизацией среднеквадратичного значения невязки уравнения

$$P = f(V_r, V_{qt}, b_r, b_q), \qquad (4.11)$$

с помощью которого связываются уровень надежности конструктивного элемента с коэффициентами вариации V_r и V_{qt}, а также с уровнями обеспеченности расчетных значений нагрузки b_q и несущей способности b_r. Отыскание значений неизвестных b_r и b_q, при которых разброс вероятностей отказов оказывается минимальным, реализовано методом случайного поиска.

Результаты расчетов приведены в табл. 4.13. Для каждого значения вероятности отказа в числителе приведены оптимальные нормированные уровни расчетного сопротивления t_r и расчетной нагрузки t_q, а в знаменателе — соответствующие обеспеченности b_r и b_q. Из табл. 4.13 видно, что для проектирования равнонадежных конструктивных элементов обеспеченности b_r и b_q должны возрастать с ростом необходимого уровня надежности элемента.

Оптимальные значения обеспеченности расчетных сопротивлений уменьшаются с увеличением коэффициента вариации прочности, а оптимальные

значения обеспеченности расчетной нагрузки, наоборот, возрастают с увеличением коэффициента вариации нагрузки. Максимальные ошибки проектирования, которые могут иметь место из-за унификации результатов, увеличиваются с ростом уровня требуемой надежности, изменяясь от 2,7% до 11,2%. Несмотря на относительно небольшое значение ошибки, можно все же рекомендовать для особо ответственных сооружений проведение индивидуальных надежностных обоснований.

Приведенные в табл. 4.13 обеспеченности расчетных сопротивлений существенно отличаются от величин, заложенных в нормах проектирования. Поскольку определение расчетных сопротивлений тесно связано с методами контроля в металлургии и промышленности строительных материалов и вряд ли можно надеяться на существенное изменение контрольных процедур, представляет интерес подсчет необходимого уровня обеспеченности нагрузок, при использовании ныне существующих параметров обеспеченности материалов.

Таблица 4.13

Заданная надежность	Максимальная ошибка	Обеспеченность прочности (t_r/b_r)			Обеспеченность нагрузок (t_q/b_q) при V, равном			
		Сталь	Бетон	Дерево	0,1	0,2	0,3	0,4
0,9	2,7	1,91 0,972	1,32 0,906	1,20 0,885	0,84 0,649	1,21 0,742	1,42 0,785	1,52 0,804
0,95	4,5	2,23 0,987	1,54 0,938	1,38 0,916	1,34 0,770	1,69 0,832	1,83 0,852	1,98 0,871
0,99	7,2	2,71 0,997	1,91 0,972	1,79 0,963	2,25 0,900	2,73 0,937	2,89 0,946	2,99 0,951
0,995	9,3	3,30 0,9995	2,28 0,989	2,07 0,981	2,37 0,911	2,76 0,939	3,03 0,953	3,20 0,960
0,999	11,2	4,07 0,9999	2,85 0,998	2,56 0,995	2,95 0,949	3,53 0,971	3,78 0,977	3,96 0,979

Для этого при заданных обеспеченностях расчетных сопротивлений сначала были определены соответствующие обеспеченности и нормируемые уровни расчетных нагрузок с усреднением по трем основным видам строительных материалов, а затем — ошибки, возникающие за счет замены точных значений расчетных нагрузок усредненными. Результаты приведены в табл. 4.14. Ошибки примерно в два раза превышают уровень, достигаемый при оптимальных значениях обеспеченностей расчетных сопротивлений.

Таблица 4.14

Заданная надежность	Максимальная ошибка	Обеспеченность расчетных нагрузок (t_q/b_q) при V, равном				
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
0,9	15,9	-2,10 0,001	-0,36 0,239	0,27 0,466	0,59 0,574	0,79 0,635
0,95	15,3	-1,31 0,025	0,21 0,445	0,79 0,635	1,09 0,714	1,28 0,757
0,99	13,9	0,58 0,571	1,57 0,812	2,01 0,875	2,27 0,902	2,44 0,917
0,995	13,0	1,48 0,796	2,22 0,897	2,60 0,928	2,84 0,943	2,99 0,951
0,999	13,7	3,98 0,981	4,05 0,983	4,25 0,986	4,40 0,988	4,51 0,989

Зависимости необходимой обеспеченности расчетных нагрузок от их коэффициента вариации (при оптимальных обеспеченностях прочности материалов и вероятности безотказной работы P = 0,99) показаны на рис. 4.7 (квадратики).



Рис.4.7. Зависимость обеспеченности от коэффициента вариации

Из рис. 4.7 видно, что такие зависимости могут хорошо описываться аналитическим выражением типа (линия)

$$P_q = V_q / (a + b V_q), \qquad (4.12)$$

в котором параметры $a = 0{,}0056$, $b = 1{,}036$ подобраны для случая использования оптимальных обеспеченностей прочности и $a = 0{,}069$, $b = 0{,}937$ — для случая традиционного нормирования прочности материалов.

Видно, что при небольших значениях V_q традиционная схема приводит к значительному снижению обеспеченностей нагрузок P_q, но при увеличении V_q значения P_q приближаются к тем, что получены для случая оптимальных обеспеченностей прочности материалов. Отметим также, что при выполнении оптимальных обеспеченностей прочности требуемая обеспеченность расчетной нагрузки настолько мало зависит от ее коэффициента вариации, что может быть установлена единой для всех нагрузок — $P_q \sim 0{,}94$.

4.6 Расчет на заданный уровень надежности

При проектировании конструктивных элементов их надежность может регулироваться путем выбора расчетных значений нагрузок и прочности материала с обеспеченностями, указанными в табл. 4.13 и 4.14, но для этого необходимо установить и ввести в нормы проектирования расчетные значения необходимых параметров для широкого спектра обеспеченностей. Более рациональна схема регулирования надежности с использованием коэффициента ответственности. Расчетные значения нагрузок $F_{0.99}$ и прочности материалов $R_{0.99}$ нормируются с обеспеченностями, отвечающими базовому уровню надежности $P(T) = 0{,}99$. Эти обеспеченности принимаются по табл. 4.13 и 4.14 или вычисляются по формуле (4.12). Коэффициент ответственности при этом должен быть таким, чтобы его использование в качестве множителя к левой части предельных неравенств (4.9) и (4.10) редуцировало установленные расчетные значения нагрузок $F_{0.99}$ и прочности материалов $R_{0.99}$ к значениям F_P и R_P, которые соответствуют необходимому уровню надежности конструктивного элемента P.

Исходя из этого коэффициент ответственности может быть установлен как отношение значений расчетных нагрузок и прочности, отвечающих уровням надежности с некоторым значением P и значением 0,99

$$\gamma_n = (F_P / F_{0.99})\,(R_{0.99} / R_p)\,. \qquad (4.13)$$

Величины, входящие в формулу (4.13), определяются через коэффициенты вариации V_q и V_r и расчетные значения нагрузок и сопротивлений F_{pn} и R_{pn} по формулам:

$$F_p = 1 - 0.45\,V_q + 0.78\,V_q\,F_{pn}; \qquad R_p = 1 - V_r\,R_{pn}, \qquad (4.14)$$

которые соответствуют распределениям Гумбеля и Гаусса и предполагают, что математические ожидания нагрузок и сопротивлений равны единице. Поскольку в выражение (4.13) входит отношение нагрузок и прочности, такое допущение не влияет на результат. При традиционном подходе к назначению расчетных сопротивлений формула (4.13) упрощается, поскольку $R_p = R_{0.99}$.

Результаты вычислений по формулам (4.13) и (4.14) для всех вариантов сочетания уровня надежности, материала и коэффициента вариации нагрузки

дают значения коэффициента ответственности γ_n, приведенные в табл. 4.15. При этом использованы традиционные и независящие от уровня надежности значения обеспеченностей расчетного сопротивления.

Как уже отмечалось, коэффициент ответственности зависит не только от заданного уровня надежности P, но и от коэффициента вариации нагрузки V_q. Эта зависимость может быть аппроксимирована выражением

$$\gamma_n = 0{,}6 + 0{,}2\,P_L - 0{,}8\,V_q + 0{,}4\,V_q P_L\,, \qquad (4.15)$$

где P_L - уровень надежности в Беллах. Ошибка аппроксимации не превышает 4,7%.

Таблица 4.15

Надежность элемента	Коэффициенты ответственности при V, равном					Значения γ_n
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	
0,900	0,791	0,739	0,695	0,657	0,627	0,702
0,950	0,853	0,816	0,786	0,759	0,738	0,790
0,990	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,995	1,070	1,088	1,103	1,116	1,124	1,100
0,999	1,265	1,335	1,393	1,435	1,468	1,379

Использование формулы (4.15) требует от проектировщика знания коэффициента вариации нагрузок, что не всегда выполнимо. Поэтому может применяться более грубый, но реалистичный способ нормирования коэффициента ответственности, который сводится к использованию средних значений γ_n в границах одного уровня надежности, которые приведены в последней графе табл. 4.15.

Поскольку при использовании оптимальных значений обеспеченности расчетных сопротивлений коэффициент γ_n зависит еще и от вида материала, то это следует учесть при подсчетах, результаты которых приведены в табл. 4.16. В ней также указаны средние в рамках одного уровня надежности значения γ_n, которые практически не отличаются от приведенных в табл. 4.15.

Окончательно можно рекомендовать величины, приведенные в табл. 4.17. Если необходимый уровень надежности конструктивных элементов выразить в Беллах P_L, то зависимость коэффициента надежности γ_n от логарифмического уровня надежности P_L принимает вид прямой линии (рис.4.8), которая хорошо аппроксимируется выражением

$$\gamma_n = 0{,}34 + 0{,}33\,P_L. \qquad (4.16)$$

Таблица 4.16

Надежность	Материал элемента	Коэффициенты ответственности при V, равном					Средние значения γ_n
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	
0,900	Сталь	0,818	0,760	0,718	0,683	0,651	
	Бетон	0,799	0,743	0,702	0,667	0,636	
	Дерево	0,747	0,695	0,656	0,624	0,595	0,699
0,950	Сталь	0,875	0,837	0,800	0,782	0,755	
	Бетон	0,860	0,823	0,786	0,769	0,742	
	Дерево	0,814	0,779	0,744	0,727	0,703	0,787
0,990	Сталь	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
	Бетон	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
	Дерево	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,995	Сталь	1,051	1,068	1,087	1,104	1,112	
	Бетон	1,059	1,076	1,095	1,112	1,120	
	Дерево	1,082	1,099	1,119	1,137	1,145	1,098
0,999	Сталь	1,193	1,270	1,318	1,362	1,384	
	Бетон	1,239	1,319	1,369	1,415	1,438	
	Дерево	1,351	1,438	1,493	1,543	1,568	1,380

Следует обратить внимание на то, что в рамках принятой системы регулирования надежности полной равнонадежности достичь не удается, хотя по сравнению с действующими нормами разброс значений вероятности отказа может быть существенно снижен. При этом в рамках двух порядков, т.е. при $1 < P_L < 3$ коэффициент надежности по назначению имеет более широкий диапазон изменения, чем это установлено нормами [86].

Таблица 4.17

Уровень надежности	$P_L = 1$	$P_L = 1,5$	$P_L = 2$	$P_L = 2,5$	$P_L = 3$
Значения коэффициента γ_n					
Вычисленные	0,700	0,789	1,000	1,099	1,380
Аппроксимация	0,670	0,769	1,000	1,099	1,330
Наибольшие отклонения вычисленных γ_n от средних значений, %					
Традиционных	12,7	8,0	0,0	2,7	8,3
Оптимальных	26,4	16,6	0,0	10,0	25,6

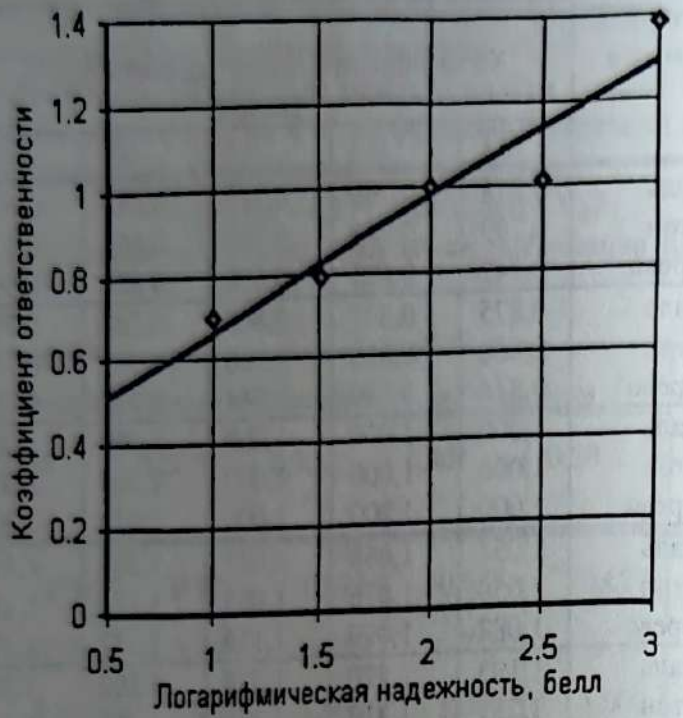


Рис.4.8. Зависимость γ_n от логарифмической надежности P_L

4.7 Надежность антисейсмической защиты зданий и сооружений

Фактическая надежность зданий и сооружений, вообще говоря, должна подтверждаться статистикой отказов, но для строительных объектов в целом такая статистика никем не ведется и именно поэтому возникает затронутая выше проблема оценки фактической надежности по данным специальных расчетов. Однако имеется область . инженерно-строительной деятельности, где фактические отказы изучаются систематически. Это инженерный анализ последствий разрушительных землетрясений. Поэтому ниже будут приведены некоторые накопленные данные о фактической величине сейсмического риска.

Для конкретности будет рассматриваться один из наиболее массовых объектов строительства — крупнопанельные жилые здания. В работе [122] представлены данные анализа последствий землетрясений различной интенсивности, перенесенных крупнопанельными зданиями за период около 20 лет. Фактическая повреждаемость характеризовалась в условных единицах по следующей шкале:

- 1— небольшие трещины в стенах, откалывание небольших кусков штукатурки (*легкие повреждения*);
- 2— небольшие трещины в стенах, небольшие трещины в стыках между панелями, откалывание значительных кусков штукатурки, падение черепицы

с крыши, трещины в дымовых трубах, падение частей дымовых труб (*умеренные повреждения*);

- 3 — большие, глубокие и сквозные трещины в стенах, значительные трещины в стыках между панелями, падение дымовых труб (*тяжелые повреждения*);
- 4 — обрушение внутренних стен и стен заполнения каркасов, проломы в стенах, обрушение частей зданий, разрушение связей между отдельными частями зданий (*разрушения*);
- 5 — полное разрушение зданий (*обвалы*).

Усредненные данные приведены в табл.4.18.

Таблица 4.18

Расчетная сейсмичность здания, баллы	Степень повреждения (условных единиц) при землетрясении силой, балл:		
	7	8	9
6	1,67	2,60	3,53
7	1,35	2,13	2,91
8	1,03	1,66	2,29
9	0,71	1,19	1,68

СНиП II-7-81 «Строительство в сейсмических районах» предусматривают при расчетной интенсивности воздействия степень повреждения, близкую к трем условным единицам. Если считать такие повреждения отказом, то найденные вероятности превышения этой границы (сейсмический риск) будут равны величинам, показанным в табл.4.19.

Таблица 4.19

Расчетная сейсмичность здания, балл	Сейсмический риск крупнопанельных зданий при интенсивности землетрясения, баллы:		
	7	8	9
6	0,008926	0,324092	0,654985
7	0,000163	0,112217	0,464014
8	0,000026	0,008179	0,178367
9	0,000025	0,000028	0,009722

Очевидно, что вероятность появления сейсмических повреждений зависит от срока службы здания. Некоторые из них, имеющие малый срок существования, вообще могут не подвергаться расчетным или близким к ним по интенсивности землетрясениям.

Чем меньше будет интервал между сильными землетрясениями $T_з$ по сравнению с расчетным сроком службы здания T_c, тем выше вероятность получить повреждения. Это схематично показано на рис.4.9, где по горизонтальной оси отложено время, а интенсивность землетрясения показана

высотой столбика. В промежутках между расчетными землетрясениями возможны землетрясения меньшей интенсивности.

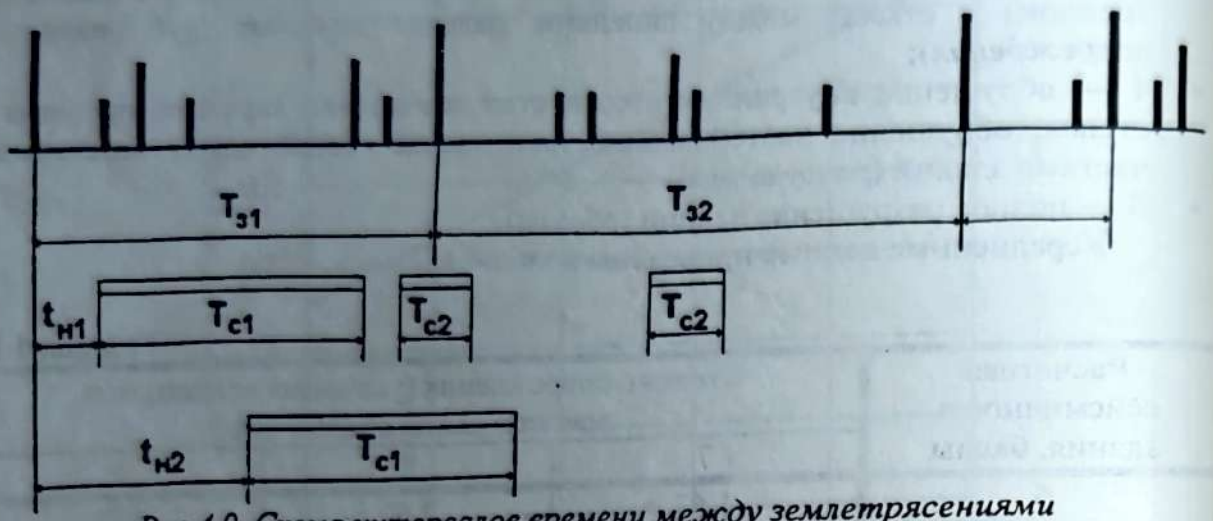


Рис.4.9. Схема интервалов времени между землетрясениями

Как видно из этой схемы, отношение среднего срока эксплуатации $\overline{T}_c$ к среднему промежутку времени между расчетными землетрясениями $\overline{T}_з$ хорошо отражает опасность реализации землетрясения в течение срока службы. Так, для сооружения со сроком службы T_{c1} эта опасность велика, а для сооружения со сроком службы T_{c2} — сравнительно мала.

Таблица 4.20

Среднегодовое количество землетрясений расчетной интенсивности в рассматриваемом регионе (индекс повторяемости)	Сейсмический риск крупнопанельных зданий при интенсивности землетрясения, баллы:		
	7	8	9
1,0000 (1)	0,000057	0,002797	0,002797
0,0010 (2)	0,000021	0,001022	0,001215
0,0001 (3)	0,000006	0,000242	0,000336

В то же время, если говорить о землетрясениях меньшей интенсивности, то они неизбежно реализуются, и для сооружения со сроком службы T_{c1} не один раз.

Для крупнопанельных зданий с T_c = 125 лет и с учетом среднегодового количества землетрясений различной интенсивности, соответствующей карте сейсмического районирования, были получены уточненные значения сейсмического риска в случае расположения здания в «своем» сейсмическом районе (табл.4.20). Сопоставляя значения сейсмического риска с данными

табл.4.6, мы видим, что по порядку чисел надежность столь различных конструкций совпадает.

В дополнение к сказанному необходимо отметить, что расчетный анализ сейсмического риска сам по себе недостаточен в силу той большой неопределенности сейсмологической информации, которая характерна для современного состояния науки. Ведь «сейсмостойкие» здания оказываются уязвимыми не только за счет небрежного исполнения, как это часто утверждается, но и при самом тщательном выполнении всех нормативных требований. И опыт катастрофических разрушений при землетрясениях 1999 года в Турции и на Тайване является тому свидетельством.

По данным, приведенным в работе А.А.Петрова [76], рекомендации нормативных документов расходятся с наблюдениями на порядки. Так при землетрясении в Нортридже, оценка балльности которого соответствовала 8 баллам по шкале ММ, были зарегистрированы пиковые ускорения грунта от 0,15g до 1,78 g, в то время как расчетное ускорение в СНиП II–78-81* для землетрясения в 8 баллов принимается равным 0,2g (принятая в СНиП шкала MSK близка к шкале ММ). Все это заставляет относиться с должной осторожностью к расчетам надежности и безопасности при сейсмических воздействиях и во многом полагаться не только на такие рачеты, но и на выработанный веками на основе метода проб и ошибок практический опыт применения конструктивных решений успешной сейсмозащиты зданий и сооружений [105].

Эффективность применения мер защиты, в частности мер сейсмозащиты, продемонстрировало землетрясение 1989 года в г. Лос-Анжелос, которое по силе не уступало Спитакскому, но не вызвало никаких разрушений сооружений при полном отсутствии человеческих жертв. А Спитакское землетрясение, обрушившееся на объекты, не защищенные в необходимой степени (добавим: и низкое качество строительных работ) унесло более 25000 жизней.

Такие сопоставления требуют проведения весьма тщательного инженерного анализа последствий землетрясений, который должен выявить удачные и неудачные конструктивные решения и дать возможность понять, почему расположенные рядом здания, запроектированные, кстати, с учетом рекомендаций антисейсмических норм, в одном случае прекрасно выдерживают землетрясение, а в другом — разрушаются (рис.4.10).



Рис.4.10. Разрушения при землетрясении на Тайване 21.09.99

По этому поводу имеются самые противоречивые точки зрения, одна из самых радикальных такова: «Причины недавних катастрофических разрушений "сейсмостойкой" застройки в Турции и на Тайване состоит в том, что официальная наука о сейсмике до сих пор не имеет достоверной информации о тех сейсмических воздействиях, которые разрушают здания и сооружения во время сильных землетрясений, и категорически отказывается признать реальность. ... Об этом свидетельствует множество очевидных фактов и явлений. Главные из них — необъяснимые перманентные разрушения

современных "сейсмостойких" зданий, происходящие вопреки всем нормам и расчетам, а также полное несоответствие формы всех видов сейсмических разрушений зданий тем низкочастотным колебаниям грунта, которое в течение последнего столетия официально считается единственной причиной разрушения зданий при землетрясениях» [105].

Таблица 4.21

Страна, местность	Землетрясения			
	дата	сила по шкале Рихтера, баллы	число погиб-ших	число раненых
Армения	07.12.89	6-7	25000	
Иран	21.06.90	7,7	40000	
Филиппины, о. Лусон	16.07.90	7,7	2610	3411
Афганистан и Пакистан	01.02.91	6,8	1500	
Индия, подножье Гималаев	20.10.91	6,1	1500	3000
Восточная Турция	13.03.92	6,8	653	700
Египет, район Каира	12.10.92	5,5	552	
Индонезия, о.Флорес	12.12.92	6,8	2000	
Индия, штат Махарашта	30.09.93	6,4	7601	
Колумбия	06.06.94	6,0	600	500
Алжир, район Маскара	18.08.94	5,4	171	289
Япония, Кобе-Осака	17.01.95	7,2	6424	
Россия, Нефтегорск	27.05.95	7,5	1841	
Иран, Эрдебиль	27.02.97	5,5	1100	2600
Афганистан, провинция Тахар	04.02.98	6,4	4000	
Афганистан, северо-восток	30.05.98	7,1	5000	
Колумбия	25.01.99	6,0	1100	
Турция, район Измира	17.08.99	7,4	15613	24941
Греция, Афины	07.09.99	5,9	138	
Тайвань	21.09.99	7,3	2000	5000
Турция, Мармарис	05.10.99	5,2	2	100

Можно по-разному относиться к таким мнениям, но нужно помнить, что сейсмическая опасность слишком серьезна, чтобы пренебрегать любыми возможностями ее уточнения. Будем помнить, что за последний век жертвами землетрясений стало около миллиона человек, а о местах и параметрах наиболее сильных землетрясений конца XX века свидетельствуют данные табл.4.21.

4.8 О надежности распределенных систем

Анализ надежности распределенных объектов, таких, как линии электропередачи, системы трубопроводного транспорта и т.п., имеет определенные особенности. Широко комментировавшаяся в прессе и в специальной литературе авария, случившаяся на восточном побережье США в конце 1980-х годов, привела к отключению электроэнергии миллионам потребителей, а ткже к целому ряду других негативных последствий. Менее известна так называемая башкирская авария (1960-е годы), где поваленные гололедом десятки километров линий электропередачи надолго вывели из строя большой нефтедобывающий район.

Эти аварии продемонстрировали некоторые особенности сетевых систем — возможность широкого распространения и взаимосвязи последствий, которые возникают даже при локальном повреждении. Особенно остро негативные последствия такого типа аварий проявляются тогда, когда причина разрушения является распределенной, как, например, при прохождении штормового ветра или выпадении гололеда, реализуемых на значительных территориях.

В табл.4.22 приведены данные о воздействии четырех крупных штормов, происшедших на территории США в 1995 и 1996 годах, на системы электропередачи, а в табл. 4.23 указывается наблюдавшийся характер разрушений, выявляющий наиболее слабые звенья систем такого типа [153].

Таблица 4.22

Показатели	Шторм, происшедший			
	1/93	11/95	11/96	12/96
Общая продолжительность в часах	63,08	12,72	30,00	143,65
Общее число потребителей энергии	344000	365475	348296	348296
Количество подводящих линий	107	12	39	34
Доля поврежденных подводящих линий	0,459	0,052	0,167	0,146
Минимальная температура, С°	-1,12	7,84	-2,24	-2,8
Максимальные суточные осадки, см	2,032	0,4318	1,1176	6,985
Максимальная скорость ветра при 2-х минутном осреднении, м/с	20,54	16,55	9,7	9,7
Скорость ветра в 5-секундном порыве, м/с	31,31	19,01	13,12	15,98
SAIDI, час/год	26,96	29,31	36,3	36,3
SAIDI, отключений/год	0,28	0,32	0,57	0,57

Обозначения: SAIFI = Суммарное число минут отключения, приходящееся на одного потребителя; SAIDI = Суммарное число отключений, приходящееся на одного потребителя

Таблица 4.23

Тип отказа	Доля, %
Паление провода, %	21
Разрушение опор, %	38
Не установлено, %	4
Другие, %	26
Срабатывание предохранителей, %	7
Скольжение в зажимах, %	4

В русле направленности настоящей книги наибольший интерес представляет статистика отказов опор линий электропередачи, занимающая заметное место в структуре аварийности систем электроснабжения. Применительно к условиям Украины эта проблема была достаточно детально изучена в работе [81], откуда заимствованы табл. 4.24, 4.25 и 4.26. Представленные в них данные дают четкую направленность работам по повышению надежности соответствующих конструкций. В частности, хорошо видна проблема более строгого нормирования нагрузок и воздействий или повышения качества эксплуатации.

Таблица 4.25

Причины отказов	Распределение отказов по видам опор, %		
	металлические	железобетонные	деревянные
Нагрузки и воздействия, всего	47,0	71,7	57,2
В том числе:			
ветер выше расчетного	33,7	31,7	52,2
гололед выше расчетного	—	—	—
нерасчетная комбинация гололеда и ветра	13,2	40,0	5,0
Качество, всего	36,1	28,3	42,3
В том числе:			
проектирования	2,5	0,1	0,3
материала	1,2	—	—
изготовления	4,2	—	—
монтажа	12,2	—	0,3
эксплуатации	16,0	28,2	41,7
Разбор конструкций посторонними лицами	16,9	—	0,2
Другие	—	—	0,3

Распределение числа отказов по типам опор, используемым конструктивным схемам и типам конструктивного решения ствола (табл.4.25)

примерно соответствует числу опор рассматриваемой конструкции. Таким образом, здесь не просматриваются ярко выраженные преимущества тех или иных конструктивных подходов, или же сугубо непригодные варианты решений.

Более информативными являются данные о повреждаемости отдельных конструктивных элементов опор (табл.4.26). Из этих данных достаточно четко видны слабые места используемых конструкций, что служит хорошим указателем для концентрации усилий исследователей, инженеров-проектировщиков, изготовителей конструкций и эксплуатационного персонала. Для последних статистика такого рода даст информацию о распределении усилий при выборочном контроле эксплуатируемых объектов и организации работ по надзору и уходу.

Таблица 4.25

Тип опоры	Схема	Конструкция ствола	К-во отказов	Проц.
Промежуточные	Свободно-стоящие	Одностоечные	521	67,93
		Портальные	72	9,39
		А-образные	3	0,39
	На оттяжках	Одностоечные	16	2,09
		Портальные	25	3,26
		А-образные	—	—
Анкерные	Свободно-стоящие	Одностоечные	35	4,56
		Портальные	2	0,26
		А-образные	19	2,48
Анкерно-угловые	Свободно-стоящие	Одностоечные	33	4,30
		Портальные	31	4,04
		А-образные	5	0,65
	На оттяжках	Одностоечные	—	—
		Портальные	5	0,65
		А-образные	—	—
		Всего	767	100,00

Таблица 4.26

Конструктивный элемент, где произошел отказ	Полное разрушение		Частичное разрушение	
	К-во	%	К-во	%
Ствол	433	59,06	86	11,21
Траверса	13	1,69	21	2,74
Тросостойка	8	1,04	2	0,26
Узел крепления ствола к фундаменту	76	9,91	23	3,00
Узел соединения секций ствола	34	4,43	7	0,91
Узел крепления траверсы	2	0,26	—	—
Узел крепления изоляторов к траверсе	25	3,26	1	0,13
Узел крепления троса к тросостойке	4	0,52	2	0,26
Оттяжка	4	0,52	2	0,26
Анкерное закрепление оттяжки	4	0,52	—	—
Всего	624	81,36	143	18,64

5. Поддержание надежности

... процесс эксплуатации системы есть перманентный эксперимент, который в сочетании с интуицией эксплуатационного персонала и простейшими расчетами указывает стратегию поведения, хотя и не оптимальную, но часто близкую к ней.

Н.А.Картвелишвили, Ю.И.Галактионов

5.1 Изменение технического состояния на различных этапах жизненного цикла

Физический износ конструкций и их нагружение являются процессами, протекающими во времени, поэтому меняются и возможные оценки технического состояния объектов. На рис. 5.1 схематично показан процесс исчерпания работоспособности конструкций [54], [73] в виде функции, характеризующей, например, прочность конструкции.

