

В.Д. Райзер

ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ



В.Д. Райзер

ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Светлой памяти выдающихся ученых, замечательных людей – Алексея Руфовича Ржаницына, Георгия Александровича Гениева, Иосифа Ефимовича Милейковского, а также всем друзьям и коллегам по центральной лаборатории расчета сооружений ЦНИИСКА, шестидесятих–девяностых годов XX в. посвящается эта книга



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва, 2010

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой строительной механики МГСУ
В.Л. Мондрус

доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики МГСУ
Ю.Т. Чернов

Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. Научное издание.– М.: Издательство АСВ, 2010. – 384 с.

IBSN 978-5-93093-739-8

Книга знакомит читателей с современными методами анализа надежности сооружений. Отмечается, что расчет строительных конструкций должен в полной мере базироваться на теории надежности, основанной на вероятностных методах, которые позволяют дать более объективную оценку конструкции о ее пригодности к нормальной эксплуатации. Применение вероятностных методов обусловлено тем, что все прочностные, геометрические и деформационные характеристики конструкций, а также все воздействия на них представляют собой случайные величины или случайные процессы.

В книге изложены основные положения теории надежности строительных конструкций. Приведен анализ метода предельных состояний, содержатся предложения по совершенствованию методов нормирования расчетов на основе вероятностных подходов. Рассмотрены вероятностные модели климатических и технологических нагрузок, правила их сочетаний, а также вероятностные модели механических свойств конструкций. Описаны методы вычисления вероятности отказа. Содержится анализ надежности многоэлементных систем, изложен вероятностный метод предельного равновесия, рассмотрены вероятностные проблемы устойчивости конструкций, вероятностные модели предельной несущей способности железобетонных элементов. Исследуется надежность конструкций при эксплуатации, анализируется влияние коррозионного износа на надежность. Обсуждаются проблемы безопасности, риска, оптимального уровня надежности и живучести сооружений.

Книга иллюстрируется примерами расчета строительных конструкций на надежность.

В книгу включено два приложения. В первом из них содержатся предложения в виде новых расчетных требований проектирования строительных конструкций. Второе приложение знакомит читателя с некоторыми сведениями из теории вероятностей и математической статистики.

Книга предназначена для студентов, аспирантов и преподавателей строительных ВУЗов, инженеров и научных работников, а также специалистам по оценке недвижимости.

Theory reliability of structures

This monograph presents the resulting formulations of the theory of reliability and their applications in the probability-based structural analysis and the development of rules, codes and standards. The book is written to familiarize the reader with the applied techniques of probabilistic design. An emphasis is given to the basic principles of structural safety and their development. Reliability assessment of manufactured structures is analyzed versus that of representative test specimens and models. Classification of loads and actions, probabilistic models of the main climatic and technological loads on buildings and their combinations are discussed in detail. Evaluation of acceptable risk and optimization of design parameters in structural engineering are presented. The questions of reliability estimation of the complex systems depending upon their components as well as modern methods of failure probability analysis are considered. The problem of stochastic approach for structural static and dynamic stability is discussed. Special attention is given to the probabilistic models of currying capacity of reinforced concrete structures and to assessing the effect of corrosion in reliability analysis. Principles and criteria in reliability assessment of existing structures are developed. The key issues are discussed using specific examples of probabilistic design of different structures in civil engineering.

The book includes two appendices. The first appendix is consecrated to the proposal of the formulation of new code procedures. The second appendix consists of some information from theory of probability and mathematic statistic.

The book is addressed to specialists involved in structural design and reliability assessment of wide range of engineering structures in civil and mechanical industries, research organizations, technical universities and regulatory agencies.

IBSN 978-5-93093-739-8

© В.Д. Райзер, 2010

© Издательство АСВ, 2010

*То, что мы знаем – ограничено;
а то, чего мы не знаем – бесконечно*
*Пьер Симон Лаплас (1749–1827),
французский математик*

Предисловие

Современный уровень научно-технического прогресса позволяет создавать сооружения, обладающие высокой экономичностью и надежностью. Для достижения этой цели служат методы теории надежности. Процесс создания и эксплуатации сооружения включает в себя большое число разнообразных операций, из которых в данной книге рассматриваются только те, которые обеспечивают необходимый уровень надежности.

Если в результате проектирования, изготовления и возведения формируется уровень надежности строительной конструкции или строительного объекта в целом, то во время эксплуатации этот уровень реализуется, т.е. проявляется способность объекта выполнять свои функции в течение установленного срока службы, которая и называется **«надежностью»**. Реализация состояния объекта, при которых он не сможет выполнять свои функции называется **«отказом»**.

Мерой надежности является вероятность безотказной работы за заданный срок службы. Вероятностный подход обусловлен тем, что поведение строительных конструкций в эксплуатации описывается факторами случайной природы, а все прочностные, геометрические и деформационные характеристики конструкции, а также все воздействия на нее представляют собой случайные величины или случайные процессы.

Соответствующие уровни надежности достигаются за счет различных затрат на создание конструкции и приводят к неодинаковому числу отказов в процессе эксплуатации и, соответственно, к различным уровням ущерба. Для снижения затрат на создание сооружения следует уменьшить надежность, а для снижения затрат на эксплуатацию необходимо эту надежность повысить. Разумным удовлетворением этих противоречивых требований является некий «целесообразный» уровень надежности, близкий по возможности к практически трудноопределимому «оптимальному» уровню. Целью проектирования является создание строительной конструкции с необходимым целесообразным уровнем надежности, т.е. с определенным заданным риском отказа.

