

С.Ф. Пичугин  
S.F. Pichugin

НАДЕЖНОСТЬ  
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
ЗДАНИЙ

RELIABILITY  
OF INDUSTRIAL BUILDING  
STEEL STRUCTURES



**С.Ф. Пичугин**  
**S.F. Pichugin**

**НАДЕЖНОСТЬ  
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
ЗДАНИЙ**

**RELIABILITY  
OF INDUSTRIAL BUILDING  
STEEL STRUCTURES**



Издательство Ассоциации строительных вузов  
Москва  
2011

УДК 624.014.2.004.15:624.042  
ББК 38.54-02

**Рецензенты:**

*А.В. Перельмутер* (доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник НП ООО SCAD Soft); *В.Н. Гордеев* (доктор технических наук, профессор, первый заместитель председателя правления ОАО УкрНИИ-проектстальконструкция); *С.Б. Усаковский* (доктор технических наук, профессор, кафедра городского строительства Киевского национального университета строительства и архитектуры).

**Пичугин С.Ф.**

**Надежность стальных конструкций производственных зданий:**  
Монография. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 456 с.

**ISBN 978-5-93093-811-1**

В монографии украинского автора излагается вероятностный метод оценки надежности конструкций. Он учитывает случайный характер нагрузок и прочности стали, совместное действие нагрузок, специфический характер работы и отказов стальных элементов, узлов и также стальных конструктивных систем в целом. На основе разработанного метода были выполнены численные расчеты надежности широкого круга таких конструкций, как подкрановые балки, фермы, стропильные балки, колонны и рамы. В результате были обоснованы коэффициенты норм проектирования и был достигнут экономический эффект.

Pichugin S.F. Reliability of of Industrial Building Steel Structures: Monograph. – М: Publishing house ASV, 2011. – 456 p.

The Ukrainian author monograph contains the developed probabilistic method of structural reliability estimation. It takes account of the random loads and steel strength, loads joint action, specific character of work and failure of steel elements, nodes and the whole steel structure systems as well. On the base of the determined method the numerical reliability computations of a wide range of steel structures including crane girders, trusses, roof beams, columns and frames were realized. As a result some design coefficients for Codes improvement as well as the reduction of cost have been offered.

**ISBN 978-5-93093-811-1**

© Издательство АСВ, 2011

© Пичугин С.Ф., 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ

*Посвящается светлой памяти  
Николая Станиславовича Стрелецкого,  
классика советских металлических  
конструкций, основателя науки  
о надежности в строительстве*

В настоящей книге излагаются разработки автора в области надежности строительных конструкций зданий и сооружений. В пользу выбора этой темы можно привести следующие очевидные доводы. Начнем с того, что в неизменно актуальную задачу повышения эффективности строительства главным вопросом входит снижение материалоемкости несущих конструкций. Далее примем во внимание, что одно из очевидных решений этого вопроса, не требующее дополнительных материальных и финансовых вложений, – это совершенствование методов расчета и проектирования конструкций. И, наконец, в качестве вывода отметим, что при современном достаточно высоком развитии теории расчета конструкций, подкрепленной широким применением вычислительной техники, наименее изученным и перспективным направлением в данной области является вероятностный расчет, позволяющий оценить надежность конструкций зданий и сооружений, которая должна быть достаточно высокой.

Необходимость обеспечения высокого уровня надежности зданий и сооружений связана с тем, что их выход из строя в процессе эксплуатации сопровождается большими экономическими потерями, связанными с простоями, ремонтами, материальными и трудовыми убытками. Более того, на таких опасных производствах, как, например, АЭС, газопроводы, шахты, химические и металлургические предприятия, транспорт и т.п., недостаточная надежность строительных объектов может привести к катастрофам с человеческими жертвами и опасными экологическими последствиями. Дополнительную остроту указанная проблема приобретает в условиях рыночной экономики, когда показатели надежности и долговечности строительной продукции могут решающим образом влиять на исход конкурентной борьбы за заказы в строительстве.

Наука о надежности в строительстве как раздел науки о надежности технических систем изучает закономерности изменения показателей качества зданий и сооружений и разрабатывает методы, которые обеспечивают безотказность и достаточную долговечность их работы при наименьших

затратах. Надежность, определяемая кратко как «качество, развернутое во времени», – это важнейший технико-экономический параметр строительных объектов, во многом определяющий технический уровень и конкурентоспособность строительной продукции.