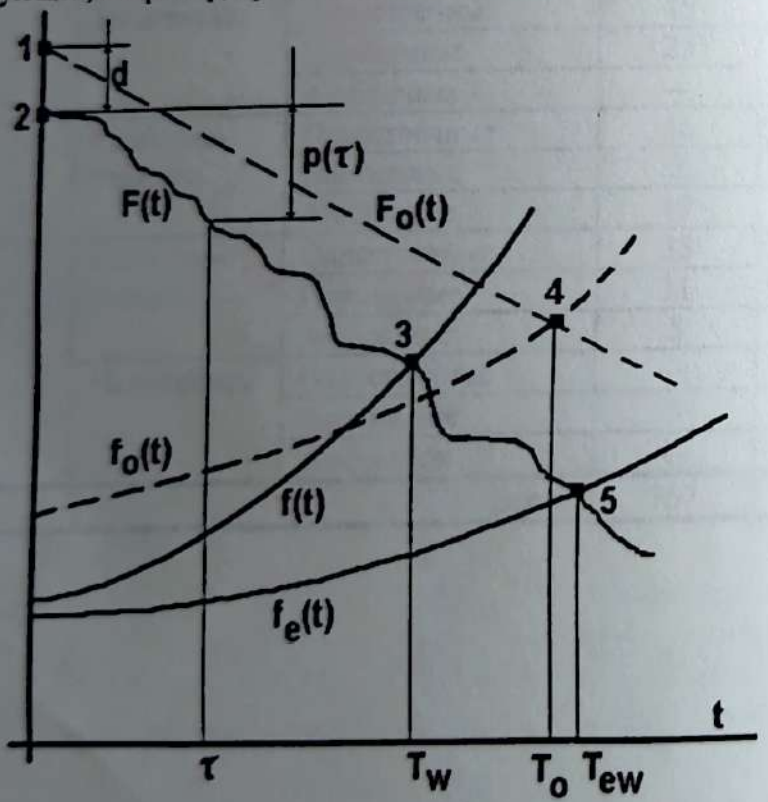


Рис.5.1. Изменение работоспособности объекта

На рис. 5.1 обозначены: F_o — прогнозная кривая, принимаемая во внимание проектировщиком конструкции (чаще всего предполагается линейное убывание несущей способности); F — фактическая реализуемая кривая

снижения несущей способности; f_o — прогнозная кривая спроса на несущую способность с учетом роста производства (например, с учетом требуемого роста грузоподъемности кранового оборудования); f и f_e — фактические кривые изменения спроса на несущую способность при реальных изменениях производства, соответственно, без учета и с учетом ограничений на режимы эксплуатации; $p(t) = F(t) - F(0)$ — процесс развития повреждений.

Характерными точками и моментами времени являются: 1 — исправное (проектное) состояние, соответствующее началу отсчета времени; 2 — фактическое начальное состояние с учетом возможного существования дефектов $d = F(0) - F_o(0)$; 3 — точка пересечения кривых F(t) и f(t), характеризующая момент времени T_w, когда исчерпана работоспособность; 4 — точка, характеризующая предсказываемую проектом длительность эксплуатации T_o и, наконец, 5 — точка пересечения кривых F(t) и $f_e(t)$, характеризующая момент времени T_{ew}, когда исчерпана работоспособность и при ограничениях на режим использования объекта. На рис. 5.1 моменты времени T_w и T_{ew} оказались соответственно меньшими и большими , чем расчетный срок эксплуатации T_o, но это необязательно наблюдается во всех случаях.



Рис.5.2. Схема возможных действий после оценки технического состояния

В процессе жизни объекта меняется и его техническое состояние, которое надлежит оценивать путем проведения регулярных обследований. В общем случае возможные решения, которые могут быть приняты после такой оценки, сводится к следующему перечню:

- продолжение эксплуатации;
- эксплуатация с ограничением срока и (или) способа использования конструкции;
- усиление, ремонт, восстановление служебных свойств;
- демонтаж, замена.

Соответствующая схема переходов показана на рис.5.2. Специалист, принимающий решение, выбирает тот или иной вариант с учетом ответственности объекта и необходимых затрат на обеспечение надежности.

Принципиально важным является положение, зафиксированное в нормах [28] и допускающее при восстановлении (капитальном ремонте, реконструкции) добиваться только работоспособного состояния. Особенно остро эта проблема стоит в тех случаях, когда конструкция запроектирована и выполнена в соответствии с ранее действовавшими, а ныне отмененными нормами. Привести такую конструкцию в исправное состояния зачастую принципиально невозможно (простейший пример — изменилась модульная система).

5.2 Повреждаемость основных несущих конструкций

Полные обрушения конструкций, к счастью, являются относительно редкими событиями. Однако наблюдается огромное количество неработоспособных состояний отдельных конструктивных элементов зданий и сооружений, когда только благоприятное стечение обстоятельств или другие случайные факторы не дали развиться катастрофическому разрушению.

Таблица 5.1

Отрасль промышленности	К-во объек-тов	Число ферм		
		Всего	С дефектами и повреждениями	
			шт.	%
Машиностроение	15	1074	419	39,0
Черная металлургия	18	1170	463	39,6
Цветная металлургия	4	336	117	34,8
Судостроение	6	243	101	41,5
Энергетика	3	262	84	32,1
Всего	46	3085	1184	38,4

Огромный объем данных с результатами обследований существующих конструкций дает богатейший материал для изучения процесса повреждаемости конструкций и выработки мероприятий по повышению их безотказности и долговечности. Так, в институте УкрНИИпроектстальконструкция было предпринято обобщающее исследование повреждаемости покрытий производственных зданий различных отраслей промышленности [53]. Некоторые из полученных данных по основным отраслям промышленности (46 объектов) приведены в табл. 5.1.

Как видно из представленных материалов, относительное число ферм с дефектами и повреждениями весьма значительно и мало меняется для зданий различных отраслей промышленности. Все эти сведения относятся к эксплуатируемым объектам постройки 1947-1965 гг., на которых не было аварий с обрушениями.

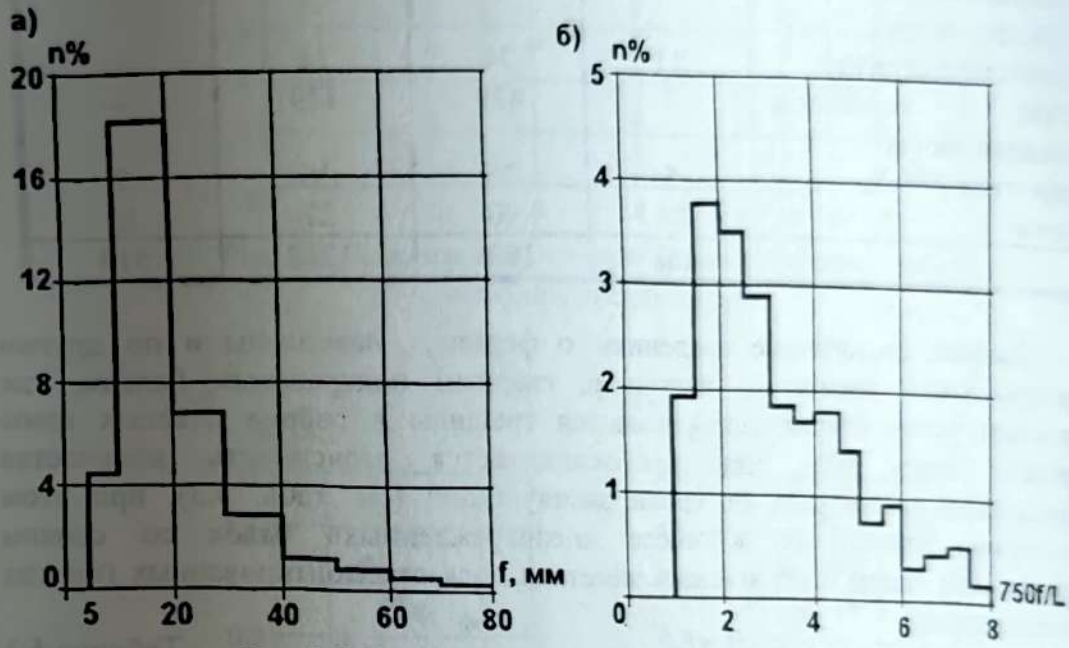


Рис.5.1. Распределение погнутостей элементов ферм

Основным видом обнаруженных дефектов была общая погнутость стержней — 64,2%. Другие дефекты конструкции ферм определяются следующей повторяемостью: местные искривления и вмятины — 12,1%; повреждения болтовых соединений — 9,9%; дефекты сварных швов — 7,2%; закручивания сечений — 3,4%; отсутствие элементов решетки или связей — 3,2%. Данные об обнаруженных при обследованиях сверхнормативных погнутостях элементов ферм в абсолютных значениях стрелки погиба и в относительных единицах по сравнению с допустимым значением f/L = 1/750 представлены на рис.5.1.

Аварийность исследовалась по материалам актов расследования причин аварий и отчетам о специально проведенных послеаварийных обследованиях на 151 объекте. Данные представлены в табл. 5.2. На этих объектах 1318 ферм обрушились, а 513 были временно , до принятия решения о возможности их дальнейшего использования, выведены из эксплуатации.

Таблица 5.2.

Отрасль промышленности	К-во объектов	Всего ферм	В том числе	
			обрушились	не обрушились
Черная металлургия	47	661	281	380
Машиностроение	29	236	228	8
Промышленность стройматериалов	28	298	193	105
Цветная металлургия	11	74	74	—
Легкая и химическая промышленность	7	479	479	—
Энергетика	5	36	36	7
Прочие	24	40	27	13
Всего	151	1831	1318	513

Данные, аналогичные сведениям о фермах, накоплены и по другим конструктивным элементам, например, сварным подкрановым балкам, где основным типом повреждения являются трещины в районе поясных швов верхнего пояса [80]. Четко прослеживается зависимость количества повреждений такого рода от срока эксплуатации (см. табл. 5.3), при этом необходимо учесть, что в числе «неповрежденных» балок со сроком эксплуатации свыше 5 лет имелась заметная доля отремонтированных (иногда неоднократно).

Таблица 5.3

Срок эксплуатации, лет	К-во балок, шт.		Проц. поврежденных балок
	обследованных	поврежденных	
1-3	29	4	14
4-6	70	12	17
10-12	105	64	61
20-22	62	45	73

Дефекты и повреждения возникают как на стадии изготовления и монтажа конструкций, так и в процессе их эксплуатации. При этом дефекты изготовления и монтажа чаще всего на стадии эксплуатации получают дальнейшее развитие, суммируясь с повреждениями, характерными только для эксплуатационной стадии. Характерные сведения об изменениях, происходящих в процессе эксплуатации, отражены на рис.5.2 и 5.3, где обнаруженные дефекты и повреждения представлены относительными (по сравнению с регламентированными нормами) значениями.

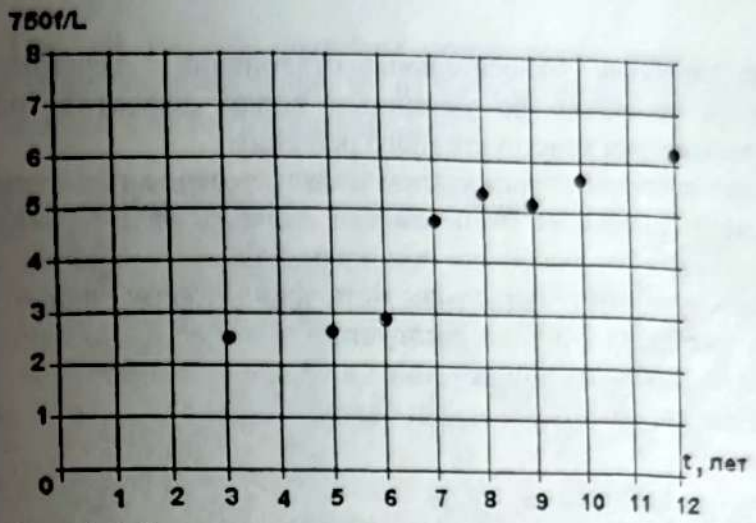


Рис.5.2. Зависимость относительных стрелок погиба от срока эксплуатации

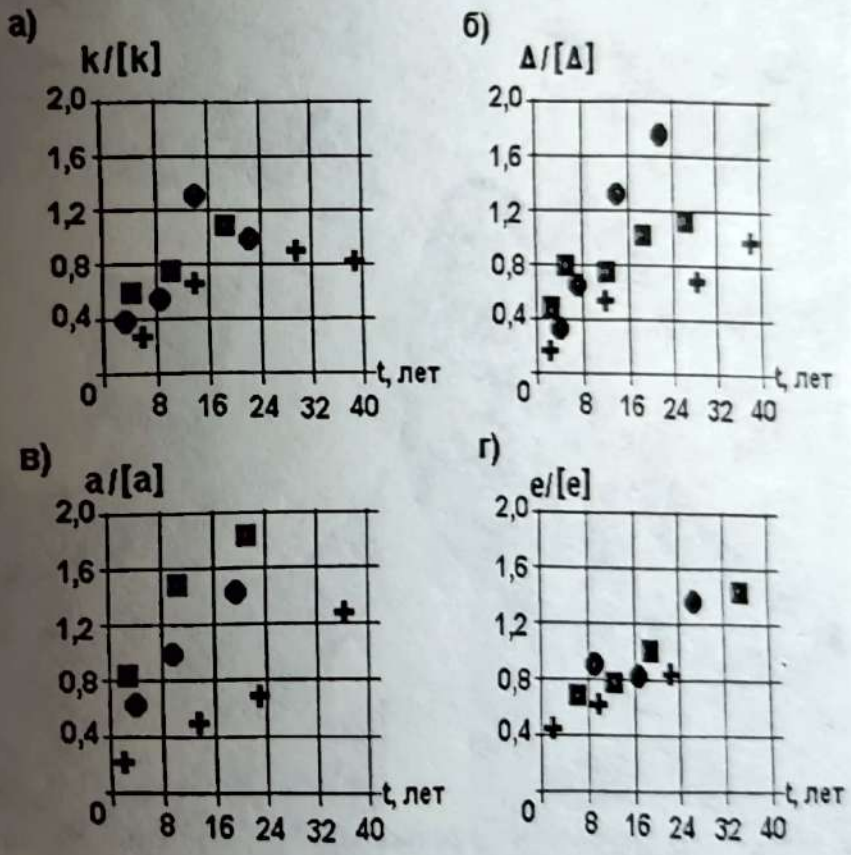


Рис.5.3. Ухудшение состояния подкрановых путей: а — продольные уклоны; б — разности отметок в поперечнике; в — сужение и расширение колеи; г — эксцентриситет рельса (кружок — весьма тяжелый режим работы, квадратик — тяжелый режим, крестик — средний режим)

Замечено нарастание относительных отклонений с течением времени, и оно наблюдается не только по указанным видам дефектов, но и по всем проверяемым параметрам конструктивного решения.

Весьма характерным повреждением является износ подкрановых рельсов (рис.5.4), который приводит к значительным издержкам при замене рельсов и катков мостовых кранов, особенно при кранах с весьма тяжелым режимом работы. По данным работы [98], расходы металла на замену рельсов в некоторых производствах уже через 2-3 года эксплуатации могут быть сопоставимыми с массой металла подкрановых конструкций , в то время как первоначальная масса рельсов составляет только 10-15% массы балок.

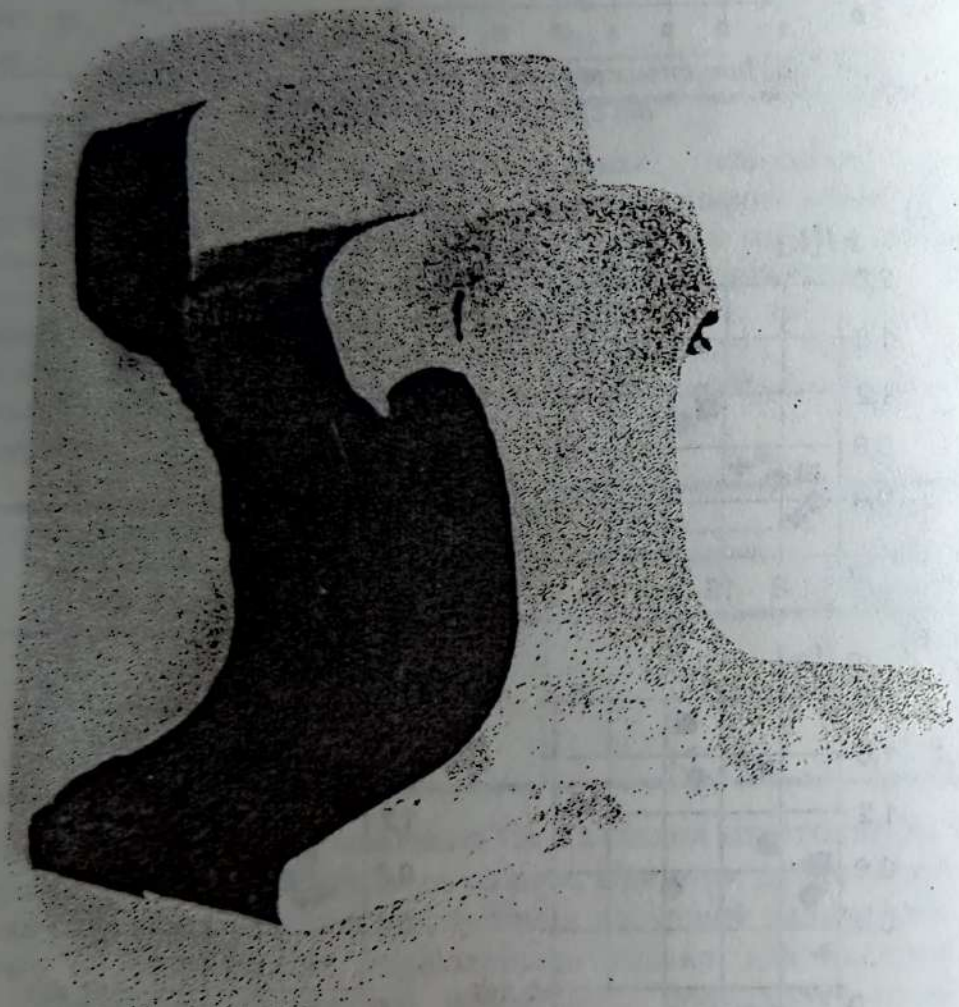


Рис.5.4. Срез изношенного рельса КР-80 после семи месяцев работы в режимной группе кранов 7К (на заднем плане — срез неизношенного рельса)

Следует отметить, что многие из обнаруживаемых при обследованиях повреждения представляют непосредственную опасность катастрофического

разрушения. Так, на рис.5.5 показаны повреждения стальных конструкций, практически полностью выводящие их из работы. Менее заметны, но не менее опасны повреждения в виде трещин (рис.5.6).

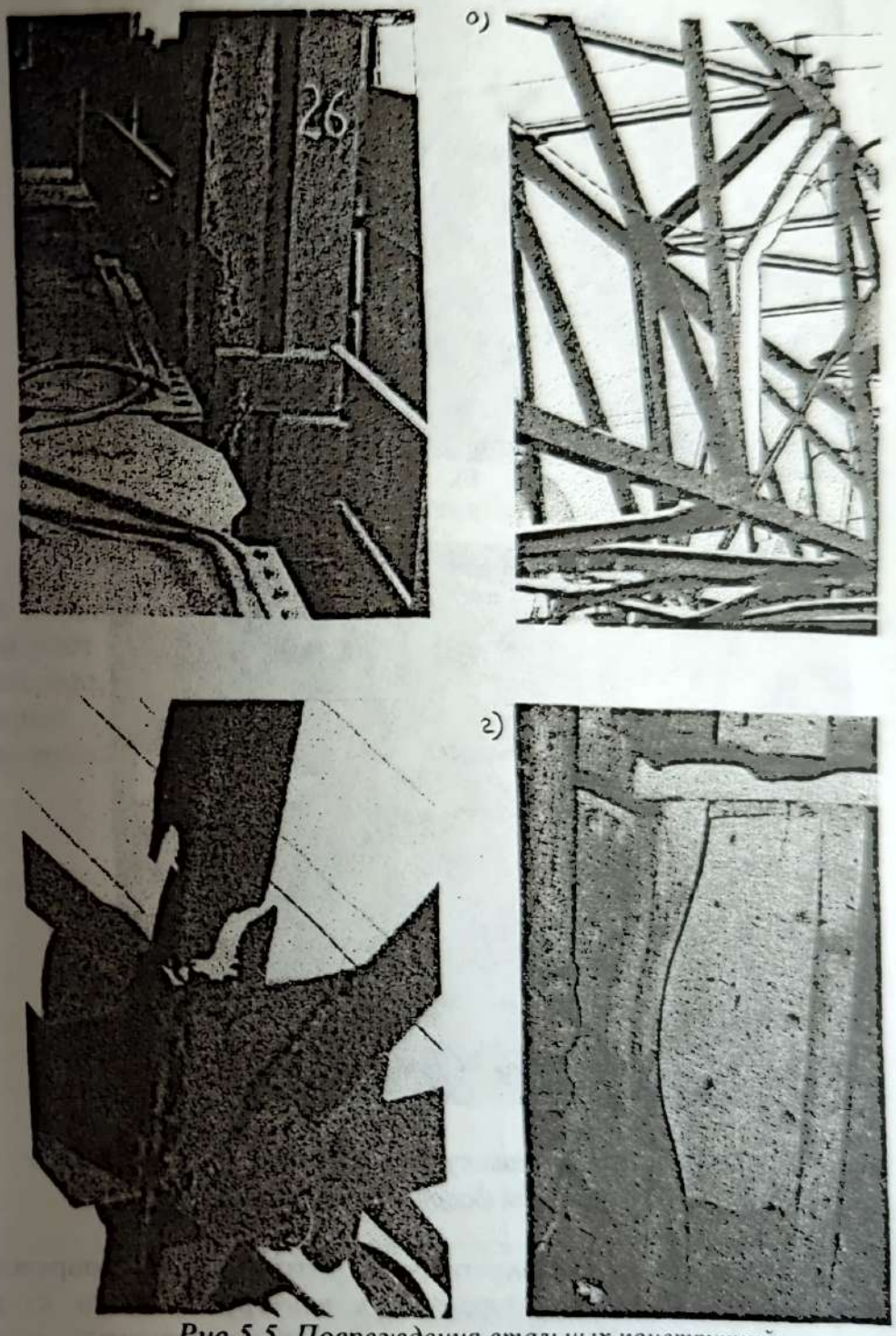


Рис.5.5. Повреждения стальных конструкций:
а — вырез в верхней части колонны; б — общее искривление элемента фермы; в — сквозная коррозия; г — местные погибы полки колонны

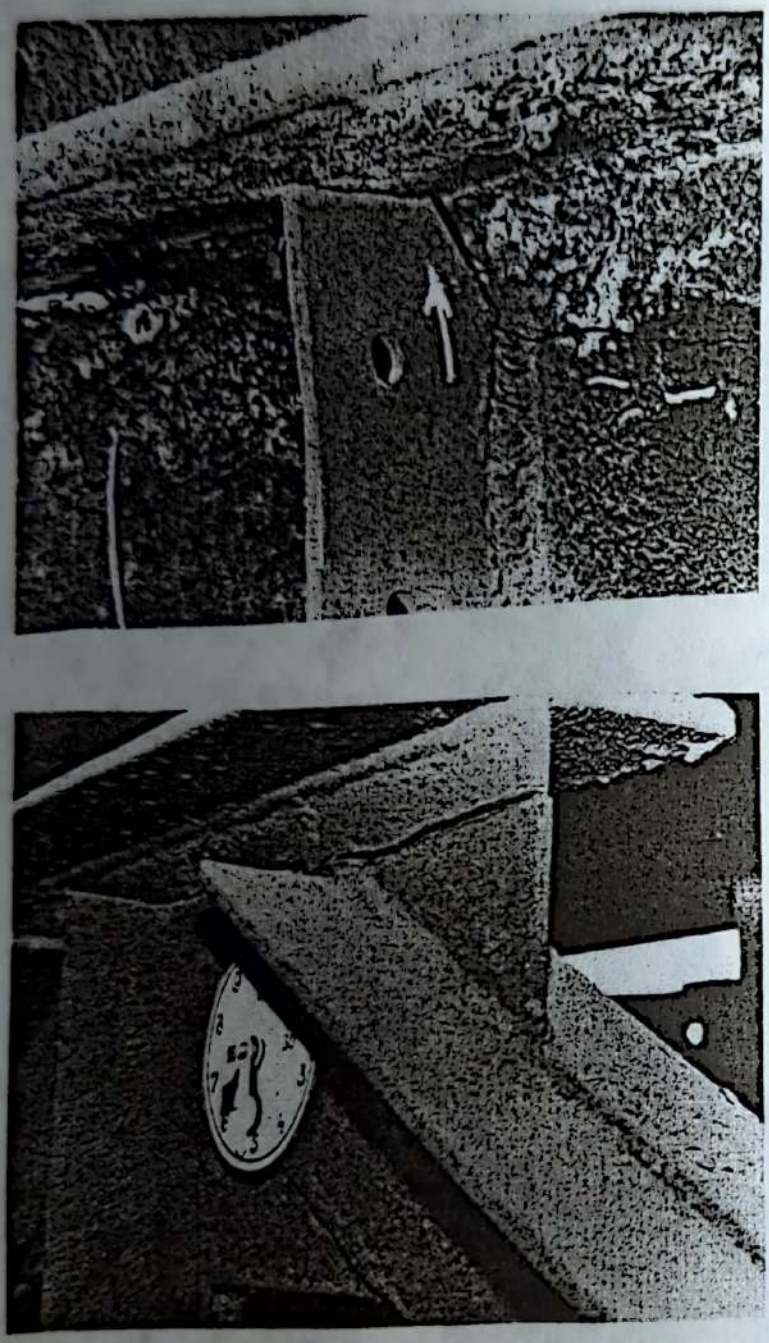


Рис.5.6. Трещины в месте примыкания ребра к верхнему поясу балки и в узловой фасонке

К сожалению, приходится констатировать, что многие повреждения являются следствием безобразного отношения к конструкциям со стороны эксплуатирующего персонала. Нередки случаи подвески непроектных грузов к фермам покрытий (например, при ремонте мостовых кранов), вырезы «мешающих» элементов, перегрузка конструкций промышленной пылью и др.



Рис.5.7. Снижение ударной вязкости металла газопроводов

В заключение этого раздела необходимо отметить, что наблюдаемый во времени рост числа повреждений связан и с физическим старением материалов. К сожалению, этот фактор не всегда учитывается в должной мере, хотя имеются достоверно установленные факты такого старения, и выявлены многие закономерности протекания деструкционных процессов.



Рис.5.8. Снижение относительного удлинения стали 09Г2С

Так, например, для различных марок стали, применяемых при строительстве магистральных трубопроводов, были установлены закономерности снижения ударной вязкости (рис.5.7) и относительного удлинения (рис.5.8) от срока эксплуатации, дающие основания прогнозировать средний срок эксплуатации таких объектов в пределах 40÷60 лет [65].

5.3 Оценка качества работ на монтаже

Массовая проверка качества монтажных работ, проведенная в организациях бывшего Минмонтажспецстроя Украины на 498 объектах строительства дала большой фактический материал о состоянии качества конструкций и выявленных дефектах. Наиболее характерные нарушения, наблюдаемые при поставке стальных и сборных железобетонных конструкций, отражены в табл.5.4. Они свидетельствуют о том, что на монтаж иногда поступают бракованные конструкции, требующие замены или ремонта.

В большинстве случаев на обследованных объектах недостатки и нарушения при поставке конструкций грозили потерей несущей способности (70%), возможной потерей устойчивости (55%), увеличением трудоемкости и материалоемкости (30%).

Многочисленные нарушения допускаются и при монтаже стальных и сборных железобетонных конструкций (табл. 5.5), которые составляют более 50% случаев от общего числа зарегистрированных нарушений. При этом основное количество нарушений относится к реализации узлов сопряжения и опирания.

Таблица 5.4

Характерные нарушения при поставке на монтаж	Удельный вес (%) для	
	стальных конструкций	сборного железобетона
Отсутствие документов, удостоверяющих качество	-	8
Некомплектность поставки	13	9
Отсутствие закладных частей	-	18
Отклонения в геометрии	27	36
Повреждения антикоррозионной защиты	39	14
Неполная заводская готовность	8	-
Непроектные узлы и соединения	6	-
Прочие нарушения	7	15
Итого	100	100

Представленные выше данные характеризовали качество по отдельным параметрам и только в «черно-белом» измерении «имеются нарушения — не имеется никаких нарушений», поскольку не разработана методика комплексной

оценки. Ниже мы попробуем представить возможный подход к созданию такой методики.

Таблица 5.5

Характерные нарушения при монтаже	Конструкции			
	Стальные		Железобетонные	
	нарушений	%	нарушений	%
Повреждения элементов	209	16,24	765	15,98
Дефекты узла опирания	153	11,89	351	7,33
Несоответствие сопряжения проекту	251	19,50	1038	21,68
Дефекты монтажной сварки	134	10,41	528	11,03
Пропуск соединений	44	3,42	102	2,13
Перекосы и смещения	96	7,46	484	10,12
Отсутствие антикоррозионной защиты монтажных узлов и соединений	253	19,67	685	14,31
Пропуск элементов	67	5,20	32	0,67
Отсутствие замоноличивания и подливки	26	2,02	587	12,26
Прочие нарушения	54	4,19	215	4,49
Всего	1287	100,00	4787	100,00

Контроль качества конструкции и оценка ее состояния обычно выполняется по многим параметрам, для каждого из которых установлен свой коридор допустимых значений. Если требуется построить некую обобщенную оценку, то возникает необходимость введения весовых коэффициентов для свертки отдельных контролируемых параметров в интегральный критерий качества. Значения весовых коэффициентов характеризуют (должны характеризовать) важность соответствующих параметров для физической сущности рассматриваемой задачи. Однако важность зачастую не поддается объективной оценке, что ставит практически непреодолимую преграду на этом способе интеграции.

Одним из возможных выходов из указанного противоречия может служить представленный ниже подход, основанный на использовании представления об энтропии. Пусть состояние конструкции описывается k-мерным вектором параметров $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_k\}$, тогда в k-мерном пространстве параметров каждому из различимых состояний конструкции соответствует определенное состояние энтропии. Если считать, что достижение допустимого предела по любому из параметров соответствует критическому уровню качества конструкции, даже при номинальных значениях прочих параметров, то

энтропию, соответствующую граничной точке, принимаем в качестве обобщенного критерия оценки качества.

Энтропия определяется числом возможных состояний объекта N и вероятностью их появления p_i

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log(p_i). \qquad (5.1)$$

Предполагая, что вероятности появления ошибки по любому параметру одинаковы, получим, что $H(X) = \log(N)$. В рамках рассматриваемой задачи количество возможных состояний определяется числом контролируемых параметров и числом различимых интервалов n, выделяемых каждому параметру. Последнее число определяется применяемыми способами измерений и является метрологической характеристикой контроля, для i-го параметра оно равно $n_i = \Delta a_i / \delta_i$, где Δa_i — область допустимых значений i-го параметра, а δ_i — погрешность измерения этого параметра. Для уравнивания информационной значимости параметров можно принять равное количество интервалов $n_0 = \min(n_i)$, и с учетом возможности представления граничного значения будем иметь $n = n_0 + 1$.