Одна из основных областей практического применения теории надежности строительных конструкций – совершенствование методов нормирования правил расчета при проектировании и контроле при изготовлении конструкций.

Современные программные комплексы содержат численные методы вычисления вероятности отказа, наиболее ценными качествами которых является простота, отсутствие каких-либо ограничений на характер статистической информации, а также возможность использования реальных данных (замеры на-

грузок, экспериментально полученные величины физических и геометрических параметров конструкций и т.п.) без предварительной разработки теоретических моделей случайных факторов, учитываемых в расчете. Это открывает широкие возможности для инженеров по непосредственному применению вероятностных методов в проектировании надежных и экономичных сооружений.

В книге рассматривается проблема надежности только несущих строительных конструкций, проблема же обеспечения надежности инженерного оборудования зданий и ограждающих конструкций не затрагивается. За рамками предлагаемой книги остались динамические задачи надежности, вероятностные модели сейсмических воздействий, оценка надежности в условиях усталостного разрушения. По этим вопросам имеется специальная литература.

Автор старался обходиться по возможности достаточно простым математическим аппаратом, изложенным в приложении и, надеется, что имеющийся в книге систематизированный материал представит интерес для специалистов, работающих в области расчета строительных конструкций, как знакомых с основными положениями расчетов на надежность, так и приступающих впервые к их изучению.

Хотелось бы, чтобы читатели книги руководствовались в своей практической деятельности словами: «...чтобы не нарушить, не расстроить, чтобы не разрушить, а построить» (Владимир Высоцкий «Песенка Алисы»).

В основу книги положены разработки автора, его аспирантов и докторантов, а также коллег по лаборатории надежности ЦНИИСКа. Всем им автор выражает глубокую признательность.

Приглашаю читателей обсуждать со мной затронутые в книге проблемы.
Мой электронный адрес vdraizer@hotmail.com

Владимир Райзер, Сан Диего, Калифорния

*Наполовину полный или наполовину пустой?
Оптимист полагает, что стакан наполовину полный
Пессимист полагает, что стакан наполовину пустой
Инженер полагает, что относительно емкости стакана
коэффициент запаса равен 2*

Глава 1. Теория надежности и нормы проектирования

1.1. Развитие методов нормирования расчетов конструкций

В проблеме обеспечения надежности строительных конструкций существенную роль играют правила расчета, представленные в строительных нормах (в технических регламентах) и определяющие ожидаемый уровень надежности, прямо связанный с расходом материалов, а следовательно и со стоимостью сооружения.

Фиксируемый уровень надежности должен обеспечивать условия эксплуатации без разрушения конструкций или без появления недопустимых деформаций, а также обеспечивать необходимую долговечность.

Необходимый уровень надежности осуществляется не только при выполнении расчетных требований норм проектирования, но он также зависит от метода расчета, принятой конструктивной схемы, вида соединений конструктивных элементов, правил конструирования, плана контрольных испытаний и условий приемки при изготовлении и монтаже.

Теоретические основы расчета конструкций сформулированы в методах строительной механики, которая оформилась как самостоятельная научная дисциплина к середине 19 в. С ее появлением стало возможным установить правила проектирования сооружений. Для этого были рассчитаны допустимые значения величин напряжений (деформаций, перемещений). Впервые это было сделано в 1840 г., когда Торговая Палата Великобритании установила для ковкого чугуна (основного в то время конструкционного материала) в железнодорожных мостах допустимое напряжение равное 5 т/кв. дюйм (77,2 МПа) [1.47]. Это значение было получено делением среднего предельного напряжения, зафиксированного в различных испытаниях ковкого чугуна (20 т/кв. дюйм), на 4, что и предусматривало определенный запас прочности. Коэффициент запаса, равный 4, рассматривался как приемлимый в первых британских нормах проектирования зданий со стальным каркасом, выпущенных в 1909 г. Советом Лондонского Графства [1.48]. Допускаемое напряжение для стали было установлено равным 7,5 т/кв. дюйм (115,8 МПа). Более высокое значение коэффициента запаса было установлено при расчете устойчивости сжатых колон (до 10) из-за существенного влияния неизбежных несовершенств. Коэффициент запаса прочности (отношение фактической прочности к допускаемому напряжению) был зафиксирован в первом отечественном нормативном документе «Урочном положении Московской губернии» (1896 г.). Метод допускае-

мых напряжений при формировании расчетных требований был сохранен в «Единых нормах строительного проектирования» [1.7] (1930 г.). До 90-х годов 20 в. этот метод был в основе норм проектирования строительных конструкций Западной Европы, США и Канады.

В методе допускаемых напряжений содержится требование, чтобы для любого волокна конструкции выполнялось неравенство $nS \leq S_d$, где S_d – допускаемое напряжение, S – напряжение в волокне, определяемое методами строительной механики; n – коэффициент запаса.

При проектировании по методу допускаемых напряжений работа строительных материалов в конструкциях рассматривалась в упругой стадии, и практически не учитывались пластические свойства материалов. При этом коэффициент запаса для всех конструкций из данного материала был одинаков, что не отвечало фактической работе таких комплексных материалов, какими являются железобетон и каменная кладка, компоненты которых (бетон и арматура, кирпич и раствор) имеют различные механические характеристики и в соответствии с этим в различной степени и с различной быстротой исчерпывают свою несущую способность.