Между тем можно говорить о нерешенности в практическом плане проблемы надежности строительных конструкций вообще и металлических конструкций в частности. Такое положение связано прежде всего со сложным характером внешних нагрузок и воздействий, имеющих случайную природу и зависящих от физических, климатологических, технологических и других пространственно-временных факторов. Определенные трудности возникают при расчете надежности на реальные случайные воздействия некоторых конструктивных элементов, которые работают геометрически и физически нелинейно. Дополнительные сложности аналитического и вычислительного характера должны быть преодолены при оценке надежности конструктивных систем, особенно статически неопределимых конструкций. Существующие нормы проектирования конструкций, являясь по форме детерминистическими, обеспечивая, кроме отдельных случаев, безаварийность конструкций в течение срока эксплуатации, не дают, однако, возможности количественно оценить заложенный при этом уровень надежности конструкций. Содержащиеся в нормах проектирования расчетные коэффициенты метода предельных состояний нуждаются в уточнении статистическими методами, в частности, коэффициенты надежности по нагрузке, сочетаний и условий работы.

В актуальности вопросов надежности в строительстве автор убедился достаточно давно, когда еще начинающим инженером в начале 60-х гг. XX столетия открыл для себя классические работы основоположника вероятностных методов в строительстве члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора, доктора технических наук Николая Станиславовича Стрелецкого, светлой памяти которого посвящена эта книга. В последующие годы автору посчастливилось лично общаться с Н.С. Стрелецким во время обучения в аспирантуре на руководимой им кафедре металлических конструкций Московского инженерно-строительного института, в полной мере ощутить его высокий научный и человеческий авторитет и окончательно убедиться в перспективности научных исследований строительных конструкций вероятностными методами с последующей оценкой их надежности. В данном научном направлении автор работал в МИСИ (1963–1967 гг.), в Магнитогорском горно-металлургическом институте имени Г.И. Носова (1967–1974 гг.) и с 1974 г. по настоящее время – в Полтавском национальном техническом университете имени Юрия Кондратюка.

Предлагаемая читателю монография является отражением научных результатов, полученных автором за указанный период. В ней системно, с единых позиций, на основе современных вероятностных методов и вычислительной техники излагается методика расчета надежности стальных конструкций и результаты ее применения для широкого круга зданий произ-

водственного назначения. Насколько известно автору, подобная монография не выходила в странах СНГ.

В книге не приводятся сведения из теории вероятности и математической статистики, знакомство с которыми желательно для освоения приведенного в книге материала; читателю в необходимых случаях следует обратиться к соответствующим учебникам и пособиям.

Специфика производственных зданий со стальным каркасом отражена в изложении материала в части нагрузок (нагрузки мостовых кранов), элементов конструкций (ступенчатые колонны), конструктивных систем (поперечные рамы промышленных цехов). Вместе с тем основной материал книги носит общий характер и, по мнению автора, может быть успешно использован для конструкций из других материалов, например, железобетонных и сталежелезобетонных, а также для зданий и сооружений другого назначения.

Автор должен предупредить читателя, что из известных четырех компонентов надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости) в монографии основное внимание уделяется оценкам безотказности конструкций, в меньшей мере – оценкам их долговечности. Это вполне оправдано, поскольку для строительных объектов безотказность (и связанная с ней долговечность) является главной составляющей, в то время как ремонтпригодность и сохраняемость имеют подчиненное значение и в данной монографии не рассматриваются.

Для упрощения первого знакомства читателя с книгой приведем короткое содержание отдельных ее глав. В первой главе выполнен обзор исследований надежности строительных конструкций, в том числе нагрузок и воздействий, надежности элементов, а также конструктивных систем. Вторая глава посвящена впервые выполненному построению вероятностных моделей снеговой, ветровой и крановой нагрузок с учетом фактора времени. Используются и сравниваются различные подходы к описанию нагрузок, предложены среднерайонные вероятностные характеристики снеговой и ветровой нагрузок для территории Украины, а также для нагрузок мостовых кранов. В третьей главе разработана оригинальная методика расчета стальных элементов на совместное действие нагрузок, представленных различными моделями. В четвертой главе на основе общих подходов разработана и оснащена программами расчета на ПЭВМ оценка надежности наименее изученных сжато-изогнутых элементов постоянного сечения и ступенчатых. В пятой главе рассматриваются особенности оценки надежности статически неопределимых систем. На основе логико-вероятностного метода и вероятностного метода предельного равновесия разработана методика вероятностного расчета таких систем, позволившая вскрыть и учесть резервы их несущей способности. В приложениях вынесены цифровые материалы и таблицы.

Приведенные в тексте числовые оценки надежности конструкций и численные примеры базируются на действующих в СНГ нормах проекти-

рования: СНиП II-23-80 «Стальные конструкции» [294] и СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» [295] (с ссылками на недавно введенные в Украине ДБН В.1.2 – 2006 «Нагрузки и воздействия» [89]).