Общее число возможных состояний конструкции оказывается равным $N = n^k$ и ему соответствует энтропия $H_o(X) = \log(n^k)$. Если при контроле оказалось, что текущее состояние i-го параметра характеризуется уровнем n_{ti}, то текущее значение энтропии, которое служит интегральным показателем качества, равно

$$H_t(X) = \log \prod_{i=1}^{k} (n - n_{ti}). \qquad (5.2)$$

Этот показатель следует сравнивать с предельным значением, в качестве которого принимается состояние, когда один из параметров достиг своего предельно допустимого отклонения, а прочие — имеют номинальные значения. В этом случае число возможных состояний $N_{lim} = (n - n_0)n^{k-1} = n^{k-1}$ и величина энтропии

$$H_{lim}(X) = \log(n^{k-1}). \qquad (5.3)$$

Если $H_t(X) > H_{lim}(X)$, то конструкция удовлетворяет требованиям качества.

Если, например, мы оцениваем конструктивный элемент, для которого установлено допустимое искривление со стрелкой 3 мм и допустимое отклонение по длине 10 мм, то при использовании мерительной линейки с ценой деления 1 мм будем иметь погрешность измерения равную половине цены деления $\delta = 0{,}5$ мм, $n_{01} = 3/0{,}5 = 6$; $n_{02} = 10/0{,}5 = 20$; $n_0 = 6$; $n = n_0 + 1 = 7$. Устанавливаем для каждого параметра интервал нечувствительности конструкции к изменению этого параметра — $D_1 = 3/6 = 0{,}5$ мм, $D_2 = 10/6 = 1{,}7$ мм. Пусть измеренные значения оказались равными $a_{t1} = 2{,}5$ мм и $a_{t2} = 5{,}1$ мм, тогда измерения, переводятся в интервалы следующим образом $n_{t1} = 2{,}5/0{,}5 = 5$ и $n_{t2} = 5{,}1/1{,}7 = 3$. По формуле (5.2) имеем $H_t(X) = \log[(7 - 5)(7 - 3)] = 0{,}903$, а $H_{lim}(X) = \log 7^{(2-1)} = 0{,}845$.

5.4 Закономерности износа

Предпринимались попытки исследований закономерностей износа целых зданий и сооружений. Так, в работе [124] приводятся обобщающие данные об отношении Z веса истраченной на ремонты стали к первоначальному весу металлоконструкций по данным обследований 100 пролетов двадцати цеховых зданий разных лет постройки, принадлежащих Магнитогорскому металлургическому комбинату (ММК), Челябинскому металлургическому комбинату (ЧМК) и другим заводам Урала (рис. 5.9).

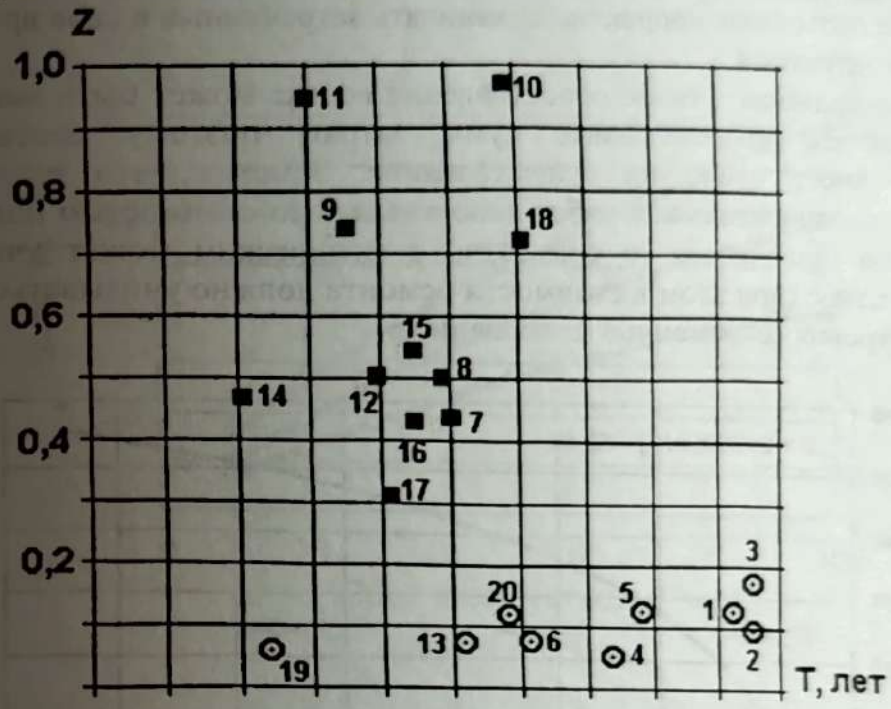


Рис.5.9. Износ зданий металлургической промышленности (в скобках — год постройки):

1 — мартеновский цех, Лисва (1900); 2 — колесопрокатный цех, Выксун (1898); 3 — прокатный цех, Верхняя Салда (1899); 4 — прокатный цех, Златоуст (1915); 5 — мартеновский цех, Верх-Исеть (1912); 6 — мартеновский цех ММК (1930); 7 — обжимной цех №3 ММК (1941); 8 — стрипперное отделение ММК (1942); 9 — цех изложниц ММК (1954); 10 — обжимной цех №2 ММК (1933); 11 — слябинг ММК (1959); 12 — листопрокатный цех №2 ММК (1951); 13 — кузнечный цех ММК (1939); 14 — обжимной цех №3 ЧМК (1968); 15 — мартеновский цех №2 ЧМК (1945); 16 — мартеновский цех №1 ЧМК (1942); 17 — мартеновский цех №1 ММК (1952); 18 — рельсобалочный цех, Нижний Тагил (1932); 19 — термический цех ЧМК (1965); 20 — мартеновский цех, Нижний Тагил (1944)

Бросается в глаза разница между зданиями, в которых подкрановая эстакада отделена от других конструкций (светлые кружки) и зданиями с совмещенным каркасом (квадраты). Относительный вес «ремонтной стали» Z является некоторым обобщенным показателем износа для стальных конструкций объектов примерно одинакового назначения. Он далеко не универсален и не

решает проблему оценки объектов другого типа. На важность поиска более универсального подхода указывал Н.С. Стрелецкий, который писал : «Отсутствие измерителя повреждений затрудняет практическую реализацию и эта важнейшая отрасль методики расчета по предельным состояниям находится в зачаточном состоянии» [112].

Достаточно общим показателем износа может служить стоимость ремонтно-восстановительных работ, отнесенная к первоначальной стоимости объекта, хотя здесь и появляется сильно мешающий фактор — инфляционные процессы не позволяют корректно сравнивать затраченные в свое время средства с текущими затратами.

Но, по-видимому, такое сопоставление все же может быть выполнено при соответствующей корректировке сумм затрат, поэтому соответствующий показатель имеет право на существование. Заметим, что если стоимость ремонтно-восстановительных работ сопоставлять со стоимостью нового объекта аналогичного назначения, то совместно с физическим может учитываться и моральный износ (при этом в стоимости ремонта должно учитываться доведение объекта до уровня современных требований).

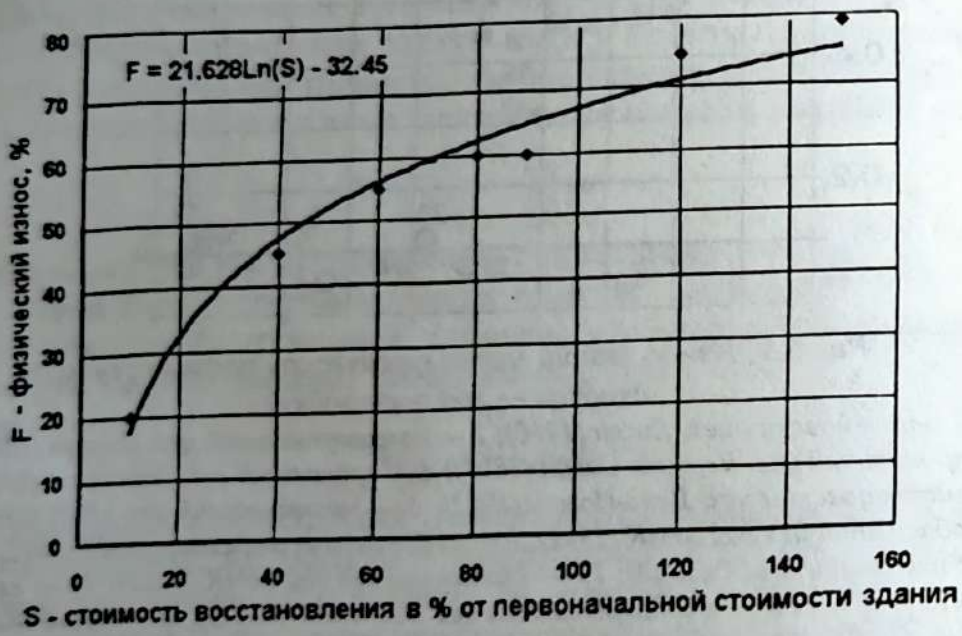


Рис.5.10. Зависимость между стоимостью ремонта и износом

Зависимость стоимости ремонта от степени физического износа исследовалась применительно к жилым зданиям. Обработка статистических данных привела к зависимости логарифмического типа (рис.5.10), которая может считаться достаточно универсальной.

Поскольку при эксплуатации накапливаются и неустранимые повреждения (например, изменение реологических свойств материалов), то в стоимость

ремонтно-восстановительных работ войдет лишь та часть износа, которая может быть устранена. Общий износ будет при этом представлен как

$$U = C_{рем}/C_{исх} + kt, \qquad (5.4)$$

где k — коэффициент скорости роста неустранимого износа [47],[155]. Исходя из такого представления и учитывая, что к конце срока службы неустранимый износ составляет 35-40%, в работе [125] были определены значения коэффициента k и для металлических конструкций производственных зданий особо тяжелого (ОТ), тяжелого (Т) и среднего (С) режимов работы определены закономерности изменения износа в течение срока эксплуатации (рис.5.11).



Рис.5.11. Изменение общего износа металлических конструкций производственных зданий

Классификация зданий по режимам работы выполнялась по значениям коэффициента режима

$$K_p = \frac{\sum_i n_i}{\sigma_r N_o}\left(\frac{\sum_i \sigma_i \frac{n_i}{N_i}}{\sum_i \frac{n_i}{N_i}}\right)^m, \qquad (5.5)$$

где σ_i — уровень напряжений; n_i — соответствующее σ_i число циклов; m — показатель степени в кривой усталости; σ_r — предел выносливости; N_o — базовое число циклов. Здание относилось к режиму

ОТ, если $1 \geq K_p \geq 0{,}03$, к режиму Т если $0{,}03 \geq K_p \geq 0{,}003$ и к режиму С если $0{,}003 \geq K_p \geq 0{,}00003$.

5.5 Влияние на надежность текущего контроля за техническим состоянием

Если повреждения в конструкции имеют тенденцию роста с течением времени (реального календарного или условного ресурсного), то резко возрастает значение текущего контроля за техническим состоянием объекта. Увеличение количества контрольных осмотров конструкции, вообще говоря, повышает ее надежность, однако такое увеличение связано с ростом затрат и, следовательно, должен быть найден некоторый компромисс между стремлением повысить надежность конструкции и стремлением снизить затраты на ее обслуживание. Задача такого рода решалась в серии работ Дж. Янга [160], [161], [162] применительно к надежности авиационной техники и повреждениям типа усталостных трещин. Однако полученные в этих работах результаты имеют более широкое значение (естественно, не в количественном, а в качественном отношении), об этом свидетельствует работа [84], результаты которой относятся к резервуарным конструкциям, но весьма близки к выводам Дж. Янга.

В основе анализа лежат две оценки: одна относится к кинетике развития усталостной трещины и оценке остаточной прочности поврежденной конструкции, вторая — связана с оценкой вероятности обнаружения трещины определенной длины.

Вероятность обнаружить дефект (событие D), имеющий характерный параметр d (например, длину трещины), определяется условием

$$P(D|d) = 1 - \exp[-(d/\beta)^{\alpha}], \qquad (5.6)$$

где α и β — некоторые параметры, связанные с методами диагностики.

Вероятность того, что при осмотре будет обнаружено значение параметра d из диапазона от x до x + dx равняется

$$P(x < d < x + dx \mid D) = \{P(D \mid x < d < x + dx) \times P(x < d < x + dx)\} / P(d), \qquad (5.7)$$

где $P(x < d < x + dx)$ — вероятность того, что дефект имеет соответствующие размеры (даже если он не обнаружен); P(d) — полная вероятность обнаружения дефектов с любыми значениями d.

Через плотности вероятностей это записывается как

$$f(d \mid D) = k_1 f(d) P(D \mid d) = f(d) P(D \mid d) / P(D). \qquad (5.8)$$

Плотность вероятности необнаружения

$$f(d \mid \bar{D}) = k_2 f(d) \times 1 - P(D \mid d)]. \qquad (5.8)$$

Их сумма

$$f(d\,|D)/k_1 + f(d\,|\,\bar{D})/k_2 = f(d\,);\quad 1/k_1 + 1/k_2 = 1. \tag{5.10}$$

Из (5.8) и (5.9) получаем:

$$f(d\,) = f(d\,|D)/(k_1\,P(D\,|\,d);$$
$$f(d\,|\,\bar{D}) = [k_1/(1 - k_1)][\,f(d\,|D)/\,P(D\,|\,d)][1 - P(D\,|\,d)]. \tag{5.11}$$

Остаточная прочность конструкции с трещиной оценивалась с использованием приближенного выражения

$$R(t) = R_0\left\{1-(1-\xi)\sqrt{\frac{a(t)-a_0}{a_s-a_0}}\right\}, \tag{5.12}$$

где R(t) — остаточная прочность через t часов после возникновения трещины с начальным размером a_0; ξR_0 — остаточная прочность при максимально допустимом размере трещины a_s; a(t) — размер трещины в момент времени t.



Рис.5.12. Зависимость вероятности отказа от времени службы и числа обследований

Полученная в [161] кривая вероятности отказа при отсутствии обследований (N = 0) состоит из двух участков с различными характеристиками (рис.5.12). Интенсивность отказов на первом участке определяется вероятностью превышения нагрузки предела прочности, поскольку если даже трещина возникнет в первоначальный момент времени (t = 0), то для ее развития до опасного предела необходимо около 4700 часов. На втором участке интенсивность отказов в большей степени определяется наличием трещин и возможным превышением нагрузкой уровня остаточной прочности ξR_0. Поэтому обследования в этой области влияют на надежность весьма существенно, что

видно из графика, где представлены данные о влиянии числа обследований N на вероятность отказа.

Из графика также видно, что кроме вывода о выгодности проведения обследований в более позднее время (естественно, при сохранении приемлемого уровня риска) можно сделать вывод о том, что существует и «предел насыщения» числом обследований. При нем практически все повреждения обнаруживаются вовремя и вторая часть кривой является продолжением первой.

5.6 Оптимальные сроки проведения обследований

В общей теории надежности, которая создавалась с ориентацией на объекты машиностроения и радиоэлектроники [7], распространен подход к установлению периодичности профилактических работ, основанный на понятии коэффициента готовности. Однако перенос этих результатов в практику обследований строительных объектов невозможен по следующим причинам:

- относительная продолжительность профилактических и ремонтно-восстановительных работ для грамотно запроектированных и правильно эксплуатируемых объектов пренебрежимо мала по сравнению со сроками их бесперебойной работы, а сами профилактические работы, как правило, не связаны с прекращением эксплуатации, что делает бессмысленным оптимизацию коэффициента готовности;
- конструкции зданий и сооружений находятся в эксплуатации десятки лет, что требует приведения разновременных затрат к моменту принятия решения с учетом дисконтирования доходов и убытков.

В связи с этим в работе [70] был предложен специальный подход к решению задачи о назначении сроков проведения работ по оценке технического состояния эксплуатируемых конструкций, краткое изложение которого приведено ниже.

Обозначим через $\xi(t)$ величину относительного износа конструкции к моменту времени t и будем считать, что $\xi = 0$ соответствует исправному состоянию, а $\xi = 1$ — полностью изношенной конструкции. Для каждого реального объекта изменение во времени величины износа имеет вполне определенный характер, но, имея в виду совокупность однотипных объектов, будем рассматривать $\xi(t)$ как случайную функцию времени и предполагать при этом справедливость простейшего линейного закона

$$\xi(t) = Q + ht \qquad (5.13)$$

со случайными коэффициентами Q и h, для которых реализация определенных значений определяется рассматриваемым экземпляром конструкции.

Если считать, что начальная дефектность Q и скорость износа h являются статистически независимыми нормально распределенными величинами с математическими ожиданиями $\overline{Q}, \overline{h}$ и дисперсиями $\hat{Q} = \sigma_Q^2, \hat{h} = \sigma_h^2$ соответственно, то и $\xi(t)$ будет нормально распределенной случайной величиной со средним и дисперсией, зависящей от времени, как от параметра

$$\bar{\xi} = \bar{Q} + \bar{h}t, \qquad \hat{\xi} = \hat{Q} + t^2\hat{h}\,. \tag{5.14}$$

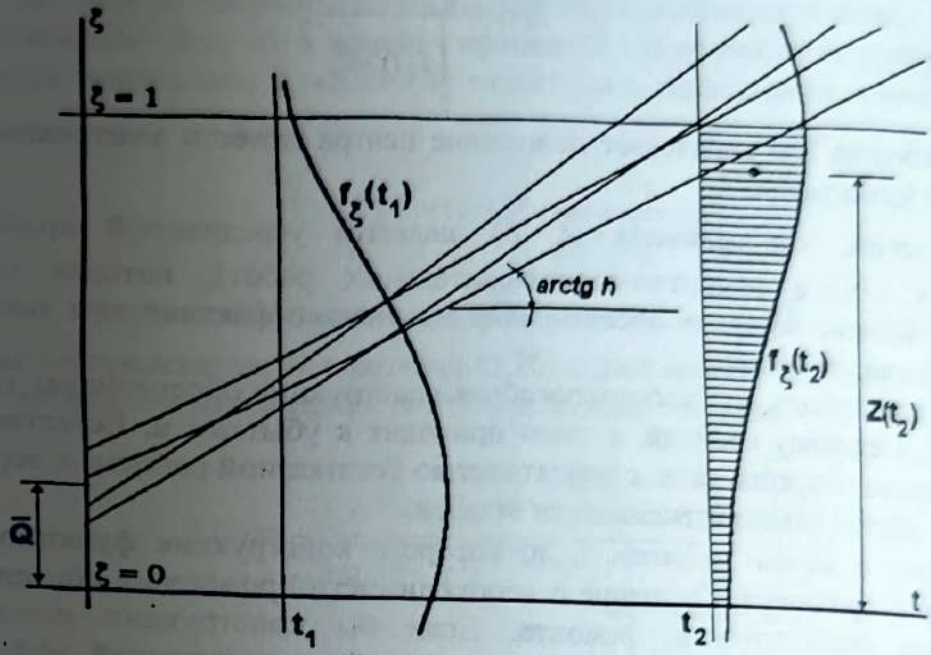


Рис.5.13. Линейные реализации износа

Графическое описание механизма накопления износа показано на рис.5.13. На этом рисунке наклонные прямые соответствуют различным возможным реализациям функции износа (5.13). Они имеют различные стартовые точки Q, что соответствует различным возможным значениям начальных несовершенств у разных экземпляров конструкции, а также различные углы наклона, что связано с различными условиями эксплуатации этих конструкций. Там же отражено изменение значений плотности вероятностей

$$f_\xi = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\hat{Q} + t^2\hat{h})}} \exp\left[-\frac{(\xi - \bar{Q} - t\bar{h})^2}{2(\hat{Q} + t^2\hat{h})}\right]. \tag{5.15}$$

Обычно используемая групповая дисциплина обслуживания и регламент ремонтно-восстановительных работ ориентированы на учет средних для рассматриваемой группы объектов значений износа и предполагают, что в момент времени t объем ремонта составит $\bar{\xi}(t)$. Если же проводить обследования и оценивать конструкции индивидуально, то с вероятностью $f_\xi d\xi$ можно встретить значение относительного износа $\xi(t) \neq \bar{\xi}(t)$. По всему ансамблю обследуемых однотипных объектов средний объем ожидаемых ремонтно-восстановительных работ будет

$$Z(t)=\frac{\int_0^1 \xi f_\xi(t)d\xi}{\int_0^1 f_\xi(t)d\xi}. \qquad (5.16)$$

Величина Z(t) определяет положение центра тяжести заштрихованной на рис. 5.13 части эпюры f_ξ.

Заметим, что величина $(\bar{\xi}-Z)$ является усредненной прибылью (в единицах объема ремонтно-восстановительных работ), которая связана с приобретаемыми во время обследования знаниями о фактическом техническом состоянии конструкций.

Будем считать, что работоспособная конструкция обеспечивает получение дохода s в единицу времени, а отказ приводит к убыткам u. Естественно, что доход можно получить лишь с вероятностью безотказной работы, а вероятность понести убытки равна интенсивности отказов.

Пусть в момент времени τ, до которого конструкция функционировала безотказно, принимается решение о необходимости проведения обследования и (в случае необходимости) ремонта. Если бы конструкция оставалась в эксплуатации без вмешательства, то ожидаемый экономический эффект от ее функционирования, приведенный к моменту времени τ, равнялся

$$D_1(\tau)=\int_0^\infty\left[s\frac{P(\tau+t)}{P(\tau)}-u\lambda(\tau+t)\right]\exp(-\mu t)dt\,. \qquad (5.17)$$

Здесь $P(\tau+t)/P(\tau)$ — условная вероятность для конструкции, безотказно проработавшей до момента времени τ, проработать еще отрезок времени t; $\exp(-\mu t)$ — множитель, обеспечивающий приведение разновременных затрат с коэффициентом дисконтирования μ. Если же в момент времени τ конструкция подвергается обследованию и ремонту, то вместо (5.17) будем иметь

$$D_2(\tau)=\int_0^\infty[sP(t)-u\lambda(t)]\exp(-\mu t)dt\,. \qquad (5.18)$$

Если учесть, что для проведения обследований необходимо понести затраты K, а стоимость ремонта R зависит от величины $Z(\tau)$, то экономический эффект от принятия решения в пользу обследования и ремонта может быть представлен как

$$E(\tau)=\int_0^\infty\left\{s\left[P(t)-\frac{P(\tau+t)}{P(\tau)}\right]+u[\lambda(\tau+t)-\lambda(t)]\right\}\exp(-\mu t)dt- \qquad (5.19)$$

$$-K-R(Z(\tau)).$$

Оптимальный срок проведения профилактических работ определяется из условия максимизации функционала (5.19). Для этого необходимо выразить вероятность P(t) и интенсивность отказов $\lambda(t)$ через параметры задачи.

Вероятность того, что в момент t процесс (5.13) не выйдет на уровень $\xi = 1$ (это событие происходит в момент T) может быть представлена зависимостью [23]

$$P(T > t) = \Phi\left(\frac{c - t}{\sqrt{\sigma^2 + \gamma^2 t^2}}\right), \tag{5.20}$$

где $\Phi(\bullet)$ — функция Лапласа; $c = (1 - \bar{Q})/\bar{h}, \gamma = \sigma_h, \sigma = \sigma_Q/\bar{h}$ — безразмерные параметры распределения Бернштейна (5.20) с дисперсией, зависящей от t. Для этого распределения интенсивность отказов определяется как

$$\lambda(t) = \frac{\sigma^2 + c\gamma^2 t}{\sqrt{2\pi(\sigma^2 + \gamma^2 t^2)^3}} \times \frac{\exp\left[-\frac{(c-t)^2}{2(\sigma^2 + \gamma^2 t^2)}\right]}{\Phi\left[\frac{c - t}{\sqrt{\sigma^2 + \gamma^2 t^2}}\right]}. \tag{5.21}$$

Заметим, что в нашей модели интенсивность отказов стремится к нулю при $t \to \infty$, т.е. «бесконечно старые» конструкции не отказывают. Этот парадоксальный результат объясняется тем, что отказавшие конструкции имели гораздо большую скорость износа по сравнению с выжившими, которых может остаться очень мало, но их надежность существенно выше, чем у остальных.

Будем считать, что объем ремонтных работ пропорционален средней величине обнаруженного износа Z и учтем, что имеется некоторая часть β ($0 \le \beta \le 1$). Тогда

$$R(\tau) = r\alpha(1 - \beta)Z(\tau), \tag{5.22}$$

где r — стоимость единицы объема ремонтных работ.

В качестве примера были рассмотрены конструкции производственного здания, для которых на основании опыта обследований аналогичных конструкций принималось, что

$$\bar{h} = 0{,}02; \bar{Q} = 0{,}06; \sigma_h = 0{,}01; \sigma_Q = 0{,}02.$$

Значения экономических параметров принимались:

$$K = 0{,}1;\ r = 10;\ s = 50;\ u = 100 \text{ и } \mu = 0{,}0953.$$

Результаты вычислений даны на рис.5.14.

Расчеты, проведенные для различных типичных значений числовых параметров, показали, что оптимальное время проведения первого обследования колеблется в диапазоне 0,4 с — 0,75 с.

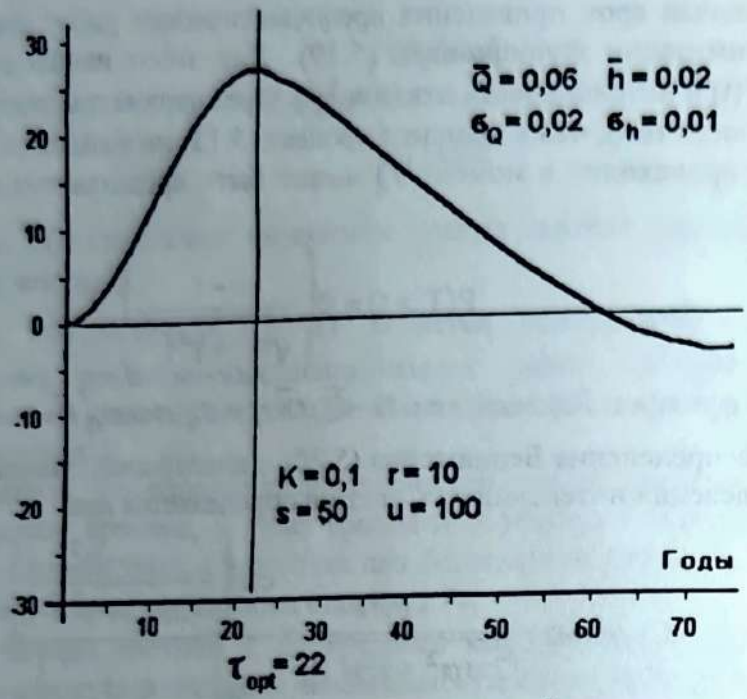


Рис.5.14. Зависимость целевого функционала от времени проведения обследования

5.7 Экспериментальная оценка надежности эксплуатируемых конструкций

Несущая способность эксплуатируемой конструкции может быть точно установлена лишь при испытании до разрушения, что неприемлемо с практической точки зрения. Неразрушающие методы контроля дают лишь косвенную информацию, поэтому нельзя ориентироваться на чисто экспериментальные способы оценки фактической несущей способности существующих сооружений. Однако возможность получения в результате эксперимента некоторой дополнительной (хотя и косвенной) информации о фактически реализовавшихся случайностях остается весьма привлекательной.

С методологической точки зрения здесь имеется целая серия вопросов и лишь некоторые из них получили свое решение. И первым здесь является вопрос о количестве проб, которые следует взять из конструкции для оценки механических свойств материала или определения нагрузки от собственного веса конструктивных элементов. Провести сплошные измерения не удается, поэтому даже после исследования некоторого числа отобранных образцов некая доля неопределенности остается. И хотя мы имеем дело с вполне определенной конструкцией, для которой все случайности уже реализовались, считать искомое значение прочности материала или собственного веса какого-нибудь из слоев ограждения величиной детерминированной не удается в силу отмеченной «остаточной неопределенности».

По-видимому, наиболее правильной является оценка, основанная на применении так называемых толерантных границ [37, с. 657]. Эта граница $\Gamma(X, n, \delta, P)$, по данным n выборочных наблюдений, устанавливает такое значение случайной величины X, для которого с определенной долей уверенности δ можно утверждать, что в генеральной совокупности, из которой произведена выборка, вероятность встретить значение за толерантной границей равна заданной величине P. Такой подход реализован в нормативном документе [28] для определения расчетного сопротивления стали по результатам испытаний некоторого числа отобранных из конструкции образцов, при этом принято: $\delta = 0{,}9$ и $P = 0{,}95$.

При проектировании расчетная схема часто выбирается заранее и затем конструктор следит за ее реализацией в разрабатываемом проекте, выбирая соответствующие конструктивные решения узлов. А при оценке сушествующей конструкции приходится решать обратную проблему — выбрать расчетную схему, адекватную конструктивному решению, включая и те отклонения от идеала, которые определяются имеющимися в конструкции дефектами и повреждениями. Такая задача может оказаться достаточно сложной и зачастую нельзя обойтись без экспериментальной проверки несущей способности конструкции. Если целью эксперимента является подтверждение работоспособности конструкции, то возникает задача о выборе величины пробной нагрузки и количества испытываемых однотипных элементов из общего числа N, имеющихся в здании или сооружении. Такая задача рассматривалась в работе [69].

Из-за большой стоимости испытаний и ввиду сложности нагружения всей конструкции (например, покрытия производственного здания) фактически можно провести испытания лишь некоторой части конструкции (нескольких прогонов или ферм). При этом, как и при любом выборочном контроле, имеется риск принятия ошибочного решения, который падает при увеличении объема выборки n. По поводу объема выборки в технической литературе имеются самые разноречивые рекомендации, но, на наш взгляд, к числу наиболее обоснованных относятся предложения работы [143], где предлагается принимать $n \geq 0{,}3N^{1/3}$, что в большинстве случаев дает вполне приемлемые значения объема выборки и хорошо согласуется со строго обоснованным асимптотическим решением о числе испытаний для выявления критических событий [12, с. 268].

При определении величины испытательной нагрузки следует учитывать, что в составе расчетной нагрузки Q имеется некоторая доля постоянной нагрузки G, которая уже действует на систему наряду с испытательным нагружением, т.е.

$$Q = G + T, \tag{5.23}$$

где T — переменная часть нагрузки, которая моделируется в процессе испытания. Если $(1 + \alpha)$ есть коэффициент увеличения испытательной нагрузки, который вводится для обеспечения приемлемой степени риска правильного вывода, то контрольная нагрузка

$$Q_k = G + (1 + \alpha)\, T \qquad (5.24)$$

Коэффициент увеличения испытательной нагрузки $(1 + \alpha)$ был получен в [69] и его значения, подсчитанные при изменчивости механических свойств конструкции, характеризуемой коэффициентом вариации $V_R = 0{,}08$ (сталь), а также коэффициентами вариации постоянной нагрузки $V_G = 0{,}2$ и экспериментального нагружения $V_T = 0{,}05$, приведены в табл. 5.6. При вычислениях риск заказчика (вероятность получить ошибочное заключение) был принят $\beta = 0{,}05$.