Это послужило основой для разработки более совершенного метода, основанного на учете пластической работы материала для определенных схем разрушения, устанавливаемых испытаниями различных конструктивных элементов и названного методом разрушающих нагрузок. Он стал использоваться в б. СССР при проектировании железобетонных конструкций с 1938 г. и каменных с 1943 г.¹ В методе разрушающих нагрузок значения коэффициента запаса принимались в зависимости от соотношения нагрузок. Этот метод требует, чтобы выполнялось неравенство $nF_H \leq R_H$, где n – коэффициент запаса; F_H – нормативное значение нагрузки; R_H – нормативное значение несущей способности (среднее значение прочности бетона или так называемая гарантируемая прочность стали).

Основы нормирования расчета строительных конструкций получили дальнейшее развитие в методе предельных состояний. В качестве руководящего принципа расчета строительных конструкций этот метод был включен

¹ Большую роль в этом сыграли работы А.Ф. Лолейта, положившие начало в разработке расчета железобетонных конструкций по разрушающим усилиям, а также коллектива научных сотрудников ЦНИИПС (предшественника ЦНИИСКА и НИИЖБа) под руководством А.А. Гвоздева, развивших эти идеи и создавших теорию расчета железобетонных конструкций на стадии разрушения. Работами Л.И. Онищика и сотрудников лаборатории каменных конструкций ЦНИИПС этот метод был распространен на расчет каменных конструкций. Изучение особенностей работы стальных конструкций в упруго-пластической стадии в 30-е годы проводились в ЦНИИПС Н.С. Стрелецким, С.А. Берштейном, В.С. Туркиным и др., а в области деревянных конструкций Ф.П. Белянкиным, Ю.М. Ивановым, Г.Г. Карлсенем.

в б. СССР в первое издание Строительных норм и правил [1.34]. Метод базировался прежде всего на разработках Н.С. Стрелецкого [1.33], а также на исследованиях [1.1,1.8] и др.²

Введение метода предельных состояний позволило учесть специфику работы разных конструкций, фактическую изменчивость нагрузок и несущей способности. Этот метод опирается на статистическое изучение нагрузок, механических свойств строительных материалов и условий работы конструкций. Необходимый уровень надежности при таком подходе определяется нормируемыми значениями величин нагрузок, прочности конструкционных материалов, условиями работы конструкции и другими факторами. В методе предельных состояний был сделан шаг, предусматривающий учет выхода конструкции из строя. Здесь введено понятие так называемой «обеспеченности» расчетных значений, т.е. для нагрузки вероятности того, что она окажется меньше расчетного значения, а для прочности конструкции – вероятности того, что она будет больше расчетного значения.

Созданный в б. Советском Союзе метод предельных состояний получил широкое признание во всем мире. Вначале он был положен в основу стандарта Совета Экономической Взаимопомощи [1.31], распространявшийся на страны Восточной Европы. В настоящее время метод предельных состояний используется в системе европейских норм [1.41], в стандарте ИСО [1.43], в нормах США, Канады где он получил название «метод частных коэффициентов надежности»³.

Действительно во всех методах нормирования (допускаемых напряжений, разрушающих нагрузок, предельных состояний) из множества состояний конструкции за время ее жизненного цикла выбираются лишь предельные, по отношению к которым формулируются расчетные требования. Но в методе предельных состояний произошла замена общего коэффициента запаса на произведение частных коэффициентов.

² Его конкретная разработка была выполнена комиссией по унификации методов расчета ЦНИИПС в составе В.А. Балдина, А.А. Гвоздева, И.И. Гольденблата, Ю.М. Иванова, В.М. Келдыша, В.М. Коченова, Л.И. Онищика, Н.С. Стрелецкого, К.Э. Таля. Этой же комиссией были разработаны на базе нового метода нормирования расчетов нормы проектирования конструкций (стальных, деревянных, бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных).

³ Можно указать на определенную преемственность в развитии современных норм проектирования. Так сложилось, что первыми эту работу провели отечественные специалисты. СНИПы (50-е годы XX в.), затем СТ СЭВ (70–80 гг.), и, наконец, Евроноормы (90-е гг.), разработанные при активном участии специалистов из стран б. СЭВ, широко отразившие в Евроноормах наработки и СТ СЭВ и СНИПов. Высказывания, что СНИПы в новых условиях хозяйствования в России не годятся свидетельствуют о конъюнктурности и профнепригодности авторов подобных высказываний. Именно Нормы и Стандарты являются действенным инструментами обеспечения безопасности населения при реализации рыночных механизмов. Такой подход реализуется в странах Евросоюза.

Дальнейшее совершенствование правил расчета строительных конструкций привело к необходимости широкого привлечения методов теории надежности, использующие теорию вероятности и математическую статистику.

Еще в 1926 г. статистическая природа коэффициента запаса прочности была показана в работе Майера [1.45], в которой автор вместо расчета по допускаемым напряжениям предложил для выбора значений параметров, вводимых в расчет, использовать вероятностные методы. В 1929 г. Хоциалов [1.38] предложил, принимая во внимание изменчивость основных параметров, вести проектирование конструкций, исходя из оптимальной суммы как капитальных затрат, так и вероятности «дефектных уклонений» и суммы убытков от аварий, т.е. в этой работе уже обсуждается идея вероятностной оптимизации.

Существенным развитием идей Майера и Хоциалова явились работы Стрелецкого [1.32], Плота [1.46], и Вержбицкого [1.51], в которых в качестве случайных величин использовались не только прочностные характеристики материала, но и параметры нагрузок. Совершенствованию методов нормирования расчетов на основе вероятностного подхода способствовали пионерские работы Фрейденшталя [1.42], Ржаницына [1.25]⁴ и Джонсона [1.44].

До появления этих работ в инженерной практике обычно считалось, что коэффициент запаса является особым числом, наделенным природой какими-то исключительными свойствами. Предполагалось, что точное его соблюдение, предписанное его численным значением, обеспечивает надежность конструкций, в то время как даже незначительное его преуменьшение влечет за собой опасность для сооружения. Однако, для составителя норм расчета коэффициент запаса всегда оставался обобщенным отражением мер предосторожности, обеспечивающих в целом удовлетворительный уровень надежности.

Общие принципиальные вопросы применения вероятностных методов к анализу надежности сооружений получили развитие в фундаментальных исследованиях Болотина [1.4] и Ржаницына [1.26].

Важный вклад в совершенствование методов расчета надежности строительных конструкций и обоснование процедур нормирования расчетных параметров внесли исследования Барштейна [1.2], Бать [1.3, 1.16], Гвоздева [1.5,], Дривинга [1.6], Клепикова [1.9], Кудзиса [1.10], Лосицкой [1.11], Лычева [1.12], Отставнова [1.3, 1.13, 1.16], Перельмутера [1.14], Райзера [1.15–1.24, 1.50], Тимашева [1.36], Федорова [1.37] и др., концептуальные разработки Снарскиса [1.27, 1.28] и Сухова [1.13, 1.16, 1.18, 1.35].

За рубежом получены также значительные результаты в теории надежности конструкций. Обзор этих исследований содержится в [1.49].

⁴ С 1946 г., когда теория надежности строительных конструкций только начинала формироваться как самостоятельная дисциплина, А.Р. Ржаницын стал последовательно развивать вероятностные методы обоснования запасов в сооружениях. К 1950 г. им были сформулированы некоторые основные положения вероятностного метода нормирования расчетов конструкций.

1.2. Метод предельных состояний

Основные положения формулируются в соответствии с [1.31, 1.43], а также [1.16, 1.17]. Отмечается, что строительные конструкции и основания должны быть запроектированы таким образом, чтобы они обладали достаточной надежностью при возведении и эксплуатации с учетом, при необходимости особых воздействий (например, в результате землетрясения, наводнения, пожара, взрыва).

Основным свойством, определяющим надежность строительных конструкций, зданий и сооружений в целом, является безотказность их работы – способность сохранять заданные эксплуатационные качества в течение определенного срока службы.

Предельные состояния определяются как состояния, при которых конструкция, основание (здание или сооружение в целом) перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям при производстве работ (возведении).

Согласно [1.31, 1.43] предельные состояния подразделяются на две группы.

Первая группа предельных состояний (по несущей способности) включает предельные состояния, которые ведут к полной непригодности к эксплуатации конструкций, оснований (зданий или сооружений в целом) или к полной (частичной) потере несущей способности. Эти предельные состояния можно определить как абсолютные предельные состояния. Они характеризуются: разрушениями любого характера (например, пластическим, хрупким, усталостным); потерей устойчивости формы, приводящей к полной непригодности к эксплуатации; потерей устойчивости положения; переходом в изменяемую систему; качественным изменением конфигурации; другими явлениями, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации (например, чрезмерными деформациями в результате ползучести, пластичности, сдвига в соединениях, раскрытия трещин, а также образованием трещин).

Вторая группа предельных состояний (по эксплуатационной пригодности) включает предельные состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций или оснований, или уменьшающие долговечность зданий (сооружений) по сравнению с предусмотренным сроком службы. Эти предельные состояния можно определить как функциональные предельные состояния. Они характеризуются: достижением предельных деформаций конструкции (например, предельных прогибов, поворотов) или предельных деформаций основания; предельным уровнем колебаний конструкций или оснований; образованием трещин, достижением предельных раскрытий или длин трещин; потере устойчивости формы, приводящей к затруднению нормальной эксплуатации, а также другими явлениями, при которых возникает необходимость временно-го снижения их срока службы (например, коррозионные повреждения).

В последнее время при проектировании многоэлементных систем, каковыми являются высотные здания, большепролетные пространственные покрытия

и т.п. решаются проблемы противодействия каскадному развитию отказов, недопущения прогрессирующего разрушения. В нормах США и Канады введено понятие «целостности» (*integrity*) сооружения [1.40].

Представляется уместным ввести, наряду с понятиями несущая способность и эксплуатационная пригодность, понятие –живучесть [1.14], и определить еще одну группу предельных состояний. Живучесть рассматривается [1.39] как свойство системы сохранять при катастрофических возмущениях способность к выполнению основных функций, не допуская каскадного развития возмущений и отказов.

Предлагаемая здесь третья группа предельных состояний (по живучести) включает предельные состояния, характеризующиеся лавинообразным развитием отказов, приводящих к полному выходу из строя элементов системы. Причинами подобного развития могут являться как катастрофические воздействия –пожары, взрывы, включая атаки террористов (реальность 21 века!), так и грубые ошибки при монтаже или эксплуатации. Расчет по третьей группе предельных состояний состоит в обеспечении несущей способности здания или сооружения при исключении из расчетной схемы одного или нескольких несущих элементов, или образование одного или нескольких пластических шарниров. Виды возможных возмущений (выключающихся элементов и связей) должны быть приведены в задании на проектирование.