Таблица 5.6

T/(G+T)	Значение $(1 + \alpha)$ при n:							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0.5	2,78	2,50	2,37	2.28	2,22	2,18	2,14	2,11
0.6	2,42	2,21	2,10	2,04	1,99	1,96	1,93	1,90
0.7	2,18	2,01	1,92	1,87	1,83	1,80	1,78	1,76
0.8	2,00	1,85	1,79	1,73	1,71	1,69	1,67	1,65
0.9	1,87	1,75	1,69	1,65	1,63	1,61	1,59	1,57
1.0	1,78	1,67	1,62	1,58	1,56	1,54	1,53	1,52

Анализ данных, представленных в табл. 5.6, показывает, что увеличение числа отобранных для испытания экземпляров однотипных конструкций свыше четырех мало сказывается на величине $(1 + \alpha)$. Кроме того видно, что с ростом доли постоянной нагрузки заметно увеличивается коэффициент увеличения испытательной нагрузки $(1 + \alpha)$, компенсируя таким образом «неизменчивость» реализованного и полностью нам неизвестного постоянного фактора.

Своеобразным натурным экспериментом может считаться и сам процесс эксплуатации конструкции, изучение опыта эксплуатации позволяет уточнить расчетные прогнозы надежности. Так, если заведомо известно, что в процессе предшествующей эксплуатации конструкции был достигнут некоторый уровень напряжений $\sigma_э$ и при этом не последовало никаких отказов, то можно учесть левостороннее усечение кривой распределения случайной величины сопротивления, т.е. считаться с тем, что в рассматриваемом экземпляре конструкции фактически отсутствует вероятность встретить величину расчетного сопротивления меньшую, чем $\sigma_э$. Соответствующая кривая плотности вероятности f_R преобразуется в кривую $f_{R|\sigma_э}$ (рис.5.15).

По-видимому, впервые на возможность использования такого усечения обратил внимание А.П.Кудзис, рассматривая конструкции, подвергающиеся заметным монтажным нагрузкам [49, с. 68]. Его можно также использовать при рассмотрении систем, подвергающихся пробному нагружению в процессе приемо-сдаточных испытаний (например, при гидростатических испытаниях резервуаров для нефтепродуктов).

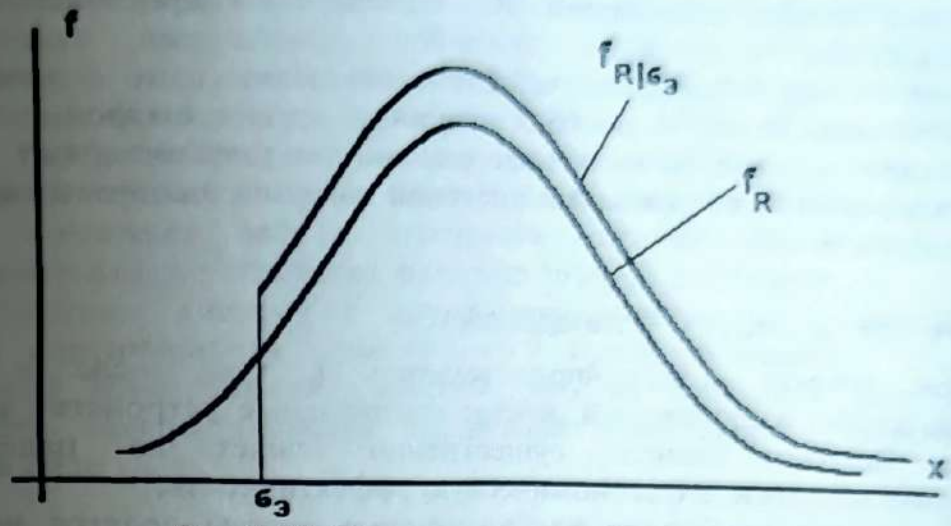


Рис.5.15. Усеченное распределение прочности

Факт продолжительной безотказной эксплуатации той или иной несущей конструкции может также свидетельствовать о том, что ее надежность является достаточной, даже если расчетные проверки свидетельствуют об обратном. Такая ситуация является отнюдь не редкой и к ней могут привести самые разные причины:

- несоответствие расчетной модели реальной конструкции принятой идеализации;
- реализация в рассматриваемом объекте прочностных параметров, повышенных по сравнению со значениями, принятыми при проектировании;
- особенности микрорайонирования местности, определяющие нагрузки со значениями меньшими, чем предусмотрено нормами проектирования.

Нормальная эксплуатация является своеобразным натурным экспериментом, проводимым над конструкцией, правда, не очень хорошо организованным и требующим специального анализа результатов. Здесь возникает своеобразная проблема определения того минимального срока проведения эксперимента, который позволил бы с определенной степенью доверительной вероятности экстраполировать имеющуюся информацию о надежном поведении на требуемый срок эксплуатации.

Считая, что надежность вывода должна равняться надежности выбора значений расчетной нагрузки для принятия проектных решений, в работе [68] удалось для снеговой нагрузки определить указанный срок наблюдения в N лет и задать его формулой

$$N = T_0 \exp\left[\frac{-\gamma_f q}{0{,}199q + 7{,}318}\left(1-\frac{R}{\sigma_r}\right)\left(1+\frac{p}{\gamma_f q}\right)\right]. \qquad (5.25)$$

Здесь через T_o обозначен расчетный срок эксплуатации; q — нормативная снеговая нагрузка; γ_f — коэффициент надежности по нагрузке; σ_r/R —

относительный уровень напряжений (R — расчетное сопротивление) и p — постоянная нагрузка.

Подсчеты по формуле (5.25) показали, что конструкции, просуществовавшие более 30 лет без аварий и других отказов, не требуют никакого усиления, даже если они формально не удовлетворяют условиям прочности по действию постоянной и снеговой нагрузок в соответствии с ныне действующими нормами.

5.8 Надежность систем с защитой

Многие объекты современной техники, в том числе и несущие конструкции зданий и сооружений, имеют специальные устройства защиты от перегрузок. Введение защиты существенно влияет на надежностные характеристики объекта и его экономическую эффективность,

Для защищенных объектов все возможные отказы делятся на отказы-аварии и отказы-остановки [38]. К остановкам относятся отказы, при которых нормальное функционирование прекращается, но это не сопровождается повреждениями конструкций и большими материальными потерями. Отказы-аварии характеризуются значительными повреждениями самой конструкции и связанного с ней оборудования, они влекут за собой значительный материальный ущерб, а иногда и человеческие жертвы. Роль предохранительных устройств состоит в том, что они переводят отказы-аварии в отказы-остановки. Введение защиты существенно влияет на характеристики надежности и экономическую эффективность конструкции.

Защита оказывает двоякое действие на надежность. С одной стороны, она при остающейся неизменной вероятности возникновения чрезвычайных аварийных нагрузок уменьшает вероятность возникновения аварий, поскольку авария может произойти только при несрабатывании защиты. При абсолютно надежной защите аварийные отказы вообще исключаются. С другой стороны, увеличивается вероятность возникновения отказов-остановок, по крайней мере часть аварийных отказов переводится в ранг отказов-остановок и кроме того возможен отказ при ложном срабатывании защиты.

Часто предохранительные устройства выполняются в виде слабого звена, разрушение которого при определенной нагрузке предотвращает ее передачу на защищаемую конструкцию. Плавкие предохранители бытовых электрических приборов являются наиболее известным типом такого устройства. К их числу относятся также ограничители грузоподъемности мостовых и башенных кранов, муфты предельного момента на главных валах многих машин, предохранительные клапаны сосудов высокого давления и многие другие.

Если бы работа защиты была идеальной и предохранительный элемент разрушался при строго определенной нагрузке, то конструкция могла бы быть рассчитана только на восприятие нагрузки, равной предельной несущей способности предохранителя. Однако неизбежный разброс уровня срабатывания предохранительного элемента и уровня прочности защищаемой конструкции при

относительно небольшой разнице этих величин заставляет считаться с возможностью наступления события, заключающегося в том, что предохранитель оказывается прочнее защищаемой конструкции и поэтому не выполнит свои функции, т.е. произойдет отказ защиты. С другой стороны, при излишне большом разрыве между прочностью конструкции и уровнем срабатывания предохранителя конструкция окажется неэкономичной. Таким образом, возникает задача отыскания оптимального уровня прочности предохранительного устройства, решение которой дается ниже.

Рассмотрим систему с двумя последовательно (в смысле передачи нагрузки) соединенными элементами — предохранительным устройством и защищаемой конструкцией. Заметим, что на основании формулы полной вероятности можно записать выражение вероятности безотказной работы системы в виде

$$W = W_0(1-w) + W_*w, \tag{5.26}$$

где w — вероятность безотказной работы защиты; W_0 — то же, для незащищенной конструкции; W_* — то же, для системы с идеальной защитой. Если введение защиты привело к результату $W_*=1$, то $W = W_0 + w - wW_0$, что соответствует схеме параллельного соединения в надежностном смысле. Следовательно, защита играет роль постоянного резервирования [5].

Далее будем величины, относящиеся к предохранительному устройству, отмечать индексом p, а к защищаемой конструкции — индексом k.

Пусть уровни прочности элементов являются нормально распределенными случайными величинами $\tilde{R}_p$ и $\tilde{R}_k$, которые характеризуются математическими ожиданиями $\overline{R}_p, \overline{R}_k$ и дисперсиями $\hat{R}_p, \hat{R}_k$. Предохранительное устройство вводится в систему для ограничения величин нагрузок, передаваемых на конструкцию, и на последнюю действует лишь та нагрузка, которая не превосходит величину несущей способности предохранителя. Предохранительное устройство не выполнит свою функцию, если $\tilde{R}_p > \tilde{R}_k$ или запас защищенности $W = \tilde{R}_k - \tilde{R}_p$ окажется неположительным. Поскольку величины $\tilde{R}_p$ и $\tilde{R}_k$ нормально распределены, то и значение запаса W тоже распределено нормально с математическим ожиданием $\overline{R}_k - \overline{R}_p$ и дисперсией $\hat{R}_k + \hat{R}_p$. Следовательно, вероятность V несрабатывания защиты определяется известной формулой [95]:

$$V = \frac{1}{2} - \Phi\left[\frac{\overline{R}_k - \overline{R}_p}{\sqrt{\hat{R}_k + \hat{R}_p}}\right], \tag{5.27}$$

где $\Phi[\cdot]$ — нормированная функция Лапласа

$$\Phi(z) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}}\int_0^z \exp\left(\frac{\alpha^2}{2}\right)d\alpha . \qquad (5.28)$$

Введем обозначения для коэффициентов вариации $A_k = \sqrt{\hat{R}_k}/\overline{R}_k$ и $A_p = \sqrt{\hat{R}_p}/\overline{R}_p$ и для упрощения далее будем считать, что $A_k = A_p = A_R$. Если обозначить через x отношение среднего значения прочности предохранительного устройства к среднему значению прочности защищаемой конструкции ($x = \overline{R}_p/\overline{R}_k$), то с учетом введенных обозначений получим

$$V = 0{,}5 - \Phi[(1-x)/(A_R\sqrt{1+x^2})]. \qquad (5.29)$$

Рассмотрим случай, когда на систему действует нагрузка $\tilde{Q}(t)$ в виде нормально распределенного случайного процесса со средним значением $\overline{Q}$, корреляционной функцией $K_Q(\tau)$ и дисперсией $\hat{Q} = K_Q(0)$. В этом случае вероятность превышения нагрузкой $\tilde{Q}(t)$ уровня прочности конструкции $\tilde{R}_k$ в течение бесконечно малого промежутка времени dt (плотность выбросов) определяется известной зависимостью [95]

$$u_k = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{-\ddot{\hat{Q}}(0)}{\hat{R}+\hat{Q}}}\exp\left[\frac{-(\overline{R}-\overline{Q})^2}{2(\hat{R}+\hat{Q})}\right]. \qquad (5.30)$$

Используя обозначения $A_Q = \sqrt{\hat{Q}}/\overline{Q}$, $B_Q = \sqrt{-\ddot{\hat{Q}}(0)}/\overline{Q}$ и введя коэффициент запаса z в форме отношения математических ожиданий прочности и нагрузки $z = \overline{R}_k/\overline{Q}$, получим плотность выбросов нагрузки за уровень прочности защищаемой конструкции

$$u_k = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{B_Q^2}{(z^2A_R^2 + A_Q^2)}}\exp\left[\frac{-(z-1)^2}{2(z^2A_R^2 + A_Q^2)}\right] \qquad (5.31)$$

и за уровень прочности предохранительного устройства

Интенсивность отказов защищаемой конструкции вычисляется как вероятность одновременного наступления независимых событий $\tilde{R}_p > \tilde{R}_k$ и $\tilde{Q} > \tilde{R}_k$ за интервал времени dt, что приводит к произведению u_kV. Вид функции интенсивности отказов конструкции u_kV в зависимости от коэффициентов x и z показан на рис.5.16.

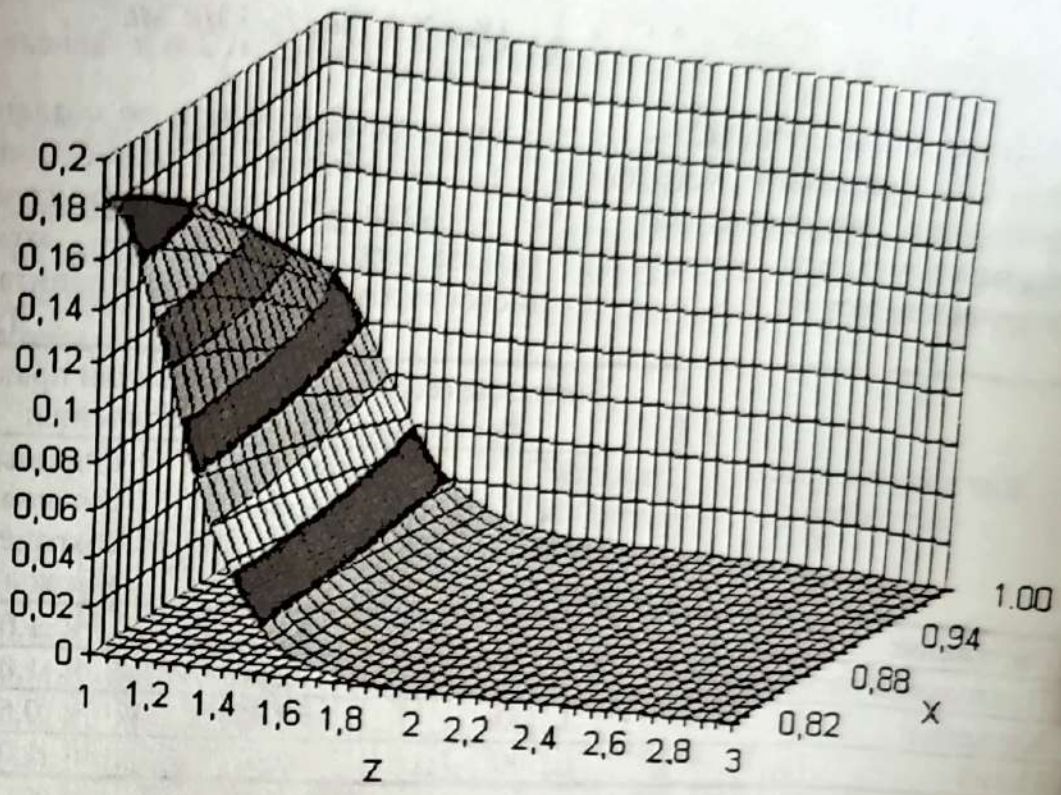


Рис.5.16. Функция интенсивности отказов

Интенсивность срабатывания предохранительных устройств равна $u_p(1 - V)$, а для системы в целом интенсивность отказов

$$u = u_k V + u_p(1 - V). \tag{5.33}$$

Именно такова вероятность того, что в интервале времени $(t, t + dt)$ система не будет работать. Однако эта информация не только недостаточна для суждения о качестве системы, но и может вообще ввести в заблуждение, поскольку последствия отказа, связанные с первым и вторым слагаемыми в (5.33), существенно неравнозначны. Поэтому целесообразно перейти к стоимостным оценкам, которые позволили бы сопоставлять последствия отказов-аварий и отказов-остановок.

$$u_p = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{B_Q^2}{\left(x^2 z^2 A_R^2 + A_Q^2\right)}}\exp\left[\frac{(z-1)^2}{2\left(x^2 z^2 A_R^2 + A_Q^2\right)}\right]. \tag{5.32}$$

Суммарная стоимость системы за время ее функционирования T, включая убытки от возможных отказов, может быть выражена формулой

$$C = C_k + C_p + \int_0^T [Y_k u_k V + Y_p u_p (1 - V)] e^{-rt} dt. \quad (5.34)$$

Здесь обозначено: C_k — стоимость конструкции при ее создании; C_p — стоимость защитного устройства; Y_k — убытки от единичного отказа конструкции (отказа-аварии); Y_p — убытки от единичного срабатывания предохранительного устройства (отказа-остановки); e^{-rt} — коэффициент отдаленности затрат; r — параметр дисконтирования (процент с капитала).

Таблица 5.7

Вид напряженного состояния	Значение α (β) при использовании правила пропорционального увеличения:		
	высоты сечения при сохранении ширины	обоих размеров сечения	ширины сечения при сохранении высоты
Растяжение	1,000	1,000	1,000
Продольный изгиб	-	0,500	1,000
Кручение	1,000	0,667	0,500
Изгиб	0,500	0,667	1,000

В первом приближении можно принять, что первоначальная стоимость пропорциональна некоторой степени коэффициента запаса, т.е.

$$C_k = C_k^0 z^{\alpha}, \quad C_p = C_p^0 x^{\beta} z^{\beta}, \quad (5.35)$$

где показатели степени α и β зависят от вида напряженного состояния конструкции и правил, по которым меняется форма поперечного сечения элемента при изменении величины действующей нагрузки. Соответствующие данные представлены в табл. 5.7 [32].

Убытки от единичного отказа конструкции Y_k определяются стоимостью ее восстановления, которая составляет некоторую долю ν от первоначальной стоимости, и убытков от простоя производства или других посторонних эффектов U (например, от экологических потерь или упущенной выгоды), не зависящих от первоначальной стоимости конструкции. Поэтому

$$Y_k = \nu C_k^0 z^{\alpha} + U. \quad (5.36)$$

Убытки от единичного срабатывания защиты состоят из стоимости замены предохранительного устройства и некоторой части μ от убытков U, т.е.

$$Y_p = \nu C_p^0 x^{\beta} z^{\beta} + \mu U, \quad (5.37)$$

где значение коэффициента μ обычно определяется относительной скоростью замены предохранительного устройства по сравнению со скоростью восстановления отказавшей конструкции. Часто можно принимать μ = 0, особенно в тех случаях, когда отказ конструкции связан с большим

экологическим ущербом или же с другими убытками, не зависящими от времени простоя системы.

Обозначая $\eta = U/C_k^0, \theta = C_p^0/C_k^0$ и интегрируя (5.34), можно получить

$$\bar{C} = C/C_k^0 = z^\alpha + \theta x^\beta z^\beta + \left[V\left(vz^\alpha + \eta\right)u_k + \left(1-V\right)\left(\theta x^\beta z^\beta + \mu\tau\right)u_p\right]\frac{\left(1-e^{-\tau T}\right)}{\tau}. \qquad (5.38)$$

Типичный вид зависимости этого функционала от параметров z и x показаен на рис.5.17. Минимизация функционала (5.36) дает оптимальные значения коэффициента запаса z^* и относительного уровня прочности предохранительного устройства x^*.

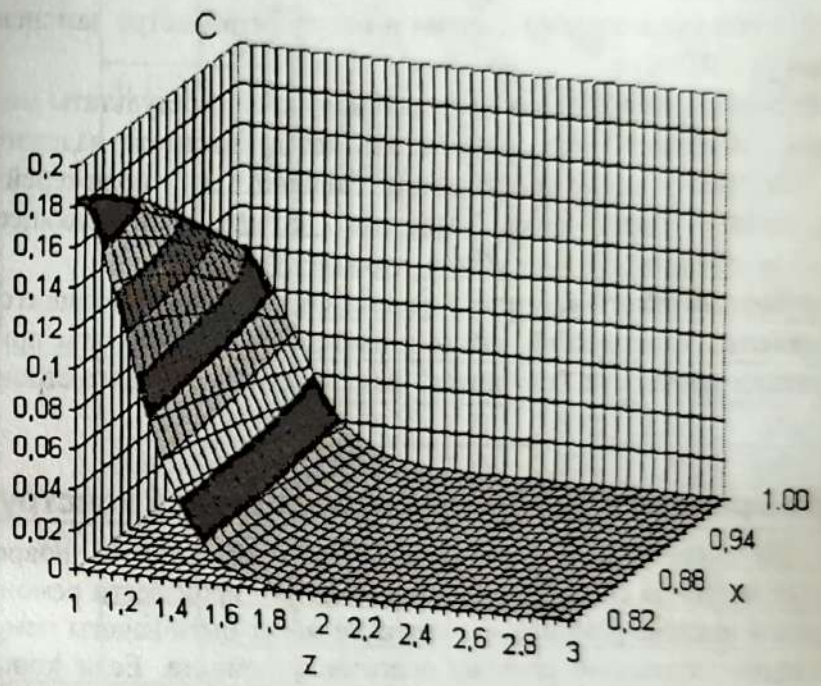


Рис.5.17. Функционал стоимости

Минимизация (5.36) была проведена численно при широком диапазоне изменения параметров T, η, θ и μ. При этом для коэффициентов вариации были приняты достаточно типичные значения A_R=0,1 и A_Q =0,2, а корреляционная функция нагрузки взята в простейшей форме $K_Q(\tau) = B_Q \exp(-\chi\tau^2)$ с параметром χ, равным 1 год$^{-2}$, что дает B_Q = 1,414A_Q. Для коэффициентов влияния вида напряженного состояния приняты значения α = 1, β = 1, а убытки от отказа конструкции включали ее полную первоначальную стоимость (ν = 1). Результаты расчетов приведены в табл. 5.8.

Из табл. 5.8 видно, что оптимальное значение относительной прочности предохранительного устройства x^* зависит, главным образом, от доли постороннего ущерба μ, связанной с отказом-остановкой. Величина x^* практически не изменяется при вариации срока эксплуатации T, коэффициента

постороннего ущерба η и относительной первоначальной стоимости предохранительного устройства θ.

Интересно сопоставить оптимальную защищенную конструкцию с конструкцией без предохранительных устройств, запроектированной для таких же условий и при тех же параметрах, у которой оптимальный коэффициент запаса z^0 найден путем минимизации функционала

$$C^0 = z^\alpha + \left(\nu z^\alpha + \eta\right)\mu_k \frac{\left(1 - e^{-rT}\right)}{r}. \qquad (5.39)$$

Соответствующие данные приведены также в табл. 5.8. Из них видно, что применение защитных устройств рассмотренного типа выгодно лишь в тех случаях, когда они относительно дешевы и могут быть быстро заменены после срабатывания ($\mu \le 0{,}02$).

Приведенная выше методика расчета и полученные результаты могут быть использованы, например, при назначении коэффициентов надежности по снеговой нагрузке для конструкций теплиц и оранжерей (роль предохранительного звена здесь выполняет стекло, разрущающееся при перегрузках), но при этом следует учесть, что здесь $A_k \neq A_p$.

К сооружениям такого же типа относятся системы с взрывозащитой в виде легкосбрасываемых конструкций, для них приведенные результаты применимы при определении прочности "рвущихся" связей, а также другие строительные объекты.

5.9 Резерв времени для ремонта поврежденной конструкции

Если при обследовании конструкции были обнаружены повреждения, снижающие ее несущую способность, то необходимо произвести ремонт такого объекта. Однако никакие ремонтные работы не могут быть начаты немедленно, всегда необходим некоторый срок на подготовку ремонта. Если конструкция может быть разгружена на период ожидания ремонта до такой степени, чтобы не опасаться за возможность ее разрушения в это время, то такую операцию обычно проводят в числе других подготовительных мероприятий. Однако разгрузка конструкции не всегда возможна, например, если опасной нагрузкой является ветровая, для которой вероятность реализации расчетного значения не зависит от усилий человека. Приходится считаться с риском того, что в течение подготовительного периода разрушение возможно и единственным способом уменьшения такого риска является сокращение сроков подготовки к ремонту.

Таблица 5.8

Параметры				Результаты оптимизации при A_R=0,1; A_Q =0,2; B_Q=0,28 и ν=1					
T	η	Θ	μ	x*	z*	C*	C^0	z^*/z^0	C^*/C^0
10	100	0,001	0,01	0,85	1.87	2,011	2,077	0,949	0,968
			0,02	0,88	1,91	2,062	2,077	0,969	0,993
			0,03	0,90	1,93	2,096	2,077	0,980	> 1,0
			0,04	0,92	1,94	2,125	2,077	0,985	> 1,0
			0,06	0,93	1,95	2,176	2,077	0,990	> 1,0
			0,08	0,94	1,96	2,223	2,077	0,995	> 1,0
			0,10	0,96	1,96	2,268	2,077	0,995	> 1,0
		0,100	0,01	0,86	1,90	2,020	2,077	0,964	0,972
			0,02	0,89	1,92	2,066	2,077	0,975	0,995
			0,03	0,91	1,93	2,098	2,077	0,980	> 1,0
			0,04	0,92	1,94	2,127	2,077	0,985	> 1,0
			0,06	0,93	1,95	2,177	2,077	0,990	> 1,0
			0,08	0,94	1,96	2,224	2,077	0,995	> 1,0
			0,10	0,95	1,97	2,269	2,077	1,000	> 1,0
	1000	0,001	0,01	0,88	2,15	2,273	2,313	0,973	0,983
			0,10	0,96	2,21	2,532	2,313	1,000	> 1,0
		0,100	0,01	0,88	2,15	2,274	2,313	0,973	0,983
			0,10	0,96	2,21	2,532	2,313	1,000	> 1,0
100	100	0,001	0,01	0,86	1,91	2,042	2,103	0,955	0,971
			0,10	0,95	1,99	2,298	2,103	0,995	> 1,0
		0,100	0,01	0,86	1,91	2,049	2,103	0,955	0,974
			0,10	0,95	1,99	2,298	2,103	0,995	> 1,0
	1000	0,001	0,01	0,88	2,17	2,301	2,339	0,969	0,983
			0,10	0,96	2,23	2,561	2,339	0,995	> 1,0
		0,100	0,01	0,88	2,17	2,302	2,339	0,969	0,984
			0,10	0,96	2,23	2,561	2,339	0,995	> 1,0

В связи с этим возникает вопрос об оценке промежутка времени, который имеется для проведения ремонта при некоторой наперед заданной величине риска аварии. Такая задача является в некотором смысле обратной по отношению к обычной проблеме назначения расчетной нагрузки при заданной продолжительности эксплуатации. Осложняется она в тех случаях, когда требуемая величина риска не регламентирована и возникает проблема назначения этого параметра. Здесь может быть применен описанный ниже прием использования условия равнообеспеченности по отношению к стандартной задаче проектирования с использованием действующих норм. Проще всего этот прием проиллюстрировать на конкретном примере, в качестве которого взята выполненная реально оценка [144] резерва ремонтного времени для

поврежденной вытяжной трубы Чернобыльской АЭС (рис.5.18), которая, как показал проверочный расчет, не могла выдержать расчетное значение ветровой нагрузки.

В соответствии с действующими в атомной энергетике нормами [62] сооружение должно выдерживать экстремальную ветровую нагрузку, определяемую по указаниям норм [107], но с использованием специального коэффициента надежности $\gamma_{fd} = 2,5$ вместо рекомендуемого в [107] $\gamma_f = 1,4$. При этом расчетный срок эксплуатации T_{ef} может быть установлен 100 лет, что следует из косвенных оценок, получаемых, исходя из норм амортизационных отчислений.

Поскольку из-за повреждений сооружение вместо расчетной ветровой нагрузки $W_d = 2,5W_o$ (W_o — нормативное значение ветровой нагрузки) может выдержать лишь нагрузку $W^+ < W_d$, то необходимо установить такой уточненный срок эксплуатации T^+, чтобы вероятность превышения значения W^+ в течение этого срока не превышала бы вероятность превышения расчетной нагрузки W_d за время T_{ef}. В этом случае поврежденная конструкция будет обладать требуемой надежностью.

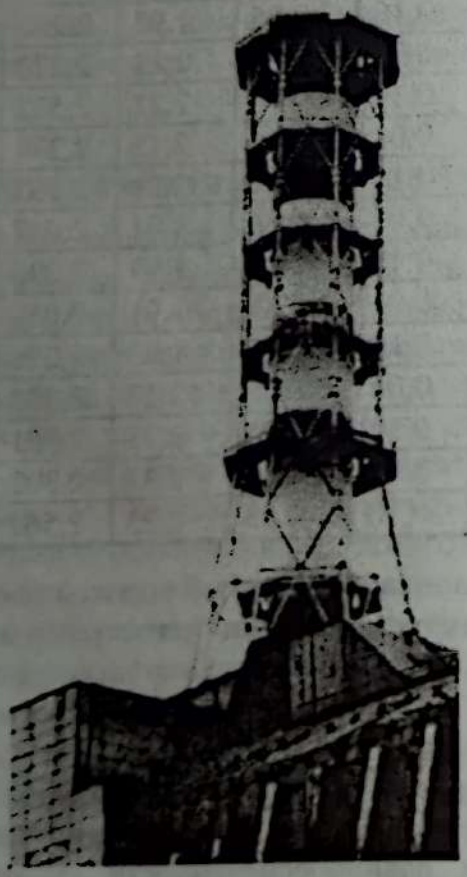


Рис. 5.18. Вытяжная труба Чернобыльской АЭС

Будем использовать математическую модель ветровой нагрузки $W(t)$, предложенную в работе С.Ф. Пичугина [79], в соответствии с которой нагрузка представляется в виде квазистационарного случайного процесса с годичным периодом повторяемости [66], [102]. У этого процесса коэффициент вариации $\nu = \hat{W}/\overline{W}$ и эффективная частота ω_{ef} постоянны во времени, а математическое ожидание описывается кубическим полиномом $\overline{W} = \sum_{i=0}^{3} C_i \tau^i$, где $0 < \tau < 366$ — время в сутках, отсчитываемое от условной даты 01.09.

Распределение ординат ветровой нагрузки в любой момент времени подчиняется закону Вейбулла с интегральной функцией

$$F(x) = 1 - \exp\{-[(x + 1)\Gamma(1 + 1/\beta)]\}, \qquad (5.40)$$

где $x = (W - \overline{W}_o)/\hat{W}_o$ - нормированное значение нагрузки, $\overline{W}_o$ и $\hat{W}_o$ — максимальные значения математического ожидания и стандарта при $\tau = 135$ суток (январь); β — параметр формы и $\Gamma(1 + 1/\beta)$ — табулированная гамма-функция. Обработка доступной метеорологической информации показала, что параметры рассматриваемой математической модели достаточно близки к значениям, характерным для II ветрового района Украины. Их значения, принятые в расчете, представлены в табл. 5.9 (сравните с табл.3.3).