Расчет по предельным состояниям имеет целью обеспечить надежность здания или сооружения в течение всего срока его службы, а также при производстве работ. Условия обеспечения надежности заключаются в том, чтобы расчетные значения нагрузок или вызванных ими усилий, напряжений, деформаций, перемещений не превышали соответствующих им предельных значений, устанавливаемых нормами проектирования конструкций или оснований.

Общее условие непревышения предельного состояния может быть представлено в виде

$$g(a_i F_p, b_i R_p, \gamma_n, \gamma_a, \gamma_d, C) \geq 0, \quad (1.1)$$

где F_p ⁵ – расчетное значение нагрузки, $a_i F_p$ – нагрузочный эффект (хотелось бы чтобы инженеры использовали этот термин, под которым подразумеваются усилия, напряжения, деформации, перемещения и т. п.), a_i – функция геометрических и физических параметров конструкций, $F_p = \gamma_f F_n$, γ_f – коэффициент надежности по нагрузке, F_n – нормативное значение нагрузки; R_p – расчетное значение сопротивления материала, $b_i R_p$ – несущая способность конструкции, b_i – функция параметров поперечного сечения и т.п.,

⁵ В книге используются также обозначения для нагрузок – Q , q и для усилий – F , N .

$R_p = R_n / \gamma_m$, γ_m – коэффициент надежности по материалу, R_n – нормативное значение сопротивления материала; γ_n – коэффициент надежности по назначению конструкции («коэффициент важности» в зарубежных нормах); γ_d – коэффициент условий работы (коэффициент модели согласно [1.41, 1.43]); γ_a – коэффициент точности; C – постоянные, включающие предварительно выбранные ограничения, задаваемые для некоторых видов предельных состояний (по прогибам, по раскрытию трещин и т.п.).

Условие (1.1) определяет границу области допустимых состояний конструкции. Входящие в (1.1) многообразные факторы, от которых зависит состояние конструкции, можно условно разделить на две группы. Первая группа факторов зависит от свойств самой конструкции; вторая группа факторов зависит главным образом от внешних воздействий.

Такое разделение расчетных величин на две группы возможно по той причине, что в большинстве между ними отсутствуют функциональные и корреляционные связи. Хотя можно привести примеры, когда факторы этих двух групп влияют друг на друга, более типичным является случай их независимости.

Тогда для первой группы предельных состояний условие (1.1) может быть выражено соотношением

$$\gamma_n g_F(a_i F_p, \gamma_a, \gamma_d) \leq g_R(b_i R_p). \quad (1.2)$$

(Усилия в конструкции не должны превышать несущей способности).

Для второй группы предельных состояний условие (1.1) можно записать в виде

$$\gamma_n g(a_i F_p, b_i R_p, \gamma_a, \gamma_d) \leq C. \quad (1.3)$$

Левая часть соотношения (1.3) может представлять прогиб, угол поворота, раскрытие трещин и т.п., а правая часть – предельно допустимые значения этих величин. Предельно допустимые значения деформаций устанавливаются обычно исходя из необходимости соблюдения технологических или архитектурных требований к деформации сооружения-изменение проектных уровней и положения здания и сооружения в целом, отдельных их элементов и оборудования, включая требования к нормальной работе лифтов, кранового оборудования и т.п.

Для предлагаемой третьей группы предельных состояний (по живучести) условие (1.1) может быть также выражено соотношением (1.2), но при этом следует принять, что $\gamma_f = \gamma_m = 1$, а величины нагрузок вводятся в расчет пониженными значениями [1.29]. Здесь учитывается весьма малая вероятность совпадения максимальных значений климатических (снеговых, ветровых) нагрузок и максимальных нагрузок на перекрытия с катастрофическими возмущениями.

При проектировании сооружений необходимо рассматривать расчетные ситуации, представляющие собой учитываемый комплекс условий, опреде-

ляющих расчетные требования к конструкциям. Могут быть учтены расчетные ситуации следующих типов:

- установившиеся, имеющие продолжительность того же порядка, что и срок службы или жизненный цикл строительного объекта (например, эксплуатация между двумя капитальными ремонтами или изменениями технологического процесса).

- переходные, имеющие небольшую по сравнению со сроком службы строительного объекта продолжительность (например, возведение сооружения, капитальный ремонт, реконструкция).

- аварийные, имеющие малую вероятность появления и небольшую продолжительность, но являющиеся весьма важными с точки зрения последствий достижения возможных при них предельных состояний (например, ситуации, возникающие при пожаре, взрыве, аварии оборудования, столкновении движущего наземного или воздушного транспорта с сооружением, а также эти и другие возможные катастрофические возмущения приводящие в том числе и к прогрессирующему разрушению).

Расчетные ситуации характеризуются расчетной схемой конструкции, видами и значениями величин нагрузок, значениями коэффициентов надежности, перечнем предельных состояний, которые должны рассматриваться в данной ситуации.

Параметрами сопротивления материалов силовым воздействиям, устанавливаемые нормами проектирования строительных конструкций, являются нормативные значения сопротивлений с учетом случайной изменчивости механических свойств материалов. Принято, что обеспеченность нормативных значений сопротивлений должна быть не менее 0.95. Нормативное значение сопротивления материала обычно допускается принимать равным значению контрольной или браковочной характеристики, указанной в соответствующих стандартах на материалы.