Таблица 5.9

Наименование	Обозначение	Размерность	Значение
Математическое ожидание	$\overline{W}_o$	кг/м^2	143
Коэффициент вариации	ν	-	1,78
Параметр формы	β	-	0,59408
Гамма-функция	$\Gamma(1 + 1/\beta)$	-	1,52435
Эффективная частота	ω_{ef}	1/сут	5,16

Вероятность $Q(x,t)$ превышения процессом $W(t)$ нормированного уровня x за срок t, как показано в [79], описывается выражением

$$Q(x,t) = 0{,}4\omega_{ef} t K_{tr} \beta \nu^{1/2} [\Gamma(1+1/\beta)]^{\beta} (\nu x+1)^{\beta-1/2} \exp\{-[(\nu x+1)\Gamma(1+1/\beta)]^{\beta}]\}, \qquad (5.41)$$

в котором $K_{tr} = 0{,}404$ — коэффициент, учитывающий сезонный тренд математического ожидания.

Для нормативной ветровой нагрузки $W_o = 30$ кг/м^2 безразмерное значение $x_н = 10{,}98$, а для расчетной нагрузки $W_d = 75$ кг/м^2, имеем $x_d = 28{,}28$. Исходя из условия

$$Q(x^+,t^+) = Q(x_d,100) \qquad (5.42)$$

с помощью (5.41) получены значения t^+, приведенные в табл. 5.10.

Для некоторых возможных вариантов усиления поврежденной трубы были проведены расчеты, в которых учитывалось наличие оставшихся повреждений, и

определены величины W^+. По табл. 5.10 определяется резерв времени для реализации соответствующего варианта ремонта.

Таблица 5.10

Величина W^+, кг/м^2	x^+	t^+, лет
75	28,28	100
70	26,36	56,7
65	24,44	32,9
60	22,52	18,8
55	20,59	10,5
50	18,67	5,8
45	16,75	3,1
40	14,82	1,6
35	12,90	0,8
30	10,98	0,4

В заключение отметим, что оценка резерва времени на выполнение ремонтных работ может сыграть свою роль при создании норм проектирования конструкций. Так, например, чешский стандарт на проектирование мачт на оттяжках ČSN 731430-82 содержит требование: при обрыве оттяжки мачта должна выдержать 0,35 расчетной ветровой нагрузки. Это значение, полученное [111] из расчета четырехнедельного ремонта и распределения вероятностей скорости ветра на этот четырехнедельный период, обеспечивает вероятность разрушения не выше чем 10^{-4}.

5.10 О возможной системе управления надежностью

В настоящее время решения, направленные на обеспечение надежности и принимаемые на различных этапах созидательного процесса (изыскания, проектирование, строительство и т.д.), не связаны какой-либо общей системой, поскольку критерии принятия решений на отдельных этапах этого процесса, а также правила принятия управленческих решений по существу не имеют общей основы. Поэтому представляется полезным рассмотреть структуру и принципы построения гипотетической системы управления надежностью [89].

Даже такие, казалось бы, неразрывно связанные проблемы, как критерии проектирования и критерии приемочного контроля не обеспечивают должную взаимосвязь принимаемых решений. Критерием проектирования при общепринятом подходе является требование непревышения расчетным значением нагрузочного эффекта расчетного значения несущей способности. Считается, что выполнение этого требования обеспечивает необходимый уровень надежности. Не останавливаясь на отмечавшейся выше неточности

такого утверждения, заметим, что этот критерий имеет весьма слабую связь с критерием приемочного контроля, смысл которого (в лучшем случае) сводится к проверке соответствия вероятностной обеспеченности расчетного значения несущей способности, принятой в нормах проектирования, той, которая получена на заводе при выборочных статистических испытаниях. Как видим, критерий приемочного контроля совсем не учитывает характеристики будущего воздействия.

Для того, чтобы создать единую систему управления надежностью, необходимо прежде всего иметь *систему взаимосвязанных критериев*, определить зависимость между ними и их подчиненность главному критерию, определяющему надежность объекта. Критерием оценки результата всего созидательного процесса может быть только мера риска отказа эксплуатируемой конструкции.

Истинную вероятность отказа объекта перед началом эксплуатации или в какой-либо момент его использования, строго говоря, определить невозможно из-за громадного числа факторов, влияющих на надежность, и большого разнообразия их сочетаний. Поэтому можно реально говорить лишь о ее оценке. Оценку объективной вероятности отказа объекта, готового к эксплуатации, и следует принять в качестве сквозного критерия принятия всех решений созидательного процесса. Однако на различных этапах этого процесса оценка вероятности отказа производится в совершенно различных условиях, на основе различной информации, которая каждый раз представляет собой лишь часть общей информации, необходимой для пользования основным критерием. Поэтому последовательность решений в созидательном процессе должна регулироваться системой критериев, представляющих собой взаимосвязанную систему оценок вероятности отказа объекта в начале эксплуатации.

Для выработки таких критериев необходимо уметь решать обратную задачу теории надежности — для заданной конструкции и известных внешних воздействиях необходимо определить границы изменения входных параметров (допусков на геометрию, на свойства материалов и т.п.), обеспечивающих заданную вероятность отказа или заданный коэффициент запаса.

Здесь следует особо выделить проблему учета возможных ошибок, поскольку, во-первых, как уже отмечалось ранее, подавляющее большинство отказов является следствием ошибок, а во-вторых, из-за почти полного отсутствия в настоящее время способа учета возможных ошибок при установлении критериев принятия решений. Действующими нормами проектирования эта проблема полностью игнорируется. Современный подход практически основывается на утверждении: "ошибок в созидательном процессе быть не должно, поэтому их не нужно учитывать при проектировании объекта". Конечно, ошибки — явление нежелательное и борьба с ними должна проводиться на всех этапах созидательного процесса и любая система управления надежностью должна включать в себя специальные элементы и связи для борьбы с ошибками. Однако нужно отдавать себе ясный отчёт в том, что полного исключения ошибок не может быть. Вероятность их проникновения

сквозь контрольные мероприятия всегда будет отлична от нуля и, по-видимому, будет превышать вероятность проявления объективных опасностей, принятых при проектировании как допустимый риск (по крайней мере, в настоящее время это превышение весьма значительно).

Поэтому и критерии принятия решений должны предусматривать учет "неотфильтрованных" субъективных опасностей. Для этого процедуры определения целесообразной вероятности отказа и процедуры проектирования с заданной надежностью должны разрабатываться с использованием нормативных вероятностных моделей ошибок. Тогда естественно, что определенные с помощью этих процедур соответствующие меры риска будут учитывать вероятности "неотфильтрованных" ошибок.

Если представить себе, что создана взаимосвязанная система критериев принятия решений на различных этапах созидательного процесса, то для их практического использования и других реальных действий необходима некоторая *система управления надежностью*. Возможная блок-схема такой системы показана на рис.5.19. Она состоит из функциональных элементов трех видов. Прямоугольниками с двойным обрамлением обозначены элементы, создающие материальную продукцию (производители), обычными прямоугольниками — результат их деятельности, а скругленными прямоугольниками — элементы, контролирующие эту продукцию (контролеры). Индивидуальный самоконтроль и внутренний контроль являются неотъемлемыми частями элементов, создающих продукцию, на блок-схеме отдельно не показаны, подразумевается, что они содержатся в каждом прямоугольнике с двойным обрамлением. На схеме показаны лишь элементы, осуществляющие приемочный контроль. Характерным является то, что этот контроль не может выполняться производителем, как это иногда практикуется, а должны существовать специальные, независимые от производителя контролеры.

Необходимо отметить, что многие планы выборочного (но не статистического) контроля построены по принципу прецедента и используют переходящую из одного стандарта в другой формулировку типа: "Из партии взять такой-то процент изделий, но не менее чем ..., провести их контроль и при неудовлетворительных результатах провести повторную проверку на удвоенной выборке". Установлено, что планы такого вида позволяют с вероятностью $P = 0{,}7 \div 0{,}8$ сдать продукцию с уровнем дефектности до 50% [52].

Должны существовать три вида таких элементов, осуществляющих три вида контроля.

1) Контроль заказчика — направлен на проверку выполнения требований функционирования объекта и должен обеспечить необходимый уровень надежной эксплуатации.

2) Контроль специальных государственных или общественных органов — направлен на защиту интересов общества, которые иногда могут вступать в противоречие с интересами заказчика и подрядчика, и является основным, поскольку конечным «обобщенным» заказчиком является общество в целом.

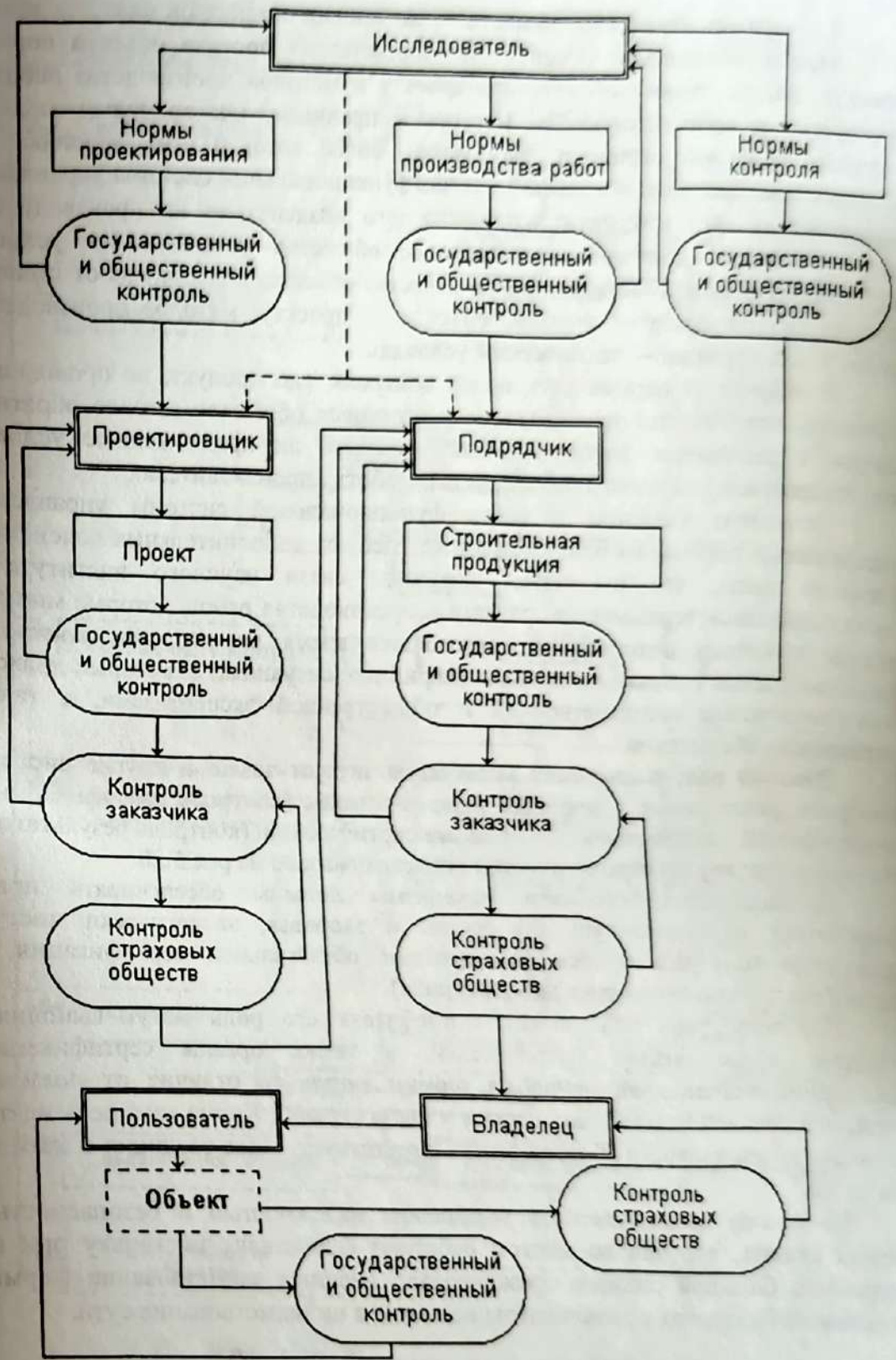


Рис. 5.19. Блок-схема системы управления надежностью

3) Контроль страховых обществ — во многих странах он является одним из основных механизмов обеспечения соответствия проекта объекта нормам проектирования, самого объекта его проекту и методов производства работ и эксплуатации соответствующим нормам и правилам. Он возможен лишь в условиях реальной рыночной экономики, более того, в этих условиях он является совершенно необходимой частью функциональной системы управления надежностью. Это механизм экономического воздействия на производителя через заказчика, при котором страховое общество устанавливает условия страхования в зависимости от уровня качества объекта, в том числе от степени соответствия: проекта — нормам; объекта — проекту; методов производства работ и эксплуатации — техническим условиям.

В отличие от первых двух видов контроля, где продукт, не прошедший контроль, возвращается производителю, страховое общество связано обратной связью с заказчиком, который решает, принять ли предложенные условия страхования или направить продукт на переработку производителю.

Остальные элементы и связи функциональной системы управления надежностью понятны из блок-схемы и не требуют дополнительных пояснений. Отметим лишь, что пунктиром показаны связи научного института с производителями через методы расчета и производства работ, которые минуют нормы и потому практически в настоящее время не подлежат контролю (возможен лишь разовый контроль в аварийных ситуациях) и которые должны контролироваться государственной и общественной экспертизами, а также страховыми обществами.

Важную роль в системах управления играют также и другие системы контроля, реализуемые в процессе лицензирования (контроль квалификации и возможностей исполнителей) и в процессе сертификации (контроль результатов). Их положение внутри строительного процесса показано на рис.5.20.

Предполагается, что эти механизмы должны обеспечивать права потребителя на безопасную для жизни и здоровья, экологически чистую продукцию (оно реализуется механизмами обязательной сертификации, а нарушения доказываются органами контроля).

При отсутствии конкретного потребителя его роль могут выполнять общества и ассоциации потребителей, а также органы сертификации. Необходимо обратить внимание на термин *могут* (в отличие от *должны*, который в неявной форме практикуется у нас в стране). Кроме того речь идет о ситуации, когда конкретный потребитель отсутствует, наша традиция с этим не считается.

По поводу этих элементов управления надежностью и безопасностью следует сказать, что они во многом работают формально, поскольку при их создании в большой степени превалировало внешнее заимствование формы, сложившейся в странах с рыночной экономикой, а не заимствование сути.

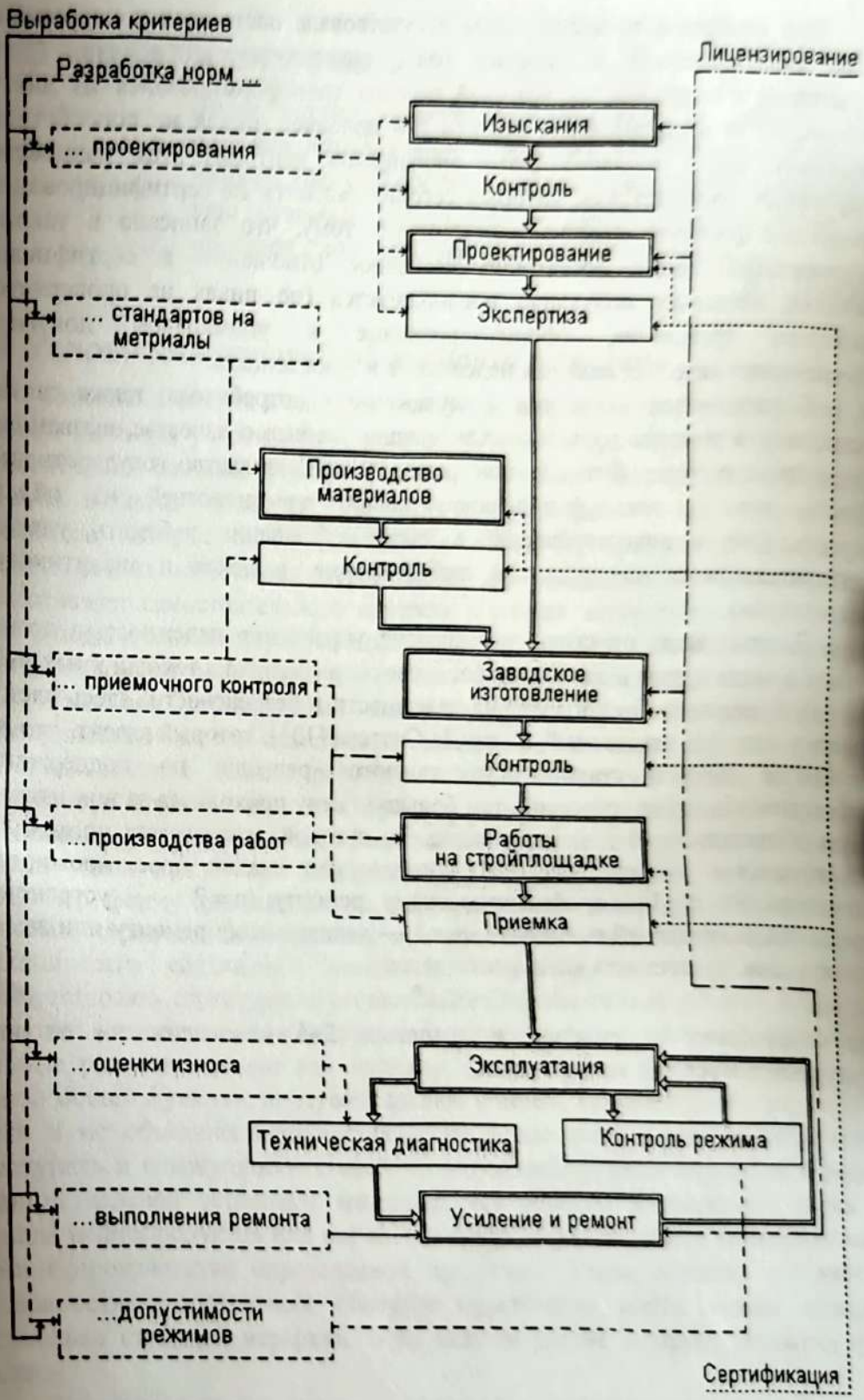


Рис.5.20. Лицензирование и сертификация

Они созданы в то время, когда отсутствовала настоящая конкуренции и когда приобретенный за многие годы внерыночных отношений стиль неуважения к потребителю, который сегодня трансформировался из диктата производителя в стремление обмануть его половчее, никак не способствовал названным целям создания таких механизмов контроля. Так называемый «сертификат соответствия», который сегодня выдается на сертифицированную продукцию (такое-то изделие соответствует тому, что записано в такой-то документации) имеет достаточно косвенное отношение к сертификации качества, поскольку молчаливо предполагается (но никак не проверяется), насколько требования, сформулированные в упомянутом документе обеспечивают качество, включая надежность и безопасность.

С упомянутым выше стилем неуважения к потребителю также связаны искажения, а зачастую прямая фальсификация данных о качестве, вызванная в числе прочего реакцией на административное вмешательство государственной власти, хотя и закамуфлированное новой терминологией из области сертификации и лицензирования, а также стремление избежать учета о действительном состоянии дел в любой форме, включая и аналитические исследования.

Полезно также отметить, что система управления надежностью должна давать в числе прочих и ответы вопрос о сроках выполнения тех или иных работ по поддержанию требуемого уровня надежности и безопасности. Здесь следует иметь в виду, так называемый, закон Де Ситтера [131], который гласит, что чем на более поздней стадии осуществляются решения по поддержанию работоспособности конструкций, тем большую цену приходится за них платить. Если обозначит через n номер стадии, на которой реализуются упомянутые мероприятия и считать, что $n = 0$ соответствует стадии проектирования и строительства; $n = 1$— профилактическому ремонту; $n = 2$ — устранению локальных повреждений и, наконец, $n = 3$ — капитальному ремонту или замене конструкции, то стоимость меняется по закону

$$C = C_o k^n \qquad (5.43)$$

где коэффициент k меняется в диапазоне 2÷5 в зависимости от вида конструкции и условий эксплуатации.

6. Элемент и система

После одного сильного землетрясения из развалин был откопан находившийся в туалете совершенно невредимый человек, который просил прощения у спасателей, признаваясь, что слишком сильно дернул ручку смывного бачка, не предвидя столь катастрофических последствий.

Я.Г. Пановко

6.1 Условность понятий об элементе и системе

Понятия элемента и системы, которыми оперирует теория надежности, во многом являются условными, и один и тот же объект может выступать в роли элемента или системы в зависимости от характера рассматриваемой задачи. Общим является лишь то, что система представляет собой совокупность элементов, которые объединены для выполнения определенной функции, а элемент есть та простейшая часть системы, дальнейшая детализация которой не представляет самостоятельного интереса в рамках конкретного рассмотрения. Такой подход соответствует позиции системного анализа, обычно используемого при исследовании роли структуры системы в обеспечении ее надежности.

Уже сам строительный материал (сталь, бетон и др.) является совокупностью зерен, кристаллов, волокон и в такой дисциплине, как материаловедение, должен рассматриваться как система, однако в задачах надежности строительных конструкций такая степень детализации вряд ли рациональна. Здесь чаще всего в роли элемента выступает стержень, его сечение, панель, блок и т.п. Они объединены в несущую систему, которая имеет, например, форму арки или фермы, перекрытия или стены, другие классические системы строительной механики и такое объединение реализовано в виде механических соединений элементов. В здании или сооружении могут присутствовать структурные составляющие, выполняющие различные частные функции (ограждающие конструкции, отопление, вентиляция, лифты) и в этом смысле рассматриваемые как системы (подсистемы), однако с точки зрения некой общей функции, присущей зданию в целом, являющиеся его элементами, хотя и не объединенными механически. Более того, в роли системы могут выступать и совокупности зданий и сооружений, функционирующих в рамках единой целевой установки, например, все объекты резервуарного парка на складе нефтепродуктов или все здания цехов, объединенных в технологической линии производства определенной продукции. Таким образом, при анализе надежности строительных объектов практически всегда можно выделить несколько ступеней иерархии, и на каждом уровне иерархии решаются свои задачи.

Важным является одно — системой в надежностном смысле является любая совокупность объектов, в которой отказ нескольких (иногда — одного) такого объекта приводит к нарушению функционирования всей совокупности.

При таком определении в качестве системы может рассматриваться и совокупность объектов, формально не выполняющих единую функцию, например, совокупность однотипных изделий таких, как конструкции, выполненные по одному типовому проекту. Действительно, серьезная авария с одним таким изделием часто вызывает необходимость проверки в натуре других экземпляров конструкции, установленных в других местах. Так случилось, например, когда после нескольких аварий было принято решение обследовать все конструкции покрытий производственных зданий, изготовленные из кипящей стали. Аналогичный пример имеется в автомобильной промышленности США, где на заводы были затребованы обратно все автомобили одной марки, когда обнаружились конструктивные дефекты их тормозной системы.

Если отказ любого из элементов ведет к отказу системы в целом, то говорят, что система состоит из последовательно соединенных элементов. Если же такой отказ не влечет за собой отказ системы, то говорят, что элемент включен в систему параллельно. Эта электротехническая терминология прочно укоренилась в теории надежности, хотя она и связана с некоторыми сложностями при рассмотрении механических систем. Для них необходимо различать силовую структуру взаимодействия отдельных элементов (например, стержней в рамном каркасе) от логической структуры взаимодействия элементов по возможным отказам. Изображения таких структурных схем резко отличаются.

В качестве простейшего примера системы с последовательными соединениями элементов чаще всего называют статически определимую конструкцию, в которой отказ одного элемента ведет к отказу системы в целом. Правда, при этом забывают добавить, что речь идет только об отказах типа разрушения элемента, потому что для таких, например, отказов, как нарушение ограничения по частоте собственных колебаний логическая схема будет другой, да и сами понятия элемента и системы поменяются. Это не значит, что понятие о последовательном (в смысле надежности) соединении элементов связано только с отказами типа разрушения. Так, кровля здания (система), состоящая из отдельных листов асбофанеры (элементы), отказывает (течет) при протечках в любом листе асбофанеры.

Последовательные системы (их часто называют цепями) являются в определенном смысле простейшими. Для них получены формулы, позволяющие найти вероятность безотказной работы системы по вероятностям безотказной работы элементов и все другие показатели для системы. Чем большее число элементов n входит в цепь, тем ниже безотказность системы, это иллюстрируется рис.6.1, где для цепи из независимых элементов с одинаковой вероятностью отказа P_1 построена вероятность безотказности системы P_n в функции от n.

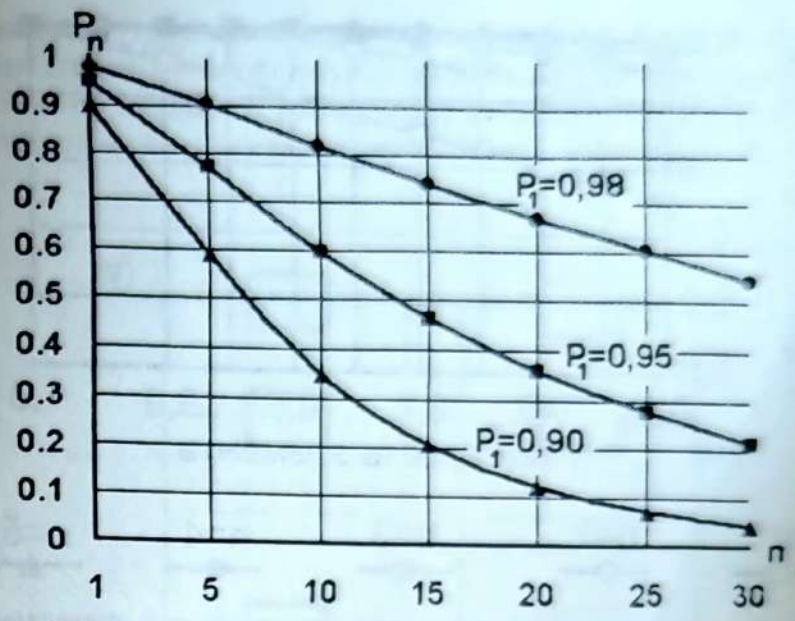


Рис.6.1. Вероятность безотказности последовательной системы из n элементов

Из факта резкого падения P_n с ростом n некоторые авторы делали весьма далеко идущие выводы о необходимости введения поправочных коэффициентов на число элементов в системе и о практической ненадежности таких, например, систем, как трубопроводные (вводилась в рассмотрение «последовательная схема» из многих тысяч элементарных участков трубопровода, играющих роль «элементов», но при этом не учитывалось отсутствие свойства независимости элементов).

Показатели надежности системы при параллельно соединенных элементах рассчитываются по формулам, соответствующим структуре системы. Примером чисто параллельного соединения элементов является группа лифтов высокого здания, работающих на общий поток посетителей. Если элементы такой системы независимы и имеют вероятность безотказной работы $P_э$, то при n параллельно включенных элементах безотказность системы P_c определяется формулой

$$P_c = 1 - (1 - P_э)^n. \qquad (6.1)$$

Результаты вычислений по формуле (6.1) показаны на рис.6.2, из которого видно, что при параллельном соединении безотказность системы может превышать надежность отдельных элементов.



Рис.6.2. Вероятность безотказности параллельной системы из n элементов

Формулы, аналогичные (6.1), для систем с параллельно-последовательными (рис.6.3,а) и последовательно-параллельными (рис.6.3,б) элементами хорошо известны и дают определенную ориентировку для анализа реальных конструкций, структурная схема которых редко относится к числу таких простейших. Однако исследование упрощенных структурных схем приводит к весьма важному практическому выводу общего типа: чем ниже уровень иерархии, на котором производится распараллеливание (резервирование), тем при прочих равных условиях выше надежность системы.

В работе [101] отмечается, что многие отказы строительных металлоконструкций возникают на уровне атомной или кристаллической структуры материала, и если имеется возможность предотвратить их (например, за счет улучшения технологии обработки деталей или более строгого контроля), то надежность такой конструкции будет выше, чем надежность конструкции с дублированными элементами, выполненными из недостаточно надежных материалов. Тем не менее в строительных конструкциях резервирование на более высоких ступенях иерархии часто используется, хотя и более сложными способами, чем простое увеличение числа параллельно работающих элементов. Здесь используются не только структурные подходы (например, использование статически неопределимых систем), но и методы, основанные на функциональной избыточности, которые предусматривают выполнение одной и той же функции различными способами (лифт и лестница рядом с ним — это простейший пример), а также на применении систем со специальной защитой (см.5.8).

Эффективными являются такие приемы резервирования, как применение вместо одиночного стержня, работающего на растяжение, многожильного каната

или использование группы болтов вместо одного болта большого размера. Подсчеты, выполненные по формулам работы [20], показывают, что, например, при замене одного несущего растянутого элемента тремя параллельными (при одинаковой общей площади) вероятность отказа меняется от $V_1 = 0{,}08076$ до $V_3 = 0{,}00012$.

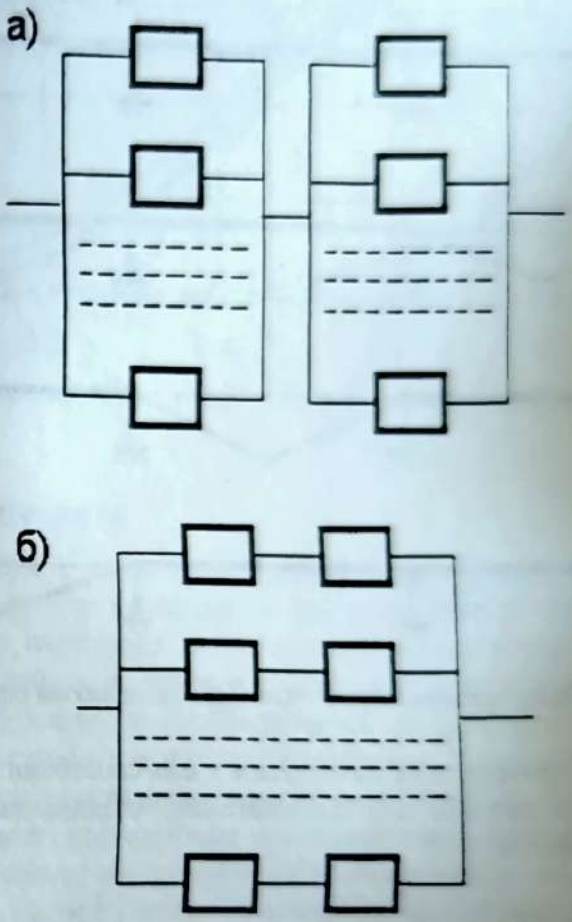


Рис.6.3. Структурные схемы систем

Чисто структурный анализ надежности несущих конструкций дает важную информацию о самых общих свойствах исследуемой системы. Он может выполняться с использованием логико-вероятностных методов [97], который был применен для анализа надежности несущих конструкций в работах [40], [41], [78]. Были показаны методы составления выражений для оценки надежности системы P_c, если известны вероятности отказов Q_i или безотказной работы $R_i = (1 - Q_i)$, ее отдельных элементов (критических сечений), а также известны все конкурирующие схемы разрушения. При этом оказалось, что для высоконадежных систем с большой степенью достоверности можно пренебречь вероятностью взаимодействия между отдельными возможными схемами разрушения и считать их статистически независимыми. Для простейшей системы

в виде трехпролетной неразрезной балки (рис.6.4), имеющей пять критических сечений и три возможных механизма разрушения, на рис.6.5 показаны зависимости общей надежности системы от вероятности безотказной работы сечений в предположении, что эти вероятности одинаковы для всех критических сечений.

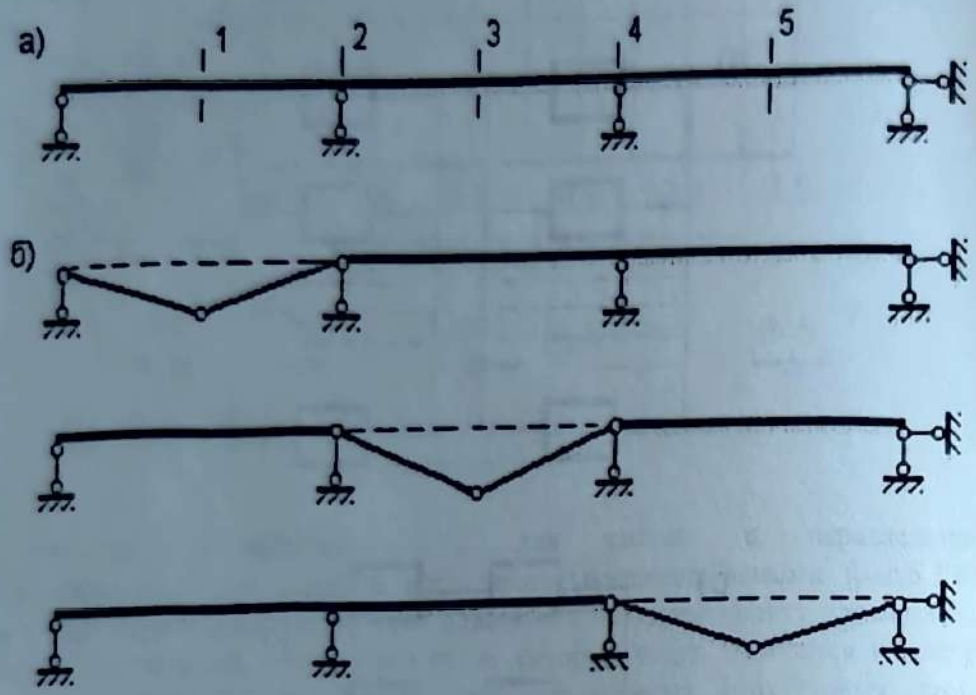


Рис.6.4. Схема трехпролетной балки (а) и механизмы разрушения (б)

При этом вероятность Pc вычислялась тремя способами:

а) как для системы с последовательно соединенными критическими сечениями по формуле

$$P_c = \prod_{i=1}^{5} R_i \; ; \qquad (6.2.а)$$

б) как для системы со статистически независимыми механизмами разрушения, показанными на рис.6.4.б, по формуле

$$P_c = (1-Q_1Q_2)(1-Q_2Q_3Q_4)(1-Q_4Q_5) \; ; \qquad (6.2.б)$$

в) по точной формуле *[40]*

$$P_c = R_1R_3R_5Q_2Q_4 + R_1R_4Q_2 + R_2(1-Q_4Q_5). \qquad (6.2.в)$$

Результаты соответствуют кривым 1, 2 и 3 на рис.6.5. Видно, что при R > 0,8 кривые 2 и 3 практически совпадают, а данные по (6.2.а) являются слишком грубыми.

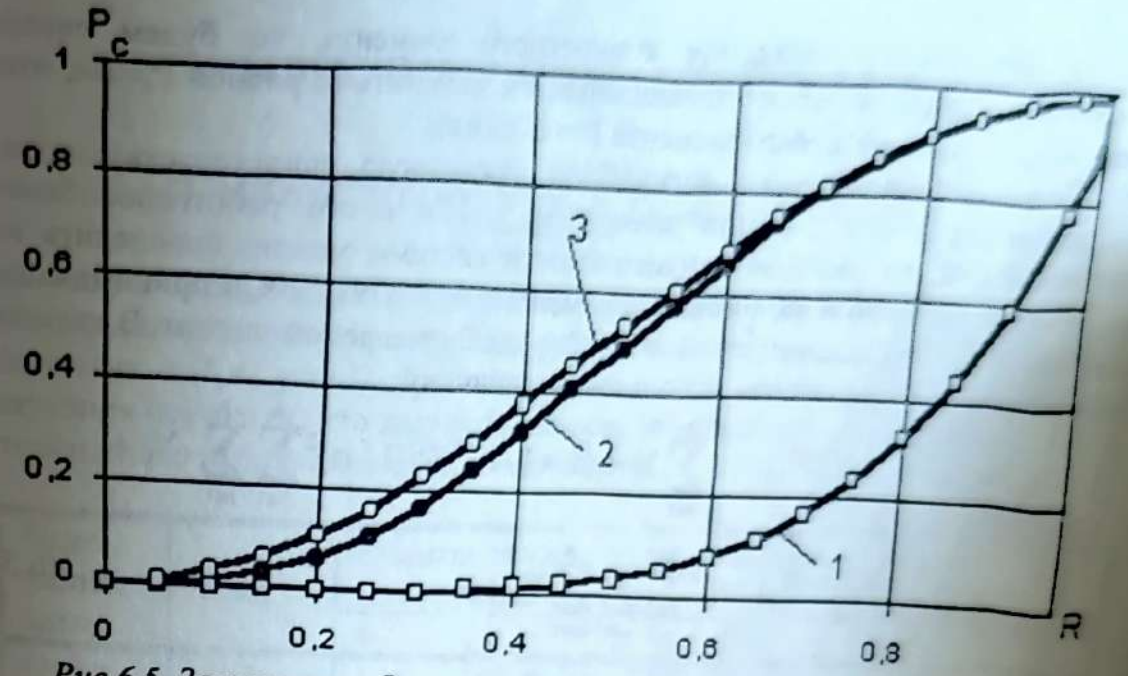


Рис.6.5. Зависимость P_c от вероятности безотказной работы сечений

6.2 Оценка живучести

Хотя понятие «живучесть» известно в технике давно и на полуинтуитивном уровне используется при сопоставлении вариантов несущих систем различного назначения, его точное описание применительно к анализу несущих конструкций до недавнего времени не рассматривалось.

Следуя [123], живучесть рассматривается как свойство системы сохранять при катастрофических возмущениях способность к выполнению основных функций, не допуская каскадного развития возмущений и отказов, что в конце концов обеспечивает последующее восстановление системы. Имея в виду, главным образом, оценку структурных свойств несущих систем, будем понимать под возмущением выход из строя (исключение из системы) какого-нибудь из элементов, а под основной функцией, подлежащей сохранению, сохранение геометрической неизменяемости всей системы или ее определенной части.

Рассматривая возмущения в виде полного выхода из строя элементов системы, отметим, что они чаще всего являются следствием аварийных воздействий или грубых ошибок персонала. Типичными примерами могут служить случаи, когда при монтаже "забывают" выполнить соединение (сварной шов или болтовой стык) или же в процессе эксплуатации удаляют "мешающие" связи. Такие возмущения плохо поддаются статистическому анализу, однако можно предполагать, что вероятность встретиться с ними растет с увеличением числа элементов в системе n, хотя и медленнее, чем линейно, поскольку вместе с усложнением системы обычно возрастает и тщательность контроля.

Представляется подходящей зависимость $P=C\ \ln(n)$ для вероятности встретиться с возмущением рассматриваемого типа. При этом константа C должна быть достаточно малой, поскольку речь идет о редких событиях. Что же

касается вероятности поражения конкретного элемента, то будем считать элементы в этом отношении равноценными и полагать ее равной $P_e=1/n$, что в конце концов дает для любого элемента $P = C\ln(n)/n$.

Если обозначить через x_i логическую переменную, свидетельствующую о выходе из строя i-го элемента значением $x_i=1$ и о его работоспособности значением $x_i=0$, то свойство неизменяемости системы можно определить как логическую функцию n логических переменных $Y = Y(x_1,..., x_n)$, принимающую значение $Y = 1$ для неизменяемой и $Y = 0$ — для изменяемой систем. В качестве меры живучести предлагается использовать величину

$$\eta_y = (1-1/n)^{(n-1)}(1/n)\sum_{i=1}^{n} Y_i + (1-1/n)^{(n-2)}(1/n)^2\sum_{j<i}^{n}\sum_{i=1}^{n} Y_{ij} +$$

$$+ (1-1/n)^{(n-3)}(1/n)^3\sum_{j<1}^{n}\sum_{i<k}^{n}\sum_{k=1}^{n} Y_{ijk} + \cdots\cdots, \qquad (6.3)$$

где обозначено

$$Y_i = \{Y(x_1,...,x_n) \mid x_i = 1, , x_s=0 \quad (i \neq s)\},$$

$$Y_{ij} = \{Y(x_1,...,x_n) \mid x_i = 1, x_j = 1, \ x_s=0 \quad (i,j \neq s)\},$$

$$Y_{ij\,k}=\{Y(x_1,...,x_n) \mid x_i = 1, x_j = 1, x_k = 1, x_s=0 \quad (i,j,k \neq s)\}.$$

Количество слагаемых в формуле (6.3) не превышает степень статической неопределимости r и при этом каждое последующее слагаемое меньше предыдущего, поскольку коэффициенты перед суммами $K_j = (1 - 1/n)^{(n-j)}(1/n)^j$ находятся в соотношении $K_{j+1} / K_j = 1/(n - 1)$.

В работе [73] был предложен формальный аппарат для подсчета элементов суммы (6.3), основанный на конечно-элементном анализе конструкции и преобразованиях структурной матрицы с помощью жордановых исключений. Процесс исключений продолжается вплоть до получения полностью нулевой матрицы (система становится статически определимой) и позволяет установить цепочку преобразований, приводящих к возможности потери геометрической изменяемости. При этом все операции выполняются автоматически и полностью формализованы.

Часто в роли показателя качества системы может выступить не свойство ее геометрической неизменяемости, а размер остающегося жестким остова, т.е. считается, что некоторые разрушения с превращением в механизм возможны, но это не должно носить глобального характера. Если избрать в качестве оценочной функции относительное количество узлов, входящих в остающийся жестким остов, то в (6.3) вместо Y_i, Y_{ij}, Y_{ijk}... следует вводить величины D_i, D_{ij}, D_{ijk},..., характеризующие это относительное количество при условии выбытия одного, двух, трех и т.д. элементов системы. Указанный способ оценки определяет при этом, например, сложность и стоимость восстановления конструкции.

Использование оценок D вместо Y дает новую меру

$$\eta_d = (1-1/n)^{(n-1)}(1/n)\sum_{i=1}^{n} D_i + (1-1/n)^{(n-2)}(1/n)^2 \sum_{j<i}^{n}\sum_{i=1}^{n} D_{ij} +$$

$$+ (1-1/n)^{(n-3)}(1/n)^3 \sum_{j<1}^{n}\sum_{i<k}^{n}\sum_{k=1}^{n} D_{ijk} + \cdots\cdots, \qquad (6.4)$$

пригодную для оценки структурной живучести и статически определимых систем, для которых мера η_y была равна тождественно нулю. При этом число слагаемых в (6.4) уже будет большим, чем (r-1), однако свойство их сильного затухания останется, что дает возможность ограничиться при реальных расчетах относительно небольшим числом членов ряда.

Таблица 6.1

Безотказные элем.	E_0	Суммарное число узлов в остове для схем конструкций					
		a	b	c	d	e	f
Отсутствуют	1	4	8	12	19	21	18
	2	2	8	18	26	26	16
	3	0	4	20	24	22	12
	4	0	1	15	10	10	5
	5	0	0	0	2	2	1
$x_1 \equiv 0$	1	4	6	10	16	18	18
	2	2	4	12	21	20	16
	3	0	1	10	17	15	12
	4	0	0	7	6	6	5
	5	0	0	0	1	1	1
$x_2 \equiv 0$	1	4	8	10	16	18	18
	2	2	8	12	21	20	16
	3	0	4	10	17	15	12
	4	0	1	7	6	6	5
	5	0	0	0	1	1	1
$x_3 \equiv 0$	1	2	6	10	17	18	15
	2	0	4	12	14	16	10
	3	0	1	10	10	9	5
	4	0	0	7	2	2	1
	5	0	0	0	0	0	0
$x_4 \equiv 0$	1	4	8	12	18	18	15
	2	2	8	18	18	18	10
	3	0	4	20	10	8	5
	4	0	1	3	2	2	1
	5	0	0	0	0	0	0

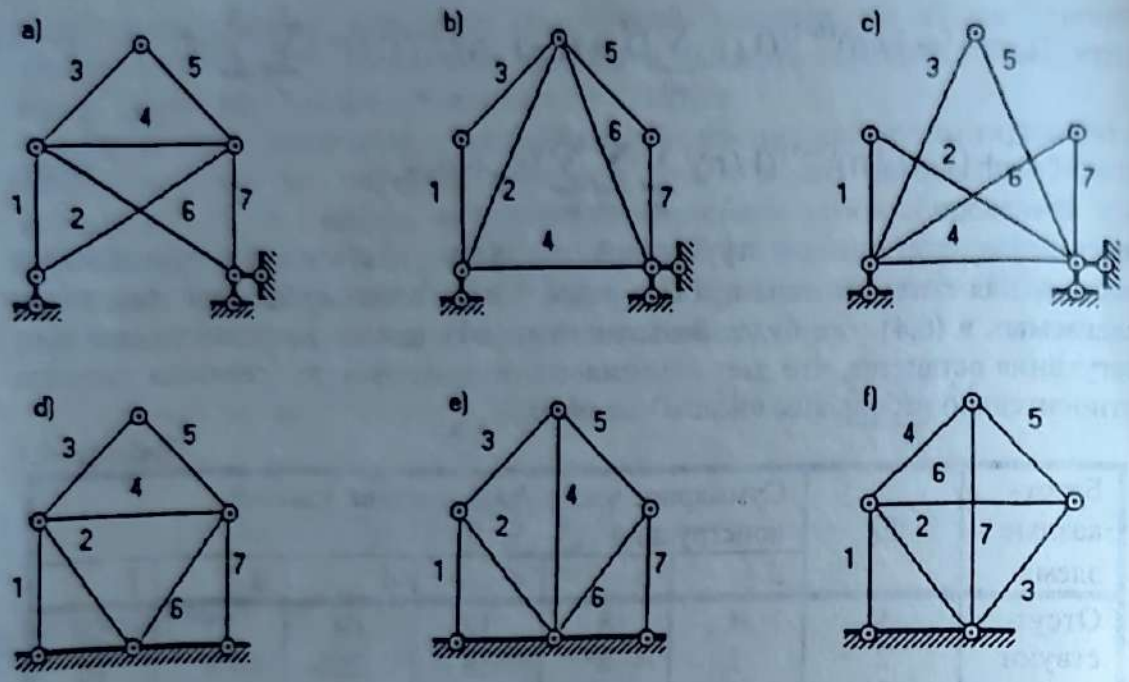


Рис.6.6. Структуры семистержневых (a - f) ферм с различными показателями живучести

Идея секционирования схемы на несвязные подсистемы, когда такая изоляция прерывает лавинообразное развитие отказов, хорошо известна, ибо еще при строительстве сказочного Ноева ковчега самим Богом было указано: «Отделения сделай в ковчеге и осмоли его изнутри и снаружи ... и сделай его из дерев гоффер и нимотриклин».

Имеет также смысл ввести меры:

$$\xi_{yi} = \eta_y - (\eta_y \mid x_i=0), \qquad \xi_{di} = \eta_d - (\eta_d \mid x_i=0) \ (i=1,...,n) \tag{6.5}$$

где вычитаемые члены определяются по той же формуле (6.3) или (6.4), но при условии обязательного присутствия во всех рассматриваемых вариантах схем i-го элемента ($x_i \equiv 0$). С помощью этих мер можно оценить вклад каждого элемента в структурную живучесть системы и произвести их ранжирование по важности [123].

Рассмотрим в качестве примера шесть схем (три статически определимые и три однократно статически неопределимые), изображенные на рис.6.6,a — 6.6,f.

Все схемы имеют по три внеопорных узла и по семь элементов. Поскольку для всех схем число элементов одинаково, то вероятность возмущения P также будет одинакова и поэтому при сравнениях она не учитывалась. Необходимые для подсчетов данные приведены в табл. 6.1, где для всех схем указано суммарное число неподвижных узлов E_0 в остове, т.е. значения сумм ΣD, $\Sigma\Sigma D$ и т.д. в зависимости от числа одновременно выбывающих элементов,

определенные для всех возможных вариантов выбытия элементов, которые не указаны в качестве абсолютно безотказных.

Оценки η и ξ вычислены по формулам (6.5) и результаты расчетов даны в табл.6.2. Из анализа результатов видна роль безусловно необходимых элементов, можно также заметить, что построение системы с использованием принципа автономизации функций элементов (схема "c") улучшает оценку.

Таблица 6.2

Оценка	Численные значения для схем конструкции (рис.6.6):					
	a	b	c	d	e	f
η_d	0,082	0,178	0,295	0,453	0,491	0,397
ξ_{d1}	0	0,152	0,063	0,076	0,079	0
ξ_{d2}	0	0	0,063	0,076	0,079	0,057
ξ_{d3}	0,044	0,052	0,063	0,090	0,096	0,080
ξ_{d4}	0	0	0,001	0,084	0,084	0,080

Возможен и другой путь секционирования, когда вводятся дополнительные усиливающие элементы, роль которых сводится к остановке лавинообразного развития разрушений. Обе эти идеи иллюстрируются рис.6.7, где изображены варианты схем, имеющих по девять элементов и по три внеопорных узла. Оценки структурной живучести этих схем: $\eta_d(a) = 0{,}4997$; $\eta_d(b) = 0{,}6464$; $\eta_d(c) = 0{,}8526$; $\eta_d(d) = 1{,}0751$.

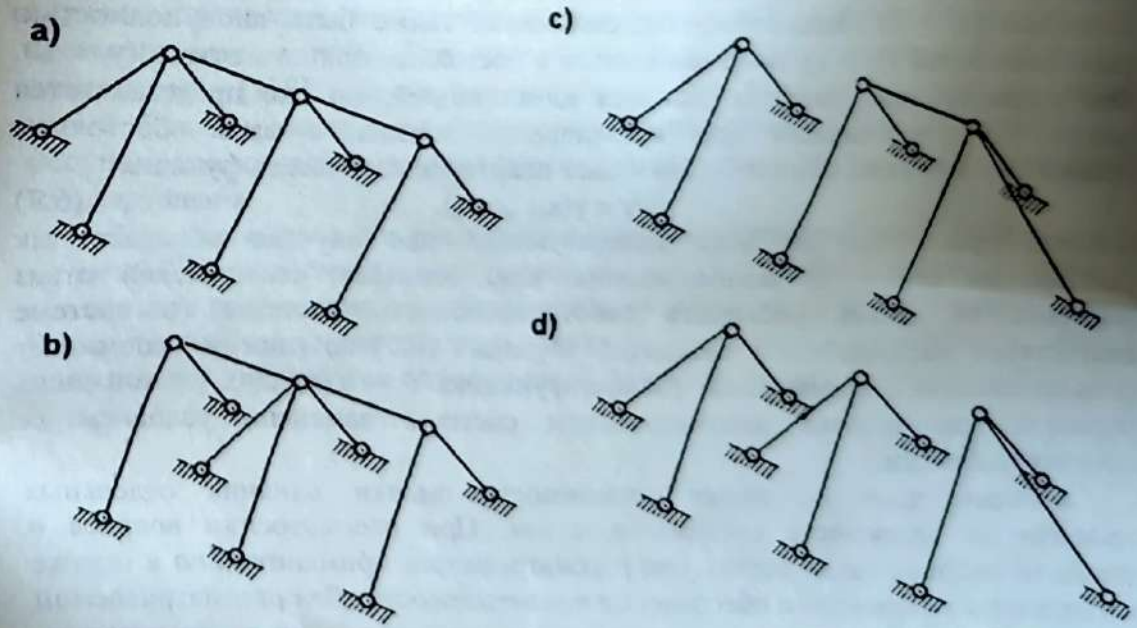


Рис.6.7. Системы с различными способами секционирования

Что касается сопоставления способов секционирования, то, по-видимому, они могут быть достаточно близкими по эффективности, подобно двум широко известным способам противопожарной защиты — устройству несгораемых преград или организации разрывов в застройке.

Возвращаясь к анализу роли безусловно необходимых элементов, отметим, что для систем, которые их не имеют, все члены первой суммы в (6.3) равны единицам. Если обобщить это свойство, предполагая, что и во всех других суммах не исчезнет ни одно слагаемое и каждая из таких сумм получит максимально возможное значение (быть может, и недостижимое ни в какой реальной системе), т.е. когда $\Sigma Y_i = n$, то можно считать такой случай некоторым эталоном живучести, для которого получим:

$$\sum_{i=1}^{n} Y_i = n, \quad \sum_{i<j}^{n}\sum_{j=1}^{n} Y_{ij} = n(n-1)/2, \quad \sum_{i<j}^{n}\sum_{j<k}^{n}\sum_{k=1}^{n} Y_{ijk} = n(n-1)(n-2)/6.$$

Тогда вместо (6.3) будем иметь

$$\eta_y^* = \sum_{i=1}^{r} \frac{(1-1/n)^{(n-1)}(1/n)^i n!}{i!(n-i)!} = \mathbf{Bi}(r;n,1/n) - (1-1/n), \qquad (6.6)$$

где $Bi(r;n,1/n)$ — функция биноминального распределения.

6.3 Оценка важности элементов

Имея в виду структурные характеристики, будем считать, что любой элемент может находиться либо в работоспособном состоянии, что для i-го элемента обозначается как $x_i = 1$, либо в полностью неработоспособном состоянии ($x_i = 0$). Аналогично система может также быть либо полностью работоспособной ($y_i = 1$), либо находиться в состоянии полного отказа ($y_i = 0$). Это предположение, конечно, является идеализацией, но оно представляется достаточно реалистичным для исследования четких отказов. Состояние элементов с состоянием системы связывает некоторая логическая функция

$$y = y(x_1, ..., x_n), \qquad (6.7)$$

которая практически во всех интересующих нас случаях обладает так называемым *свойством монотонности*. Оно означает, что никакой отказ элемента не может увеличить работоспособность системы (в системе отсутствуют «враждебные» элементы). Функция (6.7) во многом напоминает использованную в предыдущем разделе функцию $Y = Y(x_1,..., x_n)$ с той лишь разницей, что условие неизменяемости системы заменено условием ее работоспособности.

Большое значение имеет возможность оценки влияния отдельных элементов на надежность системы в целом. При рассмотрении вопроса о живучести системы такая задача уже рассматривалась применительно к оценке роли отдельных элементов в обеспечении неизменяемости. Для рассматриваемой постановки задачи используется ряд специальных характеристик, раскрывающих роль элемента в обеспечении работоспособности системы [123]:

значимость ξ_i элемента x_i в системе $y(x_1, ..., x_n)$ — определяется как частная производная от вероятности безотказной работы системы по вероятности безотказной работы элемента, т.е.

$$\xi_{xi} = \partial P\{y(x_1, ..., x_n) = 1\} / \partial P\{x_i = 1\}; \qquad (6.8)$$

вклад B_i элемента x_i в системе $y(x_1, ..., x_n)$ — определяется как произведение вероятности безотказной работы элемента $R_i = P\{x_i = 1\}$ на его значимость

$$B_i = R_i \, \partial P\{y(x_1, ..., x_n) = 1\} / \partial P\{x_i = 1\} \qquad (6.9)$$

и характеризует приращение надежности системы после восстановления элемента x_i из неработоспособного состояния в работоспособное с вероятностью его безотказной работы, равной R_i;

удельный вклад b_i элемента x_i в системе $y(x_1, ..., x_n)$ —определяется как нормированное значение вклада

$$b_i = B_i / \sum_{j=1}^{n} B_i. \qquad (6.10)$$

Для систем с простейшей структурой нетрудно проанализировать эти характеристики в общем виде [128]. Так, для последовательной системы наибольшую значимость имеет элемент с наименьшей надежностью («где тонко, там и рвется»), а для систем с параллельной структурой — элемент с наибольшей надежностью (это соответствует тому, что такая система работоспособна, пока работает хотя бы один из ее элементов). В более общих случаях определение значимости, вклада и удельного вклада требует достаточно сложных вычислений. Для упрощения вычислений может использоваться доказанная в [128] теорема, утверждающая, что важность элемента тем выше, чем в большем числе схем отказа этот элемент присутствует. Применительно к несущим конструкциям такими схемами отказа являются возможные механизмы их разрушения.

В качестве примера рассмотрим схему двухэтажной рамы, изображенную на рис.6.8*), для которой с использованием шести главных (наиболее вероятных) механизмов разрушения и в предположении вероятности отказа сечения, равной 0,1, получены все характеристики важности. Их значения приведены в табл.6.3, для удельного вклада они в графической форме представлены на рис.6.9.

*) Пример заимствован из докторской диссертации С.Ф. Пичугина [57]

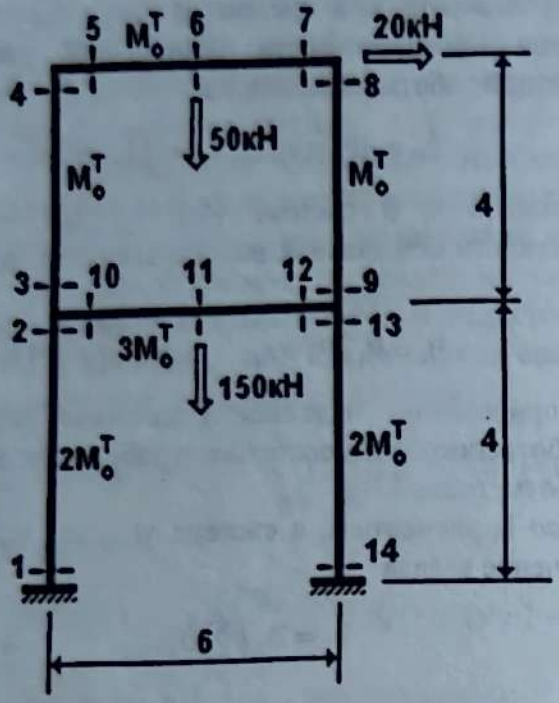


Рис.6.8. Схема двухэтажной рамы

Таблица 6.3

Номера сечений (рис.6.8)	Значимость	Вклад	Удельный вклад	Число механизмов разрушения	Ранжирование
1	$8{,}085\times10^{-6}$	$7{,}276\times10^{-6}$	$1{,}030\times10^{-4}$	1	11
2	$1{,}692\times10^{-5}$	$1{,}523\times10^{-5}$	$2{,}150\times10^{-4}$	2	10
3	$8{,}083\times10^{-4}$	$7{,}275\times10^{-4}$	$1{,}030\times10^{-2}$	1	8
4	0	0	0	0	13
5	$9{,}888\times10^{-3}$	$8{,}899\times10^{-3}$	$1{,}259\times10^{-1}$	2	6
6	$1{,}082\times10^{-2}$	$9{,}742\times10^{-3}$	$1{,}378\times10^{-1}$	4	2
7	$1{,}819\times10^{-2}$	$1{,}637\times10^{-2}$	$2{,}315\times10^{-1}$	5	1
8	0	0	0	0	14
9	$8{,}109\times10^{-3}$	$7{,}298\times10^{-3}$	$1{,}032\times10^{-1}$	3	7
10	$9{,}980\times10^{-3}$	$8{,}982\times10^{-3}$	$1{,}270\times10^{-1}$	1	5
11	$1{,}001\times10^{-2}$	$9{,}000\times10^{-3}$	$1{,}273\times10^{-1}$	4	4
12	$1{,}071\times10^{-2}$	$9{,}640\times10^{-3}$	$1{,}363\times10^{-1}$	2	3
13	$1{,}692\times10^{-5}$	$1{,}523\times10^{-5}$	$2{,}150\times10^{-4}$	2	9
14	$8{,}012\times10^{-6}$	$7{,}211\times10^{-6}$	$1{,}021\times10^{-4}$	1	12

В последней графе табл.6.3 указываются ранги сечений, т.е. места, которые они занимают в ряду удельных вкладов. Нетрудно видеть, что ранжирование по вкладу и значимости в данном примере оказывается таким же, однако это не является общим правилом и не составляет труда привести примеры, когда такие ранжировки не совпадают.

Ранжирование сечений дает конструктивную подсказку для принятия решений по их усилению, если оказывается, что общая надежность системы недостаточна. Кроме того ранг элемента указывает на первоочередные меры по контролю состояния элементов системы как при приемке в эксплуатацию, так и во время планово-предупредительных мероприятий в процессе эксплуатации.



Рис.6.9.Диаграмма удельных вкладов

Надежность системы P_c является функцией от надежности ее элементов p_i. Обозначим через **P** вектор с компонентами p_i, а для того, чтобы иметь возможность различать крайние по надежности (абсолютно надежное и абсолютно ненадежное) состояния отдельного элемента, введем обозначения:

$$(1_i, \mathbf{P}_{\cdot i}) = (p_1, p_2, \ldots > p_{i-1}, 1, p_{i+1}, \ldots, p_n),$$
$$(0_i, \mathbf{P}_{\cdot i}) = (p_1, p_2, \ldots > p_{i-1}, 0, p_{i+1}, \ldots, p_n). \qquad (6.11)$$

Важностью по Бирнбауму [10] называют частную производную

$$I_B(i,\mathbf{P}) = \partial P_c(\mathbf{P})/\partial p_i = P_c((1_i, \mathbf{P}_{\cdot i})) - P_c((0_i, \mathbf{P}_{\cdot i})). \qquad (6.12)$$

Если рассматривать эту величину как функцию времени, то $I_B(i,\mathbf{P}(t))$ интерпретируется как вероятность того, что в момент времени t i-й элемент находится в критическом состоянии и его отказ в этот момент времени приведет непосредственно к отказу системы.

Если изменить надежность i-го элемента с p_i до p^*_i, то, как показали Цай Шен [159], надежность системы изменится на

$$\Delta P_c^{(i)} = (p^*_i - p_i)\, I_B(i,P). \qquad (6.13)$$

Заметим, что для последовательной системы, у которой без ограничения общности можно полагать надежность элементов упорядоченной как $p_1 \le p_2 \le \ldots \le p_n$

$$P_c = \prod_{i=1}^{n} p_i . \qquad (6.14)$$

Следовательно,

$$I_B(i,P) = \prod_{j=1(j\neq i)}^{n} p_j , \qquad (6.15)$$

что с учетом предположения об упорядочении надежности элементов дает

$$I_B(1,P) \ge I_B(2,P) \ldots \ge I_B(n,P) . \qquad (6.16)$$

Поэтому элемент с наименьшей надежностью имеет наибольшее влияние на надежность системы. Для параллельной системы аналогичный анализ дает

$$I_B(1,P) \le I_B(2,P) \ldots \le I_B(n,P), \qquad (6.17)$$

и, следовательно, наибольшее значение имеет элемент с наибольшей надежностью. Это соответствует тому, что параллельная система работоспособна, пока работает хотя бы один из ее элементов.