Кроме нормативных значений сопротивлений могут устанавливаться также другие нормативные значения характеристик материалов – модули упругости, коэффициенты трения, сцепления, ползучести, усадки и др., принимаемые по средним значениям статистических данных.

Если величины, характеризующие свойства материалов и грунтов, являются функциями других величин или находятся в корреляционной зависимости от них, то нормативные значения характеристик материалов и грунтов могут быть получены расчетным путем с использованием зависимостей, устанавливаемых нормами проектирования.

Возможные отклонения сопротивлений и других характеристик материалов и грунтов в неблагоприятную сторону от нормативных значений учитываются коэффициентами надежности по материалу и грунту γ_m , которые устанавливаются нормами проектирования конструкций и оснований в зависимости от свойств материалов и грунтов, их статистической изменчивости (при обеспе-

ченности, зависящей от вида предельного состояния), а также с учетом факторов, которые не могут быть определены статистическим путем (в частности – характер разрушения материала, допуски на толщину проката, практический опыт и т.п.).

Расчетным значением сопротивления материала или расчетным значением характеристики грунта называется значение сопротивления или характеристики, получаемое делением нормативного значения сопротивления R_n или значения характеристики на коэффициент надежности по материалу или грунту γ_m . Допускается другие расчетные значения характеристики материала определять делением их нормативных значений на коэффициент надежности по материалу.

Нормативные значения нагрузок и воздействий F_n являются основными характеристиками нагрузок, их значения и классификация содержатся в нормах нагрузок [1.29].

Коэффициент надежности по нагрузке γ_f учитывает возможные неблагоприятные отклонения воздействия (нагрузка есть частный вид воздействия) от его нормативного значения из-за изменчивости нагрузок или отступлений от условий нормальной эксплуатации. На этот коэффициент умножается нормативное значение воздействия F_n для получения его расчетного значения F_p .

При наличии статистических данных расчетные значения нагрузок допускается определять непосредственно по заданной вероятности их превышения. Значения этих коэффициентов, как и нормативные значения воздействий, устанавливаются из исследований природы воздействий и анализа статистических данных о них. Значения коэффициентов γ_f могут быть различными для различных предельных состояний и различных расчетных ситуаций. При определении нормативных и расчетных значений нагрузок, изменяющихся во времени, допускается учитывать предусматриваемый срок службы здания или сооружения.

Коэффициент точности γ_a учитывает возможные неблагоприятные отклонения геометрических характеристик (размеры элементов конструкции, их взаимное расположение, начальные прогибы и т.д.) от их нормативных значений. На этот коэффициент умножается нормативное значение геометрической характеристики для получения ее расчетного значения. В большинстве случаев вместо коэффициента точности в нормах используется добавочный элемент, который прибавляется к нормативному значению и играет ту же роль, что и коэффициент точности. В некоторых случаях отклонения геометрических размеров учитываются коэффициентом по материалу (допуски на прокат при назначении коэффициента надежности по материалу для металлоконструкций). Значения коэффициентов точности и добавочных элементов устанавливаются на основе изучения условий изготовления и монтажа конструкций (с учетом

правил нормирования допусков и контроля качества) и анализа статистических данных о соответствующих геометрических характеристиках.

Коэффициент условий работы (коэффициент модели) γ_d отражает факторы, которые в целях упрощения расчетной модели не учитываются прямым путем. Он может вводиться в расчет для упрощения приближенного учета ползучести, пластических свойств материала, влияния податливости опор и в других любых случаях упрощения статических и динамических расчетов (так называемые коэффициенты свободной длины, коэффициенты динамичности и т.п.). На этот коэффициент могут умножаться или делиться значения усилий в элементах конструкции или несущая способность как всей конструкции, так и отдельных ее элементов. В этих случаях значения коэффициентов условий работы устанавливаются путем теоретических обобщений или путем обработки результатов экспериментальных исследований.

Кроме того, этот коэффициент учитывает факторы, которые еще не имеют приемлемого аналитического описания, такие как влияние коррозии, агрессии среды, биологических воздействий т.п. На этот коэффициент может делиться или умножаться значение несущей способности элемента или всей конструкции. Здесь значения коэффициентов условий работы устанавливаются из исследований реальных условий, в которых находится конструкция в процессе эксплуатации, влияния этих условий на несущую способность конструкции и сравнения реальных условий с принятой моделью. Таким образом, этот коэффициент учитывает степень идеализации расчетной модели. Отклонения от расчетной модели носят случайный характер, и поэтому значения коэффициентов условия работы должны определяться, как правило, методами теории надежности.

Коэффициент надежности по назначению (коэффициент ответственности, коэффициент важности) γ_n учитывает ответственность сооружения и ее влияние на требуемый уровень надежности, он вводится в основное неравенство (1.1), которое является основным требованием метода предельных состояний – усилие в элементе конструкции или расчетное значение нагрузки на всю конструкцию, полученное с учетом всех остальных коэффициентов, не должны превышать несущую способность элемента или конструкции, которые также получены с учетом соответствующих коэффициентов. На этот коэффициент умножается нагрузочный эффект.

Обоснование к введению этого коэффициента в нормы проектирования [1.31, 1.43] содержится в [1.13], с соответствующим анализом в [1.17], и связано с соображением, что конструкции должны иметь различную надежность в зависимости от ответственности проектируемого объекта. Отсюда вытекает целесообразность проведения дифференциации уровня надежности. Степень ответственности зданий и сооружений определяется размером материального и социального ущерба, возможного при достижении конструкциями предельных состояний.