6.4 Основные, восстанавливаемые и сменные элементы

Для простоты рассмотрим систему как цепь элементов (см. раздел 6.1), что является некоторой идеализацией реальной ситуации, но идеализацией, дающей оценки в запас надежности. Кроме того будем предполагать, что анализ, о котором сказано в разделе 1.6, подтвердил приемлемость применения экспоненциального закона надежности. Тогда вероятность безотказной работы, зависящая от интенсивности отказов отдельных элементов λ_i и времени функционирования системы T, определяется формулой

$$P = \prod_{i=1}^{n} P_i = \exp\left(-T \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \right) \qquad (6.18)$$

Обратим внимание на то, что различные элементы системы по-разному обслуживаются в процессе ее эксплуатации. Некоторые элементы невозможно или нецелесообразно серьезно ремонтировать, поскольку такой ремонт по сути означал бы замену всей системы новой, а такая замена обычно реализуется совместно с полной модернизацией объекта. Такие элементы будем называть основными, для них интенсивность отказов λ_o является величиной постоянной.

Другие элементы ремонтируются в процессе работы системы, и их надежность при ремонте восстанавливается. Однако чаще всего полное восстановление является затруднительным и после ремонта элемент имеет несколько большую (по сравнению с новым) интенсивность отказов. Предположим, что интенсивность отказов такого элемента линейно зависит от числа ремонтов m и определяется формулой

$$\lambda_p(m) = \lambda_{po}(1 + \alpha m), \tag{6.19}$$

где λ_{po} — интенсивность отказа нового элемента из рассматриваемой группы; α — некоторая константа, определяющая степень восстановления свойств элемента.

Наконец, в системе могут присутствовать элементы, для которых интенсивность отказов после ремонта восстанавливается полностью, что эквивалентно их замене новыми. Такие элементы будем называть сменными независимо от того, каким образом (заменой или полным восстановлением) реализуется ремонт.

Вероятность безотказной работы основного, восстанавливаемого и сменного элемента определяется формулами:

$$P_o = \exp(-\lambda_o T); \tag{6.20}$$

$$P_b = \exp\left[-\lambda_{po}(1+\alpha m)(T - mT_p)\right]; \tag{6.21}$$

$$P_c = \exp\left[-\lambda_{co}(T - mT_p)\right], \tag{6.22}$$

где T_p — период между ремонтами.

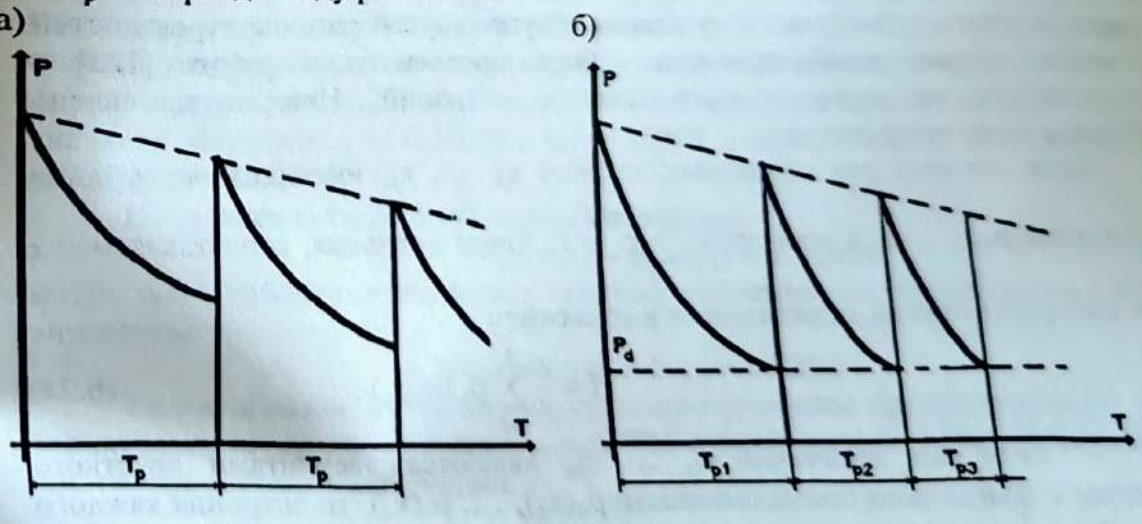


Рис.6.10. Функция надежности восстанавливаемой системы: а - при постоянном межремонтном периоде; б - с обеспечением допустимой вероятности отказа

Когда в системе присутствуют элементы всех трех типов, то предполагая, что P_a, P_b и P_c характеризуют вероятность наименее надежных представителей своей группы, и с учетом последовательной структуры системы в целом, получим для нее значение функции безотказности

$$P = P_a P_b P_c. \qquad (6.23)$$

Если межремонтный период T_p является постоянным, то несмотря на проведенные ремонты, функция надежности системы в целом снижается с течением времени за счет свойств восстанавливаемых элементов в соответствии с (6.21). Эта особенность рассматриваемых систем отражена на рис. 6.8,а.

Можно использовать другую стратегию ремонтов, когда они выполняются сразу же после падения вероятности отказов до некоторого допустимого уровня P_d. Тогда срок между ремонтами сокращается с течением времени (рис.6.10,б).

6.5 Субъективная оценка поведения элемента в системе

Пусть, например, по результатам испытаний или детальных вероятностных расчетов отдельных конструктивных элементов установлена вероятность p_e того, что прочность отдельного элемента τ_e не ниже чем уровень Θ, т.е. $Вер(\tau_e \geq \Theta) = p_e$. Однако, прочность $\tau_к$ того же элемента в конструкции отличается от τ_e и вероятность $Вер(\tau_к \geq \Theta) = p_к \neq p_e$. Чтобы отличить p_e от $p_л$, надо учесть множество трудно поддающихся анализу факторов (фактическую податливость узловых сопряжений, изменения в материале при технологических воздействиях типа сварочного нагрева, повреждения в процессе монтажа и т.п.) и вероятностный подход оказываются здесь почти несостоятельными. Поэтому напрашивается комбинирование подходов, основанных на вероятностных соображениях, с применением теории нечетких множеств, с помощью которых можно оценить субъективные суждения об упомянутой разнице вероятностей. Методика такого комбинирования была предложена в работе [128] и основывается на использовании понятия энтропии. Ниже представлены основные идеи этого подхода.

Если имеется ряд случайных величин $x_1, \ldots, x_n$, имеющих вероятность реализации $p_1, \ldots, p_n$ и при этом $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$. Тогда энтропия, сопоставляемая с этим набором величин, определяется выражением

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln(p_i). \qquad (6.24)$$

Если же величины $x_1, \ldots, x_n$ являются элементами нечеткого множества с функциями принадлежности $\mu_1(x_1), \ldots, \mu_n(x_n)$, то энтропия каждого такого элемента

$$G_i = -\mu_i(x_i)\ln[\mu_i(x_i)] - [1-\mu_i(x_i)]\ln[1-\mu_i(x_i)]. \qquad (6.25)$$

В общем случае комбинирование энтропии дает значение

$$F(p;\mu) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln(p_i) + D\sum_{i=1}^{n} p_i G_i , \qquad (6.26)$$

где константа D определяется из условия, что если все $\mu(x_i) = 1/2$, т.е. каждый элемент нечеткого множества X может в равной степени принадлежать или не принадлежать к числу истинных суждений, то все вероятности $p_i = 1/n$ и их неопределенность оказывается максимальной. Тогда, как показано в [128]

$$D = -1{,}44270\left(\ln\frac{1}{n} + H\right). \qquad (6.27)$$

В рассматриваемом случае расплывчатое множество X состоит из двух элементов, характеризующих истинную прочность элемента в конструкции $x_1 = \text{Вер}(\tau_к > \Theta)$ и $x_2 = \text{Вер}(\tau_к < \Theta)$. Для каждого из этих случаев можно представить себе субъективную оценку его справедливости, которая будет охарактеризована степенями принадлежности этих суждений $\mu(x_1)$ и $\mu(x_2)$ к множеству истинных суждений.

В работе [128] рассмотрен пример, в котором распределение прочности близко к нормальному со средним значением M и стандартом σ, уровень нагрузки $\Theta = M + 2\sigma$, а вероятность $\text{Вер}(M + 2\sigma < \tau_e) = 0{,}975$.

Пусть для конструктивного элемента в сооружении из некоторых соображений принимается, что $\mu(x_1) = 0{,}8$ и $\mu(x_2) = 0{,}9$. Заметим при этом, что субъективные суждения не обязаны быть взаимно дополняющими, т.е. доля экспертов, высказавших мнение о том, что фактическая несущая способность элемента в системе больше, чем в отдельном элементе, и доля экспертов, придерживающихся противоположного мнения, не составляют вместе 100% (эксперты могут высказаться за различные решения, оговорив для них свою степень уверенности, некоторые эксперты могут воздержаться и т.п.)

Из уравнения (6.25) получаются соответствующие величинам $\mu(x_1)$ и $\mu(x_2)$ значения энтропии $G_1 = 0{,}50040$ и $G_2 = 0{,}32508$, а вычисление по формуле (6.26) дает $F(p;\mu) = 0{,}52868$.

Из уравнения типа (6.24), которое имеет вид

$$-p_1\ln(p_1) - p_2\ln(p_2) = 0{,}52868,$$

могут быть найдены уточненные значения вероятностей, обладающие той же энтропией:

$$p_1 = 0{,}7786 \text{ и } p_2 = 1 - p_1 = 0{,}2214.$$

Таким образом, субъективное суждение уточнило предварительные чисто вероятностные оценки. Значение $p_1 = 0{,}7786$ и будет характеризовать надежность элемента в составе конструкции.

6.6 Классификация систем и элементов

Оценить последствия отказа (в особенности аварийного) конкретного здания или сооружения, как правило, трудно из-за отсутствия точной информации прогнозного характера. Поэтому привлекательным является путь

создания таких оценок для некоторых характерных (не обязательно реальных) ситуаций, разбитых на классы по уровню ожидаемого ущерба, и затем отнесение конкретного объекта к какому-либо из исследованных классов по принципу наибольшего сходства. Таким образом, проблема состоит из двух подзадач:

а) создание некоторого набора эталонных объектов, для которых можно было бы оценить последствия отказа и рекомендовать определенные требования к уровню надежности;

б) оценка степени сходства некоторого конкретного объекта, для которого следует принять решение о требуемом уровне надежности, с эталонным.

Таблица 6.4.

Рекомендации [152]				
$\gamma_n = \gamma_{n1}\gamma_{n2}$	Последствия отказа	Тип отказа		
		Пластическое разрушение	Непластическое разрушение	Хрупкое разрушение и потеря устойчивости
γ_{n1}	Незначительные	0,8	0,9	1,0
	Значительные	0,9	1,0	1,1
	Особо серьезные	1,0	1,1	1,2
γ_{n2}	Контроль	Жесткий	Обычный	Средний
		0,95	1,0	1,1

Попытки решения первой из указанных задач предпринимались неоднократно. Существует достаточно большое расхождение мнений даже относительно того, какие именно параметры необходимо учитывать, что, в частности, видно из табл.6.4 — 6.6, где приведены некоторые опубликованные предложения о назначении коэффициента надежности по ответственности γ_n, которые связаны с введением классификации объектов по степени ответственности.

Из этих таблиц видно, что все время происходит неявное смешение понятий, относящихся к конструкции и зданию или сооружению, где эта конструкция работает. Кроме того большинство формулировок, описывающих важность объекта или последствия отказа конструкции, весьма расплывчаты, что в принципе создает сложности при использовании тех или иных рекомендаций.

Таблица 6.5

Предложения к проекту DIN (см. [148])			
Класс объекта	Предельное состояние первой группы	Предельное состояние второй группы	γ_n
I	Не влечет опасности для людей и тяжелых экономических последствий	Связано с незначительным экономическим ущербом и влечет несущественные затруднения в эксплуатации	0,9
II	Связано с опасностью для людей и влечет серьезные экономические последствия	Влечет заметные экономические последствия и существенные затруднения в эксплуатации	1,0
III	Может оказать существенное негативное влияние в масштабах страны	Влечет серьезные экономические последствия и очень большие затруднения в эксплуатации	1,2

В принципе выбор уровня надежности должен учитывать возможные последствия отказов в виде риска для жизни людей или опасности для их здоровья, величины экономических потерь и степени социальных затруднений, вызываемых возможным отказом. Указанные обстоятельства связаны обычно с видом и назначением здания или сооружения. Кроме того последствия отказов различных конструкций неодинаковы и зависят от роли конструктивного элемента или его местоположения в пределах объекта. Первое из указанных обстоятельств учитывается при назначении коэффициента γ_n в соответствии с указаниями [85], хотя структура этого документа в достаточной мере расплывчата. Что же касается второго обстоятельства, то оно вообще игнорируется действующими нормами.

Классы ответственности зданий и сооружений определяются уровнем возможного материального и (или) социального ущерба, связанного с прекращением эксплуатации или потерей целостности объекта.

Таблица 6.6

Указания Госстроя СССР [86]			
Класс объекта	Социальная и экономическая значимость	Примеры объектов	γ_n
I	Особо важные	Главные корпуса ТЭС и АЭС, резервуары емкостью более 10000 м^3, крытые спортивные сооружения, театры и т.п.	1,0
II	Важные	Объекты промышленности, сельского хозяйства, связи, жилищно-гражданского назначения, не вошедшие в I и II классы	0,95
III	Ограниченные	Склады, одноэтажные жилые дома, парники, временные здания и сооружения и т.п.	0,90

Возможный социальный ущерб от отказа должен оцениваться в зависимости от таких факторов риска, как:

- опасность для здоровья и жизни людей;
- резкое ухудшение экологической обстановки в прилегающей к объекту местности (например, при разрушении хранилищ токсичных жидкостей или газов, при отказе очистных сооружений канализации и т.п.);
- потеря памятников истории и культуры или иных духовных ценностей общества;
- прекращение функционирования систем и сетей связи, энергоснабжения, транспорта или других элементов жизнеобеспечения населения или безопасности общества;
- невозможность организовать оказание помощи пострадавшим при авариях и стихийных бедствиях.

Возможный экономический ущерб оценивается затратами, связанными как с необходимостью восстановления отказавшего объекта, так и с косвенными потерями (убытки от остановки производства, упущенная выгода и др.). При этом следует учитывать прямые и косвенные потери, для чего можно использовать понятие параметра экономического ущерба L, который определяется как отношение общих потерь к стоимости возведения аналогичного нового объекта.

Все эти соображения приводят к выводу о том, что классификация зданий и сооружений не может быть построена только по одному признаку и поэтому в проекте нормативного документа [104] предлагается выполнять ее независимо по каждой из характеристик возможного ущерба от отказа, приведенных в табл. 6.7. Зданию или сооружению в целом присваивается при этом наивысший из полученных (наименьший по номеру) класс.

Очевидно, что при выборе коэффициента γ_n нельзя игнорировать роль, которую играют различные элементы конструкции в составе здания или сооружения. Вряд ли оправдано то, что по ныне действующим правилам [63] ответственность перильного ограждения в здании АЭС должна формально приниматься более высокой, чем ответственность колонны каркаса многоэтажного жилого здания. Поэтому проект [104] предусматривал возможность классифицировать и конструктивные элементы по степени их ответственности, для чего использовались рекомендациями работы [71].

В зависимости от последствий, которые могут быть вызваны отказом того или иного конструктивного элемента, различают три категории ответственности конструкций и их элементов:

А – конструкции и элементы, отказ которых может привести к полной непригодности к эксплуатации здания или сооружения в целом либо значительной его части;

Б – конструкции и элементы, отказ которых может привести к затруднению нормальной эксплуатации здания (сооружения) либо к отказу других конструкций, не принадлежащих к категории А;

В – конструкции, отказ которых не приводит к нарушению функционирования других конструкций или их элементов. Коэффициент ответственности γ_n предлагается определять в зависимости от класса объекта, категории конструкции, вида расчетной ситуации, группы предельных состояний и типа отказа. При этом учитываются следующие соображения:

а) предельные состояния второй группы в принципе ведут к менее опасным последствиям, что позволяет уменьшить величину γ_n;

б) при внезапных отказах (хрупкое разрушение, потеря устойчивости формы и положения, усталостное разрушение) снижена возможность принятия превентивных мер, уменьшающих неблагоприятные последствия отказа, и это потребовало повысить значе́ние коэффициента ответственности;

в) переходные и аварийные ситуации, время возможной реализации которых мало по сравнению со временем существования объекта, а вероятность возникновения очень мала, по-видимому, допускают использование сниженных значений коэффициента γ_n, особенно для конструкций категорий Б и В.

Необходимо также заметить, что привязка значений γ_n к принятому типу контроля, как это предлагалось в [152], вряд ли логична. Действительно, методы контроля влияют на надежность, но уровень ответственности объекта они не определяют (скорее, наоборот), поэтому этот фактор следовало бы учесть при назначении коэффициентов γ_f и γ_d.

Таблица 6.7

Класс ответственности здания или сооружения	Характеристика ущерба от отказа					
	Опасность для здоровья и жизни, чел.			Потери памятников истории, культуры, заповедных ландшафтов	Прекращение функционирования сетей транспорта, энергоснабжения, связи	Параметр экономического ущерба L
	постоянно находящихся на объекте	периодически посещающих объект	находящихся вблизи от объекта			
1–уникальные и особо ответственные	Свыше 100	Свыше 1000	Свыше 10000	Международного или общегосударственного значения	Общегосударственных	Свыше 250
2 - имеющие весьма важное значение	От 10 до 100	От 100 до 1000	От 1000 до10000	Областного и местного значения	Региональных	От 25 до 250
3 –имеющие важное значение	От 2 до 10	От 20 до 100	От 200 до1000			От 2,5 до 25
4 –имеющие ограниченное значение	До 2	До 20	До 200			До 2,5

В табл. 6.8 приведены предлагаемые значения коэффициента γ_n для случая отказов, связанных с 1-й группой предельных состояний.

Вторая из указанных задач, связанная с оценкой сходства конкретного объекта с эталонным, также является плохо сформулированной проблемой с весьма неопределенными условиями. Для преодоления такого рода неопределенностей в работе [155] был предложен метод взвешивания экспертных оценок, основанный на использовании теории размытых множеств. Ниже дается его краткое описание.

Таблица 6.8

Класс ответственности	Тип конструкции	Значения γ_n, используемые в расчетных ситуациях					
		установившихся		переходных		аварийных	
		Тип отказа					
		внезапный	плавный	внезапный	плавный	внезапный	плавный
1	А	1,050	1,025	1,000	0,975	1,000	0,975
	Б	1,025	1,000	0,975	0,950	0,950	0,925
	В	1,000	0,975	0,950	0,925	0,950	0,925
2	А	1,025	1,000	0,975	0,950	0,975	0,950
	Б	1,000	0,975	0,950	0,925	0,925	0,900
	В	0,975	0,950	0,925	0,900	0,925	0,900
3	А	1,000	0,975	0,950	0,925	0,950	0,925
	Б	0,975	0,950	0,925	0,900	0,900	0,875
	В	0,950	0,925	0,900	0,875	0,900	0,875
4	А	0,975	0,950	0,925	0,900	0,925	0,900
	Б	0,950	0,925	0,900	0,875	0,875	0,850
	В	0,925	0,900	0,850	0,850	0,875	0,850

Пусть множество оценочных признаков $K = \{K_1, K_2, K_3, K_4\}$ содержит 4 критерия: K_1— экономические последствия разрушения; K_2— экологическая опасность последствий разрушения; K_3— социальные последствия разрушения; K_4—ущерб от возможной гибели людей.

Кроме этого определено множество $A = \{a_1, a_2, a_3\}$, элементы которого определяют принадлежность конструкции к классам $i = 1, 2, 3$, и некоторая оценочная процедура определяет преобразование

$$K_k : A \Rightarrow \{ \mu_{1k}|a_1 \quad \mu_{2k}|a_2 \quad \mu_{3k}|a_3 \}, \tag{6.24}$$

в котором запись типа $\mu_{jk}|a_k$ обозначает, что по признаку K_k конструкция принадлежит к классу a_j со степенью уверенности μ_{jk}, т.е. устанавливается степень принадлежности критериев K_k элементам нечеткого множества A.

Сопоставление критериев K_i и K_j производится по методу Саати [142] в форме оценок предпочтений экспертов, которые определяются в форме элементов матрицы B

$$b_{ij} = 1/b_{ji}, \ (b_{ii} = 1). \tag{6.25}$$

При этом множество предпочтений K_i по отношению к K_j представляется в терминах, указанных в (6.24), которые связываются с оценками b_{ij} следующим образом:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ — если } K_i \text{ одинаково важно по сравнению с } K_j \\ 3 \text{ — если } K_i \text{ несколько более важно по сравнению с } K_j \\ 5 \text{ — если } K_i \text{ явно важнее по сравнению с } K_j \\ 7 \text{ — если } K_i \text{ существенно важнее по сравнению с } K_j \\ 9 \text{ — если } K_i \text{ весьма существенно важнее по сравнению с } K_j \\ 2, 4, 6, 8 \text{ — в промежуточных случаях между указанными формулировками} \end{cases} \quad (6.26)$$

В рассматриваемом случае получается матрица преобразований B размерами 4×4 с элементами b_{ij}. Максимальный ненулевой вектор

$$Y = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T \quad (6.27)$$

удовлетворяет условиям

$$Y = \lambda_{max} Y. \quad (6.28)$$

С помощью элементов этого вектора определяются нечеткие принадлежности минимального типа

$$D = K_1^{y1} \cap K_2^{y2} \cap K_3^{y3} \cap K_4^{y4}. \quad (6.29)$$

Например, если для некоторого конкретного случая по заключению экспертов получено множество оценок по включению конструкции в классы:

$$K_1 = 0{,}7|a_1 + 0{,}5|a_2 + 0{,}4|a_3$$
$$K_2 = 0{,}3|a_1 + 0{,}8|a_2 + 0{,}6|a_3$$
$$K_3 = 0{,}2|a_1 + 0{,}3|a_2 + 0{,}8|a_3$$
$$K_4 = 0{,}5|a_1 + 0{,}1|a_2 + 0{,}2|a_3$$

и матрица предпочтений

$$B = \begin{array}{c|cccc} & K_1 & K_2 & K_3 & K_4 \\ K_1 & 1 & 3 & 7 & 9 \\ K_2 & 1/3 & 1 & 6 & 7 \\ K_3 & 1/7 & 1/6 & 1 & 3 \\ K_4 & 1/9 & 1/7 & 1/3 & 1 \end{array}$$

имеет собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению $\lambda_{max} = 4{,}21$,

$$Y = [2{,}32,\ 1{,}20,\ 0{,}32,\ 0{,}16]^T,$$

то

$$D = K_1^{2.32} \cap K_2^{1.20} \cap K_3^{0.32} \cap K_4^{0.16},$$

где

$$K_1 = 0{,}7^{2.32}|a_1 + 0{,}5^{2.32}|a_2 + 0{,}4^{2.32}|a_3$$
$$= 0{,}44|a_1 + 0{,}20|a_2 + 0{,}12|a_3$$

$$K_2 = 0{,}3^{1.20}|a_1 + 0{,}8^{1.20}|a_2 + 0{,}6^{1.20}|a_3$$
$$= 0{,}24|a_1 + 0{,}76|a_2 + 0{,}54|a_3$$

$$K_3 = 0{,}2^{0.32}|a_1 + 0{,}3^{0.32}|a_2 + 0{,}8^{0.32}|a_3$$

$$= 0{,}60|\,a_1 + 0{,}68|\,a_2 + 0{,}93|\,a_3$$

$$K_4 = \; 0{,}5^{0.16}\,|\,a_1 + 0{,}1^{0.16}\,|\,a_2 + 0{,}2^{0.16}\,|\,a_3$$
$$= 0{,}90|\,a_1 + 0{,}69|\,a_2 + 0{,}77|\,a_3$$

и с учетом выбора минимальных компонент уверенности мы получаем

$$D = 0{,}24|\,a_1 + 0{,}20|\,a_2 + 0{,}12|\,a_3.$$

Этот результат дает наибольшее основание для отнесения рассматриваемой в примере конструкции к первому классу.

7. Заключительные замечания

Специалист — это варвар, невежество которого не всесторонне.

С. Лем

Проблема обеспечения надежности и безопасности конструкций имеет долгую историю, начало которой можно отнести еще к зарождению инженерной практики, как особого вида творческой деятельности. Огромный опыт, накопленный инженерами и отраженный в нормативных документах, предостерегает от повторения многих трагических уроков прошлого. К сожалению, это не всегда видно из текста соответствующих норм, что может создать впечатление необоснованности некоторых рекомендаций. В связи с этим следовало бы самым настоятельным образом рекомендовать издание специальных комментариев к нормативным документам, объясняющих происхождение тех или иных требований норм. Такой подход является традиционным для некоторых стран (например, нормы Франции издаются таким образом, что сам текст изложен на нечетных страницах, а на четных — комментарий к нему).

Однако даже прокомментированный опыт не становится руководством к осознанному действию, если он не описан с использованием некоторых *вычисляемых и измеряемых* понятий. Нужно помнить, что в технике нет места словам «большой» или «малый», и правильный вопрос есть «сколько», а правильный ответ «столько-то». Недаром в библии сказано: «Все числом и мерою сотворил еси».

Современный надежностный подход к рассматриваемой проблеме реализует эту идею, и, может быть, не в последнюю очередь, поэтому стал таким популярным. О теории надежности в последнее время говорят все чаще, представляя ее самыми различными способами. Для одних эта теория представляет надежду на интегрирование разнородных инженерных дисциплин, для других — возможность самовыражения при решении новых интересно формулируемых задач. Для остальных же — это просто старое вино в новых бутылках. Сам же автор поочередно пробовал себя во всех трех ролях, что, по-видимому, сказалось на содержании и манере изложения этой книги.

Почти все сказанное в предыдущих разделах так или иначе может интерпретироваться как попытка объединения теоретического и эмпирического подходов к проблеме. Иногда противопоставляют теорию и практику, и на это следует отвечать словами великого Л.Н. Толстого — «Меня всегда удивляют часто повторяемые слова: да это так по теории, а на практике как? Точно как будто теория это какие-то хорошие слова, нужные для разговора, но не для того, чтобы вся практика, т.е. вся деятельность, основывалась на ней. Должно быть, было на свете ужасно много глупых теорий, если вошло в употребление такое

удивительное рассуждение. Теория ведь это то, что человек думает о предмете, а практика это то, что он делает.»

Да, на свете было много умозрительных теоретических рассуждений, но практика их быстро отметает. Но часто в самой практике устанавливаются ложные правила, основанные на непонимании или ложном истолковании фактов. Применение таких правил приводило к неприятным (иногда и к катастрофическим) последствиям. Поэтому осмысление взаимодействия теоретических правил и опыта их применения всегда будет оставаться актуальным для любых исследований.

Если приведенный выше текст хоть в малой мере способствовал приближению к этой цели, автор будет считать свою работу успешной.

Литература

[1] Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. В 4-х книгах.— М.: Издательство АСВ, 1995-1998.— 1322 с.

[2] Азанов С.Н., Вингородский С.Н.,Корнейчук Ю.Ю., Костров А.В., Мухин И.И. Еще раз о риске, *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*, 1999, вып.7, с.32-51.

[3] Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании/ Пер. с англ. Ю.Д.Сухова. — М.: Стройиздат, 1988. — 584 с.

[4] Анализ аварий и повреждений стальных конструкций производственных зданий, связанных с дефектами проектной документации (научно-технический отчет «УкрНИИпроектстальконструкция» по теме 287.92-92) / Рук. темы В.Л.Гейфман.—Киев, 1992.— 97 с.

[5] Анилович В.Я., Лупандина А.П. Элементы теории защиты при обеспечении надежности машин, *Надежность и долговечность машин и сооружений*, Вып. 13. - Киев: Наукова думка, 1988. - С.1-8.

[6] Арнольд В.И. Избранное:60. — М.: ФАЗИС, 1997. — 770 с.

[7] Базовский И.С. Надежность. Теория и практика.— М.: Мир, 1965.— 162 с.

[8] Балдин В.А., Гольденблат И.И., Коченов В.И., Пильдиш М.Я., Таль К.Э. Расчет строительных конструкций по предельным состояниям.—М.: Стройиздат, 1951.—272 с.

[9] Барашиков А.Я., Сирота М.Д. Надежность зданий и сооружений.— Киев: УМК ВО, 1993.— 212 с.

[10] Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность.— М.: Наука, 1985.—327 с.

[11] Бельский Г.Е. Проектирование элементов стальных конструкций с требуемым уровнем надежности, В сб.: *Металлические конструкции. Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого* М.: МГСУ, 1995.— С.56-61.

[12] Беляев Ю.К. Вероятностные методы выборочного контроля.— М.: Наука, 1975.— 406 с.

[13] Беляев.Б.И., Корниенко В.С. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения.— М.: Стройиздат, 1968.— 206 с.

[14] Блэк С.К., Нихаус Ф. Насколько безопасно «слишком» безопасное? *Бюллетень МАГАТЭ*, Книга 22. №1, с.47-58.

[15] Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений.— М.: Стройиздат, 1982.— 351 с.

[16] Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и сооружений.— М.: Машиностроение, 1984.— 312 с.

[17] Болотин В.В., Отставнов В.А. О принципах назначения расчетных нагрузок на сооружения, *Строительная механика и расчет сооружений*, 1979, №5, с.3-5.

[18] Бондарь Н.Г. Как работают мосты.— К.: Наукова думка, 1986.— 120 с.
[19] Васильев А.А., Уваров Б.Ю., Эглескали Ю.С. Методика оценки физического износа металлических конструкций производственных зданий.— В кн.: *Металлические конструкции. Сборник трудов МИСИ им. Куйбышева*, №119.— М.:1975, с.11-16.
[20] Визир П.Л. Оценка надежности параллельной структуры с учетом перераспределения нагрузки, Строительная механика и расчет сооружений, 1981, №1,с.15-18.
[21] Воробьев Н.Н. Развитие теории игр. Добавление к книге Дж. фон. Неймана и О.Моргенштерна «Теория игр и экономическое поведение». - М.: Наука, 1970. — с.631-694.
[22] Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций.— М.: Наука, 1971.— 383 с.
[23] Герцбарх И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов.— М.: Советское радио, 1966.— 96 с.
[24[Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности.— М.: Наука, 1965.— 524 с.
[25] Гнеденко Б.В., Козлов Б.А., Ушаков И.А. О роли и месте надежности в процессе создания сложных систем. — В кн.: *Теория надежности и массовое обслуживание*.— М.: Наука, 1969.- С.14-32.
[26] ГОСТ 27.410-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.— М.: Изд-во стандартов, 1990.— 37 с.
[27] ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-97). Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. — М.: Изд-во стандартов, 1988.— 10 с.
[28] ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації / Держбуд України.— К.: Укрархбудінформ, 1995.—46 с.
[29] Долговечность стальных конструкций в условиях реконструкции / Е.В.Горохов, Я.Брудка, М.Любиньски и др. — М.: Стройиздат, 1994.— 488 с.
[30] ДСТУ 3273-95. Безопасность промышленных предприятий. Общие положения и требования. — К.: Госстандарт Украины, 1996. .—38 с.
[31] Добромыслов А.Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений, *Промышленное строительство*, 1990, №9, с. 9-10.
[32] Дривинг А.Я. Рекомендации по применению экономико-статистических методов при расчете сооружений с чисто экономической ответственностью. - М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1982. — 62с.
[33] Дривинг А.Я. О некоторых особенностях расчета стальных рамных сооружений.— В кн.: *Металлические конструкции и испытания сооружений. Межвузовский тематический сборник трудов*.— Л.: ЛИСИ, 1984, с.94-102.