Значение коэффициента надежности по назначению γ_n установлено в зависимости от класса ответственности, на которые разбиты все здания и сооружения. Так, например, в [1.30] установлено три класса ответственности (1-ая категория – повышенный уровень ответственности, 2-ая категория – нормальный уровень ответственности, 3-я категория – пониженный уровень ответственности).

Из изложенного выше очевидно, что метод предельных состояний имеет две характерные особенности:

- первая состоит в том, что из всего множества возможных состояний конструкции выбираются лишь предельные. т.е. те, при которых конструкция перестает удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям. Для этих состояний записываются условия их недостижения;

- вторая состоит в том, что все исходные величины, случайные по своей природе (т.е. которые могут принимать различные значения с различной вероятностью), представляются в нормах проектирования некоторыми детерминированными нормативными значениями, а влияние их изменчивости на надежность конструкции учитывается коэффициентами надежности. Каждый из этих коэффициентов учитывает изменчивость лишь одной исходной величины, т.е., если надежность конструкции представлять как функцию многих исходных величин, то каждый коэффициент надежности будет зависеть от частной производной этой функции по соответствующей переменной. Поэтому эти коэффициенты и называются частными коэффициентами надежности.

Метод предельных состояний по форме является детерминированным. Однако он может быть поставлен на вероятностную основу с любой степенью достоверности. Степень достоверности зависит от степени достоверности процедур, используемых для выбора значений коэффициентов надежности. Эти процедуры основываются на опыте проектирования с использованием приведенных ниже результатов теоретических исследований в области теории надежности сооружений.

1.3. Вероятностный анализ метода предельных состояний

Проектирование конструкций – это процесс принятия решений, при которых должны учитываться различные неопределенности для достижения приемлимой вероятности отказа. Приемлимые вероятности отказа различны для различных предельных состояний, так как различны последствия их реализаций.

Для вероятностных расчетов прежде всего необходимо иметь детерминированную зависимость между характеристиками конструкции и ее несущей способности.

Состояние конструкции в условиях эксплуатации может быть охарактеризовано конечным числом независимых параметров. Часть этих параметров харак-

теризуют нагрузки, другие – прочность материалов, третьи – отклонение реальных условий работы конструкции от принятой расчетной схемы. Уравнение границы области допустимых состояний конструкции представляется в виде

$$\tilde{g}(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad (1.4)$$

где $\tilde{g}(x_1, x_2, \dots)$ – функция работоспособности [1.19].

Здесь и далее (\sim) обозначается случайная величина ⁶.

Все расчетные величины можно разделить на две основные группы. Первая группа включает характеристики, относящиеся к свойствам самой конструкции, другая включает в себя характеристики внешних воздействий. Тогда условие непревышения границы области допустимых состояний конструкций может определяться как выполнение предельного неравенства

$$\tilde{g}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \tilde{R}(x_1, x_2, \dots, x_m) - \tilde{F}(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n) > 0 \quad (1.5)$$

или $\tilde{g} = \tilde{R} - \tilde{F} > 0$.

В приложении к задачам расчета по первой группе предельных состояний: \tilde{F} – наибольшее значение нагрузочного эффекта – усилия или напряжения в конструкции, выраженные через внешнюю нагрузку (т.е. задача определения напряженного состояния предполагается решенной); \tilde{R} – сопротивление, выраженное в тех же единицах (предел прочности, предел текучести, пластический момент); \tilde{g} – характеристика, которую следуя А.Р. Ржаницыну [1.26], будем называть резервом прочности (резерв несущей способности).

В общем случае усилия и сопротивление являются случайными функциями времени, но в рассматриваемой постановке F и R считаются случайными величинами, с заданными законами распределения. Следует отметить также, что для получения более простых результатов условие (1.5) записано для того случая, когда F и R являются скалярными функциями, хотя во многих случаях необходимо рассматривать соответствующие вектор-функции.

Если принять, что вероятность выполнения неравенства (1.5) есть вероятность безотказной работы, иными словами вероятность неразрушения конструкции, то вероятность отказа (вероятность разрушения) определяется выражением⁷

$$P_f = \int_{-\infty}^0 p_g(g) dg \quad (1.6)$$

где $p_g(g)$ – плотность распределения резерва прочности, ее можно определить используя формулу плотности распределения суммы случайных величин.

⁶ Предполагается, что читатель знаком с основными положениями теории вероятностей. С некоторыми необходимыми сведениями из теории вероятностей и математической статистики можно ознакомиться в Приложении Б.

⁷ P_f – вероятность отказа, индекс «f» обозначает – *failure* – отказ, P_s – вероятность безотказной работы, индекс «s» обозначает – *successful* – благоприятный исход (безотказность). Эти обозначения соответствуют [1.9, 1.10].

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Теория надежности и нормы проектирования	5
1.1. Развитие методов нормирования расчетов конструкций	5
1.2.. Метод предельных состояний	8
1.3. Вероятностный анализ метода предельных состояний	15
1.4. Нормы проектирования и надежность конструкций	22
1.5. Проектирование конструкций с заданным уровнем надежности	28
Глава 2. Приемлемый риск и оптимальный уровень надежности	32
2.1. Оценка риска при проектировании сооружений	32
2.2. Оптимизация уровня надежности сооружений	39
2.3. Оптимизация надежности конструкций и безопасность человека	44
2.4. Оптимизация многоэлементных систем	49
2.5. Оптимальное расстояние между температурными отсеками	56
2.6. Оптимальное расстояние между деформационными швами	61
2.7. Концепция равной надежности	67
Глава 3. Методы вычисления вероятности отказа	70
3.1. Общие замечания	70
3.2. Метод двух моментов	72
3.3. Метод горячих точек	73
3.4. Метод статистических испытаний	81
3.5. Метод Монте-Карло	86
3.6. Метод Монте-Карло с моделированием стратифицированных выборок	89
3.7. Особенности предлагаемых подходов	91
3.8. Анализ надежности многоэлементного пространственного покрытия	92
Глава 4. Система и элементы	98
4.1. Общие замечания	98
4.2. Последовательное соединение элементов	98
4.3. Надежность параллельного соединения при хрупком разрушении	101
4.4. Динамический эффект при хрупком разрушении	104
4.5. Надежность параллельного соединения при пластическом разрушении	107
4.6. Вероятностный метод предельного равновесия	109
4.7. Оценка живучести сооружений	117
	379

Глава 5. Изменчивость механических свойств конструкций	121
5.1. Основные положения	121
5.2. Статистический контроль несущей способности	124
5.3. Байесовский подход в анализе обеспеченности свойств металлопроката	127
5.4. Аппроксимация экспериментальных данных в задачах надежности	132
Глава 6. Вероятностные модели климатических и технологических нагрузок и воздействий	138
6.1. Общие положения и классификация	138
6.2. Статистическое обоснование моделей временных нагрузок	143
6.3. Снеговые нагрузки	153
6.4. Влияние снеговой нагрузки на деформации ползучести	163
6.5. Ветровые нагрузки	167
6.6. Учет случайного направления скорости ветра	173
6.7. Температурные климатические воздействия	177
6.8. Нагрузки на перекрытия зданий	184
6.9. Нагрузки от веса конструкций	188
6.10. Воздействия неравномерных осадок оснований	192
Глава 7. Совместное действие нагрузок	198
7.1. Учет сочетаний нагрузок в строительных нормах	198
7.2. Сочетание нагрузок в виде случайных величин	200
7.3. Применение моделей пуассоновского типа	203
7.4. Совместное действие нагрузок, представляемых марковскими процессами	205
7.5. Вероятностный метод определения коэффициента сочетаний	209
Глава 8. Вероятностные методы в задачах устойчивости	214
8.1. Случайные возмущения	214
8.2. Области неразрушимости	217
8.3. Вероятность отказа внецентренно-сжатого стержня	220
8.4. Вероятностный расчет внецентренно-сжатой стойки с разными эксцентриситетами	224
8.5. Распределение несущей способности сжато-изогнутого стержня	228
8.6. Статистическая термоустойчивость ребристых пластин	233
8.7. Вероятностный расчет устойчивости трехслойной панелей	246
8.8. Стохастический анализ динамической неустойчивости	252

Глава 9. Вероятностные модели несущей способности железобетонных конструкций	259
9.1. Предельная несущая способность прямоугольного сечения изгибаемого элемента с армированием растянутой зоны	259
9.2. Предельная несущая способность прямоугольного сечения изгибаемого элемента с армированием растянутой и сжатой зоны (двойное армирование)	266
9.3. Предельная несущая способность таврового сечения изгибаемого элемента с армированием растянутой и сжатой зоны (двойное армирование)	270
9.4. Анализ надежности внецентренно-сжатого железобетонного элемента	273
Глава 10. Надежность конструкций при коррозионном износе	279
10.1. Модели коррозионного износа	279
10.2. Оценка надежности при равномерном износе	283
10.3. Влияние напряженного состояния на процесс износа	290
10.4. Оценка надежности при неравномерном износе	291
10.5. Метод определения коэффициента условий работы	298
Глава 11. Анализ надежности эксплуатируемых конструкций	302
11.1. Общие замечания	302
11.2. Оценка надежности	302
11.3. Расчетные критерии	306
Приложение А.	
Новые расчетные требования проектирования	310
А1. Общие замечания	310
А2. Концепция нормирования и стандартизации требований к строительным конструкциям	311
А3. Характеристики вероятностной модели работы конструкции	312
А4. Выбор и формирование надежностных требований	315
А5. Показатели надежности и их целесообразные значения	317
Приложение Б.	
Некоторые сведения из теории вероятностей и математической статистики	321
Б1. Введение	321
Б2. Понятие вероятности	323
Б3. Основные теоремы теории вероятностей	325
Б4. Случайные величины и характеристики их распределений	327
Б5. Системы случайных величин	332
	381

Б6. Функции случайных величин	334
Б7. Законы распределения случайных величин	337
Б8. Случайные функции	347
Б9. Выбросы случайной функции за заданный уровень	349
Б10. Марковский случайный процесс	351
Б11. Определение параметров распределений на основе экспериментальных данных	355
Литература	366

Научное издание

Владимир Давидович Райзер

ТЕОРИЯ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Компьютерная верстка: М.А. Шпилько, В.П. Бурмакин

Редактор: В.П. Бурмакин

Дизайн обложки: Н.С. Романова

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.

Подписано к печати 05.03.2010. Формат 70х100/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. 24 п.л. Тираж экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
Тел./факс: (499) 183-56-83. E-mail: iasv@mgsu.ru; <http://www.iasv.ru>