[34] ДСТУ 3273-95. Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги (Держстандарт України) / — К: Держстандарт України, 1996. — 24с.

[35] Елохин А.Н. К вопросу определения критериев приемлемого риска, *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*, 1994, Вып.8, с.42-50.

[36] ECE / HPB / 81. Компендиум ЕЭК, включающий образцы положений для строительных правил. Жилые здания .— Издание ООН, Нью-Йорк, 1992.— 105 с.

[37] Закс Ш. Теория статистических выводов.— М.: Мир, 1975.— 776 с.

[38] Заренин Ю.Г., Збырко М.Д. О надежности систем с защитой, Известия АН СССР. *Техническая кибернетика*, 1971, №2, с.46-52.

[39] Исаев А.С. О применении игровых подходов в прочностных задачах, В кн.: *Проблемы надежности в строительной механике (Материалы к 2-й Всесоюзной конференции по проблемам надежности в строительной механике)*.— Вильнюс: 1968, с.139-143.

[40] Исайкин А.Я. Исследование надежности стержневых железобетонных конструкций логико-вероятностными методами, *Бетон и железобетон*, 1999, №1, с.17-20.

[41] Исайкин А.Я. Оценка надежности железобетонных конструкций на основе логиковероятностных методов и метода предельного равновесия, *Бетон и железобетон*, 1999, №4, с.18-20.

[42] Казакевич М.И., Кулябко В.В. Введение в виброэкологию зданий и сооружений. — Днепропетровск: ПГАСА, 1996.— 200 с.

[43] Калустян Э.С. Статистика и причины аварий плотин, *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*, 1997, вып.3, с.27-35.

[44] Клепиков Л.В. Частное сообщение, декабрь 1999.

[45] Клетц Т.А. Выгоды и риск: сравнительная оценка в связи с потребностями человека, *Бюллетень МАГАТЭ*, Книга 22. №5/6, с.2-14.

[46] Колотилкин Б.М. Надежность функционирования жилых зданий.—М.: Стройиздат,1989.— 376 с.

[47] Комсон А.С. Экономика ремонта машин.— М.: Машиностроение, 1970.— 248 с.

[48] Крылов И.И., Шевцов Ю.П. Классификация причин отказов стальных конструкций производственных зданий и сооружений, *Известия ВУЗ. Строительство и архитектура*, 1983, №11, с.16-19.

[49] Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций.—Вильнюс: Мокслас, 1985.— 156 с.

[50] Кудрявцев И.А., Золотухин Ю.Д., Чикилев А.С. Мониторинг аварий в строительстве, причины возникновения и способы их устранения. — В кн.: *Материалы II Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике «Механика-99». Секция «Строительство».* — Минск: НП ООО Стринко, 1999, с.187-197.

[51] Ланцош К. Вариационные принципы механики.— М.: Мир, 1965.— 408 с.

[52] Лапидус В.А. О концепции развития, внедрения и стандартизации статистических методов управления качеством в СССР, *Надежность и контроль качества*, 1991, №2, с.6-14; №4, с.3-11; №6, с.3-11.

[53] Лимаренко В.А. Совершенствование методов определения технического состояния эксплуатируемых металлических конструкций покрытий: Автореф. дис. ... канд техн. наук.— Киев, 1987.— 18 с.

[54] Лимаренко В.А., Перельмутер А.В. Применение коэффициента ранговой корреляции для сопоставления повреждаемости эксплуатируемых конструкций. - В сб.: *Металлические конструкции и испытания сооружений / Межвуз. темат. сб.тр.*—Л.:ЛИСИ, 1987.— с. 32-37.

[55] Малый В.И. Оценка опасности подвижек металлоконструкций реакторов РБМ-К по основанию при землетрясениях, *Промышленное и гражданское строительство*, 1999, №5, с.31-33.

[56] Мельчаков А.П., Габрин К.Э., Мельчаков Е.А. Управление безопасностью в строительстве. Прогнозирование и страхование рисков аварий зданий и сооружений.— Челябинск: 1996.— 198 с.

[57] Металлические конструкции. Учебник для вузов. Под общ. Ред. Е.И. Беленя.— М.: Стройиздат, 1973.— 688 с.

[58] Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Том 6: Экспериментальная отработка и испытания.— М.: Машиностроение, 1989.— 376 с.

[59] Надежность строительных конструкций. Основные положения / Проект СНиП России. Внесен ЦНИИСК им. Кучеренко.— М.: 1995.— 25 с.

[60] Новое в нормативных документах на проектирование строительных конструкций. — М.: Общ-во «Знание», 1990.— 152 с.

[61] Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи.— К..: Розділ поліграфії Українського центру держсанепіднагляду МОЗ України, 1997.–121 с.

[62] ОПБ-88. Общие положения по обеспечению безопасности атомных станций. ПН АЭ Г-1-011-89 / Госатомэнергонадзор СССР.- М.: Энергоатомиздат, 1990.— 48с.- (Правила и нормы в атомной энергетике).

[63] Орлов А.И. Пути развития статистических методов: Непараметрика, робастность, будстреп и реалистическая статистика, *Надежность и контроль качества*, 1991, №8, с.3-8.

[64] Отставнов В.А., Смирнов А.Ф., Райзер В.Д., Сухов Ю.Д. Учет ответственности зданий и сооружений в нормах проектирования строительных конструкций, *Строительная механика и расчет сооружений*, 1981, №1, с.11-14.

[65] Патон Б.Е., Недосека А.Я. Об обеспечении безопасности эксплуатируемых сварных конструкций и сооружений, *Автоматическая сварка*, 1998, №11(548), с.20-25.

[66] Пашинский В.А. Представление атмосферных нагрузок в виде дифференцируемых случайных процессов, *Строительная механика и расчет сооружений*, 1992,№1,с.92-96.

[67] Пашинський В.А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції для території України.— К.: Вид-во УкрНДІпроектстальконструкція, 1999.— 185 с.

[68] Перельмутер А.В. Работоспособность конструкций, запроектированных по ранее действующим нормам снеговых нагрузок. *Строительная механика и расчет сооружений*, 1986, № 3, с.19-21.

[69] Перельмутер А.В. Контрольные нагрузки для оценки несущей способности эксплуатируемых конструкций, *Строительная механика и расчет сооружений*, 1989, № 4, с. 15-17.

[70] Перельмутер А.В. О сроках проведения и эффективности обследования технического состояния эксплуатируемых конструкций. - В сб.: *Надежность и долговечность машин и сооружений*, Вып.16, 1989, с. 8-12.

[71] Перельмутер А.В., Гильденгорн Л.А. О классификации стальных конструкций, *Строительная механика и расчет сооружений*, 1990, №3, с.67-70.

[72] Перельмутер А.В. Эксплуатационная надежность конструкций зданий и сооружений и нормы проектирования при реконструкции. - Киев: Общ-во "Знание", 1991.- 19 с.

[73] Перельмутер А.В. Об оценке живучести несущих конструкций. В сб.: *Металлические конструкции. Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого.*— М.: МГСУ, 1995.— с.62-68

[74] Перельмутер А.В. Надежность конструкций с защитой от перегрузок. - В сб.: *Вопросы надежности и совершенствования строительных конструкций.*—Якутск: 1996, с.16-22.

[75] Перельмутер А.В., Пашинський В.А. Про класифікацію навантажень та дій на будівельні конструкції.— У зб.: *Технічна метеорологія Карпат: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції ТМК-98.*— Львів: Оскарт, 1998, с. 75-78.

[76] Петров А.А. О влиянии выбора расчетных моделей на оценку сейсмичекой реакции, *Промышленное и гражданское строительство*, 1999, №10, с.40-44.

[77] ПиН АЭ 5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа // Министерство атомной энергетики СССР.- М.: 1986.

[78] Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий.—Дисс. ... докт. техн. наук.— Киев: КГТУСА, 1994.—486 с.

[79] Пичугин С.Ф. Вероятностное представления нагрузок, действующих на строительные конструкции, *Известия ВУЗ. Строительство*, 1995, №4.— с.12-18.

[80] Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / А.И. Кикин, А.А. Васильев, Б.Н. Кошутин и др.— М.: Стройиздат, 1984.— 301 с.

[81] Повышение надежности и долговечности электросетевых конструкций / Е.В.Горохов, С.Н.Шаповалов, Е.И.Удод и др. — Киев: Техника, 1997.—284 с.

[82] Подольский Д.М. Расчет конструктивных систем с неопределенными жесткостными характеристиками. *Надежность и долговечность машин и сооружений*, 1984, Вып. 6, с. 78-86.

[83] Положение о расследовании причин аварий (обрушений) зданий, сооружений, их частей и конструктивных элементов (Госкомградостроительства Украины) / А.Д. Гапоненко В.М. Кириленко М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, К.И. Проценко. - К: Укрархбудинформ, 1995. -

[84] Почтовик П.Г., Шаршунов Г.К. Повышение надежности резервуаров нефтеперекачивающих станций путем проведения промежуточных обследований. *Металлические конструкции. Сборник трудов МИСИ им. Куйбышева.*— М.: 1984, с.127-132.

[85] Положение о расследовании причин аварий (обрушений) зданий, сооружений, их частей и конструктивных элементов (Госкомградостроительства Украины). — К: Укрархбудинформ, 1995. — 44 с.

[86] Правила учета степени ответственности зданий и сооружений при проектировании конструкций.— Приложение к постановлениям Госстроя СССР от 19.03. 81 №41 и от 29.07.82 №196.

[87] Развитие методики расчета по предельным состояниям / Сб. статей под ред. Е.И. Беленя. — М.: Стройиздат, 1971. — 175 с.

[88] Прохоров В.А. Разрушения резервуаров и причиняемый ущерб в условиях Севера, *Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях*, 1998, вып.5, с.27-35.

[89] Разработать макет системы управления надежностью несущих строительных конструкций / Отчет ЦНИИСК им. Кучеренко. Рук. работы Ю.Д. Сухов, Шифр 04-8089.-М., 1990.- 40 с.

[90] Разработать методику расчета зданий и сооружений различного назначения на основе принципа чисто экономической ответственности / Отчет ЦНИИСК им. Кучеренко. Рук. работы А.Я. Дривинг, Шифр 1Н01Б040.-М., 1983.- 48 с.

[91] Разумов И.К. Энергетическая теория действия вибраций на человека. - М.: Медицина, 1975. - 206 с.

[92] Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. — М.: Стройиздат, 1995.— 348 с.

[93] Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. — М: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1998. — 302 с.

[94] РД 50-699-90. Методические указания. Надежность в технике. Общие правила классификации отказов и предельных состояний / Госстандарт СССР.— М.: Изд-во стандартов, 1991.— 12 с.

[95] Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. — М.: Стройиздат, 1978. - 239 с.

[96] Рокки К.С., Эванс Х.Р. Проектирование стальных мостов. Пер. с англ. под ред. А.А. Потапкина.— М.: Транспорт, 1986.—245 с.

[97] Рябинин И.А., Черкесов Г.И. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем.— М.: Радио и связь, 1981.— 264 с.

[98] Сабуров В.Ф. К вопросу совершенствования сортамента крановых рельсов.— В кн.: *Исследования по строительной механике и строительным конструкциям. Тематический сборник научных трудов.*— Челябинск: ЧПИ, 1985, с.84-89.

[99] Савицкий Г.А. К дифференциации расчетных коэффициентов в методе предельных состояний, *Строительная механика и расчет сооружений*, 1983, №1,. с.7-8.

[100] Сахновский М.М., Титов А.М. Уроки аварий стальных конструкций.— К.: Будивэльнык, 1969.— 200 с.

[101] Селезнева Е.Н. Развитие теории надежности в металлостроительстве. В сб. *Исследование надежности металлических конструкций. Труды ЦНИИпроектстальконструкция.* — М.:1979. — С.8-37.

[102] Симиу Э., Скарлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения.— М.: Стройиздат, 1984.

[103] Синицын А.П. Расчет конструкций на основе теории риска.— М.: Стройиздат, 1985.— 304 с.

[104] Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об"єктів. Загальні принципи забезпечення надійності і безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ / Проект ДБН В.1.2-...-97. Внесений УкрНДІпроектстальконструкція.— Київ: 1997.— 57 с.

[105] Смирнов С.Б. Решение проблемы надежной сейсмозащиты зданий и сооружений, *Промышленное и гражданское строительство*, 1999, №10, с.43-44.

[106] Снарскис Б.И. К статистико-экономическому обоснованию запасов несущей способности конструкций, *Труды АН Литовской ССР*, Серия Б, 1962, №2(29), с.229-241; 1963, №1(32), с.157-203.

[107] СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР.— М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.—36 с.

[108] СНиП 2.03.01-84*. Нормы проектирования. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.— 80 с.

[109] СНиП 2.05.03-84. Мосты и трубы / Госстрой СССР.— М.: ЦИТП Госстроя СССР. — 200 с.

[110] СНиП II-25-80. Нормы проектирования. Деревянные конструкции / Госстрой СССР. — М.: Стройиздат, 1983.— 31 с.

[111] Спал Л. Новый чехословацкий стандарт "Проектирование стальных конеструкций мачт на оттяжках".— К кн.: *Труды Международнго конгресс ИАСС'85.* Том 3.—М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1986, с.57-65.

[112] Стрелецкий Н.Н. Первоочередные вопросы развития методики предельных состояний, В кн.: *Развитие методики расчета по предельным состояниям.* — М.: Стройиздат, 1971, с.87-95.

[113] Стрелецкий Н.Н. Предложения по структуре и направлениям развития теории предельных состояний стальных конструкций, *Металлические*

конструкции: Сборник трудов МИСИ им. В.В. Куйбышева. — М.: МИСИ, 1992, с.171-179.

[114] Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений.— М.: Стройиздат, 1947.— 92 с.

[115] Стрелецкий Н.С. Развитие методики расчета по предельным состояниям. — М.: Стройиздат, 1971, с.87-95.

[116] Стрелецкий Н.С. Избранные труды.— М.: Стройиздат, 1975.— 422 с.

[117] Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций.— М.: Стройиздат, 1964.—360 с.

[118] Строительные нормы и правила. Глава II-А.10. — М.: Госстройиздат, 1954.— 350 с.

[119] Сухов Ю.Д. Вероятностно-экономическая модель процесса эксплуатации строительных конструкций, Строительная механика и расчет сооружений, 1975, №4, с. 13-16.

[120] Сухов Ю.Д. Некоторые особенности теории надежности строительных конструкций, Строительная механика и расчет сооружений, 1975, №2, с. 6-11.

[121] Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность.— М.: Энергия, 1966,— 232 с.

[122] Ципенюк И.Ф. Оценка надежности и учет повторяемости землетрясений при расчетах крупнопанельных зданий на сейсмические воздействия.— В кн.: *Развитие методов расчета на сейсмостойкость.*— М.: 1987 (Сборник трудов ЦНИИСК им. Кучеренко), с.138-152.

[123] Черкесов Г.Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем.— М.: Знание, 1987.- 116 с.

[124] Шишов К.А. Основы теории эксплуатации строительных конструкций промышленных зданий.— В кн.: *Исследования по строительной механике и строительным конструкциям. Тематический сборник научных трудов.*— Челябинск: ЧПИ, 1985, с.60-64.

[125] Эглескалн Ю.С. Исследование физического износа металлических конструкций производственных зданий.—Дисс. ... канд. техн. наук.— М: МИСИ им. Куйбышева, 1974.—226 с.

[126] AISC, Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design, 2nd Edition.— Chicago, Ill: American Institute of Steel Construction, 1994.

[127] AIJ Recommendations for Loads on Building / Architectural Institute of Japan.— Tokyo: Shiba, 1996.— 132 p.

[128] Beichelt F., Franken P. Zuverlässigkeit und Instandhaltung. Mathematische Metoden .— Berlin: VEB Verlag Technik, 1983.—392 s.

[129] Brown C.B. Entropy constructed probabilities, *Proceeding ASCE*, 1980, vol.106, No EM4, p.633-640

[130] Czażyńsky A., Czażyńsky M. Wyniki analiz katastrof konstrukcji budowlanych, *Przeglad budowlany*, 1988, No 12, p. 551-552.

[131] De Sitter Law of Fives. Durability of Concrete Structures. CEB-Bulletin, №152: Copenhagen, 1983/

[132] Elms D.G. Risk balancing in structural problems, *Structural Safety*, Vol.19, No.1. p.67-77.

[133] ENV 1991-1. Eurocode 1: Basic of Design and Actions of Structures. Part 1: Basic of Design. — CEN, 1994.

[134] ENV 1991-2-4. Eurocode-1: Basis of Design and Actions on Structures. Part 2-4: Wind Actions.- Brussels, Belgium, CEN. European Committee for Standardization, 1994.

[135] Faulkner D., Birell N.D., Stainsen S.G. Development of a Reliability-Based Design Code for the Structure of Tension Leg Platform, Proceeding of the 15-th Annual Offshore Technology Conference.— Houston, 1983, p.575-586.

[136] Feld L.S. Superstructure for 1350 ft. World Trade Center. *Civil Engineering*, ASCE, vol.41, No 6, 1971, 66-70.

[137] Hansen R.J., Reed J.W., Vanmarcke E.H. Human Response to Wind Induced Motion. *Proceedings ASCE. Journal of the Structural Division*. Vol. 98, NoST7, 1973, p.1589-1605.

[138] Holicky M., Ostlund L. Vagueness of Serviceability Requirements, Proceeding the International Conference «Design and Assessment of Building Structures», Vol. 2, p.81-89.— Prague: 1996.

[139] Huber P.J. Robust estimation of a location parameter, Ann. Mathematical Statistics, 1964, vol. 35, p.73-101.

[140] ISO 6897: 1984. Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion (0,063 to 1 Hz), - International Organization of Standardizing, Geneva, Swi.

[141] ISO ST 2394. General Principles on Reliability for Structures. — 1994, 50 p.

[142] Kacpzyk J., Zbiory rozmyte w analize systemowej.— Warszawa: PWN, 1986.— 512 s.

[143] Kodra J., Szilassy K. Megépült tartószerkezetek erötani felülvizsgálta, *Mélyépitéstudományi Szemle*, vol.85, 1985, No 2, p.82-89.

[144] Kondra M.P., Kopiiko O.V., Mikitarenko M.A., Perelmuter A.V., Prusov V.A. Integral Estimate of Risk under Wind Action upon Structures of the Encasement at Chernobyl Atomic Power Plant.- In: Proceeding of the 2nd European & African Conference on Wind Engineering. Genova, June 22-26, 1997, Vol.2, p.1833-1839.

[145] Lagomarsino S., Pagnini L.C. Criteria for modeling and predicting dynamic parameters of buildings. Istituto di Ccienza delle Costruzioni, Faculty of Engineering, University of Genova, Genova: 1995, 97 p.

[146] Lind N. Optimization, cost benefit analysis, specifications, Proc. 3rd International Conference Applications of Statistics in Soil and Structural Engineering.— Sydney, 1979, vol.3, p.373-384.

[147] Mrazik A. Teoria spol'ahlovosti ocel'ovych konstrukcii. — Bratislava: VEDA, 1987. — 360 s.

[148] Murgewski J. Reliability: State-of-Art, IX International Conference on Metal Structures,. Final Report — Krakow, Poland, 1996, p.99 -112.

[149] Ochme P. Schëden an Sthahltrawerken: Statistische Schadensanalyse unter Deachtung juristischer Aspekte.— Berlin: Bauinformation, 1990.- 40 s.

[150] Perelmuter A.V., Mikitarenko M.A.. Vibration Safety of the Personnel in Multistory Buildings under Wind Load, Proceedings 2nd East European Conference on Wind Engineering, 7-11 September 1998, Prague, Czech Republic. Vol.2, p. 455 - 462.

[151] Pichugin S.F. Probabilistic analysis of wind load and reliability of structures. In: Proceeding of the 2nd European & African Conference on Wind Engineering, Genova, Italy, June 22-26 1997, vol. 2, 1883-1890.- SGE Ditorialy, Padova, Italy, 1997.

[152] Recommendation for Loading and Safety Regulations for Structural Design Nordic Committee on Building Regulations, 1978.

[153] Reed D. A., Cook C.M. Multi-hazard analysis of utility lifelines. In: Proceedings of the tenth international conference "Wind Engineering into the 21-st Century", vol.2: Rotterdam: A.A.Balcema, 1999, p.1457-1461.

[154] Runkiewicz L. Raport o awariach i katastrofach konstrukcji budowlanych za lata 1973-1993.— Warszawa: Instytut Ttechniki Budowlanej, 1995.— 90 p.

[155] Rżadkowsky J. Failure consequence factor on the basis of fuzzy set theory.- IX International Conference on Metal Structures, Krakow, Poland, 26-30 June 1995. Prelimentary Report. Vol. 2, pp.151-158.

[156] Taylor J. Manual on Aircraft Loads.— Pergamon Press: London, 1970.—369 p.

[157] Tichý M. Target life of constructed facilities, Structural Safety, 1990, vol.9, No 2, p.155-158.

[158] Wiggins J.H. The balanced risk concept: New approach to earthquake building code, *Civil Engineering*, ASCE, 1972, August, p.55-59.

[159] Xie M., Shen K. On ranking of system components with respect to different improvement action, *Microelectronics Reliability*, 1989, vol.29, 159-164.

[160] Yang J.-N. Optimal Periodic Proof Test Based on cost-effective and Reliability Criteria, *AIAA Journal*, 1977, v.15, No.3, p.402-409.

[161] Yang J.-N. Reliability Analysis of Structures under Periodic Proof Tests in Service, *AIAA Journal*, 1976, v.14, No.9, p.1225-1224.

[162] Yang J.-N., Trapp W.J. Reliability Analysis of Aircraft Structures under Random Loading and Periodic Inspection, *AIAA Journal*, 1974, v.12, No.12, p.1623-1630.

Оглавление

Предисловие..... 3
Введение..... 5
1. Основные понятия и характеристики надежности..... 8
1.1. Надежность, безотказность и долговечность..... 9
1.2. Технические состояния объектов..... 10
1.3. Живучесть..... 12
1.4. Безопасность..... 13
1.5. О случайных параметрах расчета..... 17
1.6 Об экспоненциальном законе надежности..... 22
1.7 О далеких экстраполяциях «хвостов» распределений..... 24
2.Набор требований к строительным объектам..... 28
2.1. Общие соображения..... 28
2.2. Требования безопасности конструкций..... 30
2.3. Требования пожарной безопасности..... 31
2.4. Безопасность в ходе эксплуатации..... 32
2.5. Гигиенические требования..... 33
2.6. Комфорт..... 35
2.7. Эксплуатационная надежность..... 35
2.8. Реновация и модернизация..... 36
3.Надежность и метод предельных состояний..... 37
3.1. Расчет по методу предельных состояний..... 37
3.2. Формулировка предельных состояний..... 39
3.3. Возможная классификация отказов..... 44
3.4. Возможно ли оптимизировать допустимый риск?..... 47
3.5. Сопоставительный анализ рисков..... 53
3.6. О принципе сбалансированного риска..... 58
3.7. Модель формирования общественного мнения..... 64
3.8. Объективные и субъективные опасности..... 67
3.9. Нечеткие отказы и их анализ..... 69
3.10. Система коэффициентов безопасности..... 76
3.11. О расчетных схемах..... 80
3.12. О классификации нагрузок и воздействий..... 84
4.Анализ проектной надежности конструкций..... 88
4.1. Причины аварийности..... 88
4.2. Какова же проектная надежность конструкций, соответствующих требованиям СНиП ?..... 96
4.3. Оценка роли основных параметров..... 104
4.4. Учет фактора времени..... 107
4.5. Оптимальная обеспеченность расчетных нагрузок и расчетных сопротивлений материалов..... 111

4.6. Расчет на заданный уровень надежности..... 115
4.7. Надежность антисейсмической защиты зданий и сооружений..... 119
4.8. О надежности распределенных систем..... 124
5. Поддержание надежности..... 128
5.1. Изменение технического состояния на различных этапах жизненного цикла..... 128
5.2. Повреждаемость основных несущих конструкций..... 130
5.3. Оценка качества работ на монтаже..... 138
5.4. Закономерности износа..... 141
5.5. Влияние на надежность текущего контроля за техническим состоянием..... 144
5.6. Оптимальные сроки проведения обследований..... 146
5.7. Экспериментальная оценка надежности эксплуатируемых конструкций..... 150
5.8. Надежность систем с защитой..... 154
5.9. Резерв времени для ремонта поврежденной конструкции..... 160
5.10. О возможной системе управления надежностью..... 164
6. Элемент и система..... 171
6.1. Условность понятий об элементе и системе..... 171
6.2. Оценка живучести..... 177
6.3. Оценка важности элементов..... 182
6.4. Основные, восстанавливаемые и сменные элементы..... 186
6.5. Субъективная оценка поведения элемента в системе..... 188
6.6. Классификация систем и элементов..... 189
7.Заключительные замечания..... 198
Литература..... 200

Зміст

Передмова 3
Вступ 5
1. Основні поняття і характеристики надійності 8
1.1 Надійність, безвідмовність і довговічність 9
1.2 Технічний стан об'єктів 10
1.3 Живучість 12
1.4 Безпечність 13
1.5 Про випадкові параметри розрахунку 17
1.6 Про експоненційний закон надійності 22
1.7 Відносно далеких екстраполяцій "хвостів" розподілів 24
2. Набір вимог до будівельних об'єктів 28
2. 1 Загальні міркування 28
2.2. Вимоги безпеки конструкцій 30
2.3 Вимоги пожежної безпеки 31
2.4 Безпека під час експлуатації 32
2.5 Гигиєнічні вимоги 33
2.6. Комфорт 35
2.7 Експлуатаційна надійність 35
2.8 Реновація та модернізація 36
3. Надійність і метод граничних станів 37
3.1 Розрахунок за методом граничних станів 37
3.2 Формулювання граничних станів 39
3.3 Можлива класифікація відмов 44
3.4 Чи можна оптимізувати припустимий ризик? 47
3.5 Порівняльний аналіз ризиків 53
3.6 Відносно принципу збалансованого ризику 58
3.7 Модель формування громадської думки 64
3.8 Об'єктивні та суб'єктивні небезпеки 67
3.9 Розмиті відмови і їх аналіз 69
3.10 Система коефіцієнтів безпеки 76
3.11 Про розрахункові схеми 80
3.12 Відносно класифікації навантажень та впливів 84
4. Аналіз проектної надійності конструкцій 88
4.1 Причини аварійності 88
4.2 Якою є проектна надійність конструкцій, що відповідають вимогам СНиП? 96
4.3 Оцінка ролі основних параметрів 104
4.4 Врахування фактору часу 107
4.5 Оптимальна забезпеченість розрахункових навантажень і розрахунокового опору матеріалів 111
4.6 Розрахунок на заданий рівень надійності 115
4.7 Надійність антисейсмичного захисту бужинків і споруд 119

4.8 Про надійність систем розвинутих у просторі 124
5. Підтримання надійності 128
5.1 Змін технічного стану на окремих етапах життєвого циклу.... 128
5.2 Пошкоджуваність основних несучих конструкцій 130
5.3 Оцінка якості монтажних робіт 138
5.4 Закономірності зносу 141
5.5 Вплив поточного контролю за технічним станом на надійність 144
5.6 Оптимальні строки проведення обстежень 146
5.7 Експериментальна оцінка надійності конструкцій, що експлуатуються 150
5.8 Надійність систем із захистом 154
5.9 Резерв часу для ремонту пошкодженої конструкції 160
5.10. Про можливу систему керування надійністю 164
6. Елемент і система..... 171
6.1 Умовність поняття про елемент і систему 171
6.2 Оцінка живучості 177
6.3 Оцінка важливості елементів 182
6.4 Основні, відновлювані та змінні елементи 186
6.5 Суб'єктивна оцінка поведінки елементу у складі системи 188
6.6 Класифікація систем та елементів 189
7. Заключні зауваження 198
Література..... 200

Contents

Preface 3
Introduction 5
1. Basic concepts and characteristics of reliability 8
1.1 Reliability, failure-free operation and durability 9
1.2 Structural conditions of objects 10
1.3 Survivability 12
1.4 Safety 13
1.5 On stochastic parameters of analysis 17
1.6 On the exponential reliability law 22
1.7 On far extrapolations of distribution "tails" 24
2. A set or requirements to structural objects 28
2.1 General considerations 28
2.2 Requirements of structural safety 30
2.3 Requirements of fire safety 31
2.4 Operational safety 32
2.5 Hygienic requirements 33
2.6 Comforts 35
2.7 Serviceability 35
2.8 Renovation and rejuvenation 36
3. Reliability and the method of limit states 37
3.1 Limit-state design 37
3.2 Formulation of limit states 39
3.3 A possible classification of failures 44
3.4 Is it possible to optimize the permissible risk? 47
3.5 Correspondence risk assessment 53
3.6 On the principle of balanced risk 58
3.7 A model of forming public opinion 64
3.8 Objective and subjective dangers 67
3.9 Fuzzy failures and analysis thereof 69
3.10 A system of safety coefficients 76
3.11 On design diagrams 80
3.12 On classification of loads and influences 84
4. Analyzing designed reliability of structures 89
4.1 Reasons for fault operation 89
4.2 How large is the actual reliability of structures designed to Russian code ? 97
4.3 Assessing the role of principal parameters 105
4.4 Taking into account the time factor 108
4.5 Optimum provision of rated loads and rated strengths of materials 112
4.6 Analysis for a specific reliability rate 116
4.7 Reliability of anti-seismic protection of structures 119
5. Reliability maintenance 129

5.1 Changeability of condition on different lifetime stages 129
5.2 Damageability of principal load-carrying structures 131
5.3 Assessing the work quality during erection 139
5.4 Mechanisms of wearing-out 142
5.5 Affecting the condition monitoring reliability 145
5.6 Optimum terms of inspections 147
5.7 Experimental assessment of operational structure reliability 151
5.8 Reliability of protected systems 155
5.9 Time reserve for repairing a damaged structure 162
5.10 On a possible system of reliability control 166
6. An element and a system 173
6.1 Conventionality of concepts of an element and a system..... 173
6.2 Assessing survivability 179
6.3 Assessing element importance 184
6.4 Principal, restorable and replaceable elements 188
6.5 A subjective assessment of an element behavior in a system 190
6.6 Classification of systems and elements 192
7. Final notes 200
References 202

Научное издание

Анатолий Викторович Перельмутер,
доктор технических наук

Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций

**Издание второе,
переработанное и дополненное**

Научный редактор д.т.н., проф. *Казакевич М.И.*
Редактор *Л.И. Шитова*

Подписано в печать 25.04.2000.
Формат издания 60×84/16. Гарнитура «Таймс»
Печать офсетная. Бумага офсетная №3.
Уч-изд. л. 19,6. Усл. печ. л. 19,6.
Тираж 500. Заказ № 608

Издательство института УкрНИИпроектстальконструкция
253660, Киев, ГСП, просп. Освободителей, 1