Отдельные исследования, результаты которых приведены в монографии, выполнены под руководством автора с участием кандидатов технических наук В.А. Пашинского и А.В. Семко (ныне докторов технических наук), аспирантов Ю.А. Харченко и В.П. Чичулина (ныне кандидатов технических наук), а также Ю.П. Леванина, В.В. Плотникова и А.И. Нечипоренко.

Автор высказывает искреннюю благодарность доктору технических наук, профессору А.В. Перельмутеру за научное рецензирование и поддержку данной работы, особенно на заключительном этапе ее прохождения. Автор благодарен научным рецензентам монографии докторам технических наук, профессорам В.Н. Гордееву и С.Б. Усаковскому за внимательное рассмотрение рукописи книги и ценные замечания по ее содержанию.

Автор благодарен за помощь в подготовке монографии к изданию к.т.н. А.В. Махинько, к.п.н. Н.А. Демченко, к.т.н. Н.А. Махинько, аспирантам Ю.В. Дрижируку, Д.А. Баште.

Книга адресуется научным и инженерно-техническим работникам, аспирантам и магистрам и может быть использована в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся строительным специальностям.

*Автор*

## Глава 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Книги делаются из книг.*

**Ф. Вольтер, французский философ**

*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.*

**А.В. Перельмутер, доктор технических наук.**  
**«Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций», 2000 г.**

### 1.1. Эволюция общего подхода к оценке надежности строительных конструкций

Проблема надежности конструкций является составной частью науки о строительных конструкциях, объединяющей вопросы расчета, проектирования, изготовления, возведения и эксплуатации конструкций зданий и сооружений.

Научный подход к проблеме надежности конструкций требует использования вероятностных методов для анализа поведения конструкций при внешних воздействиях. Первые попытки такого подхода, которые появляются в отдельных публикациях 20–30-х гг. [139, 303], были развиты и впервые представлены Н.С. Стрелецким в виде основ статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений [304].



50-е гг. прошлого столетия отмечены введением методики проектирования конструкций по предельным состояниям, в разработке которой участвовали В.А. Балдин, А.А. Гвоздев, И.И. Гольденблат, Ю.М. Иванов, В.М. Келдыш, В.И. Коченев, Л.И. Онищик, Н.С. Стрелецкий, К.З. Таль и др. [13, 109]. Эта методика дала мощный импульс вероятностным исследованиям в области теории расчета сооружений, сформулировала по существу концепцию отказа строительной конструкции как перехода в предельное состояние, со всей очевидностью показала вероятностный характер как методики в целом, так и ее основных параметров (расчетных нагрузок и сопротивлений материалов) и коэффициентов перегрузки, однородности, сочетаний нагрузок и др. Методика получила признание и была принята в ряде зарубежных стран [153] и в других областях техники.

В дальнейшем вопросы совершенствования метода предельных состояний и развития вероятностных методов расчета строительных конструкций последовательно проводили Н.С. Стрелецкий [305–308], А.Р. Ржаницын [258–264].

Между тем в других областях техники, в том числе электронике, автоматике, а затем и в различных отраслях машиностроения, в течение последних 30–40 лет активно и успешно развиваются методы расчета, основанные на теории надежности. Назовем здесь труды В.В. Гнеденко, Ю.К. Беляева, А.Д. Соловьева [71], И.А. Ушакова [164], С.С. Серенсена, В.П. Когаева, Р.М. Шнейдеровича [276], работы в области надежности автоматики, вычислительной техники, радиотехники, баллистических ракет, судов и машин различного назначения А.И. Арасланова, В.И. Брауде и Л.Н. Семенова, Д.П. Волкова и С.Н. Николаева, Т.А. Голинкевича, Т.В. Дружинина, В.В. Екимова, Х.Б. Кордонского, А.А. Кузнецова, Б.Р. Левина, А.С. Проникова, Д.Н. Решетова, А.С. Иванова, В.З. Фадеева, Б.С. Сотскова, Д.И. Федорова, Б.А. Бондаровича и В.М. Перепопова, Я.Б. Шора и др. [10, 43, 73, 134, 140, 245, 257, 297, 337, 338, 369], а также некоторые из зарубежных работ: Р. Барлоу и Ф. Прошана, П. Беккера и Ф. Йенсена, К. Капура и Л. Ламберсона, К. Райншке, Дж. Эндрени и др. [20, 108, 254, 371].

Проблема сближения расчетов строительных конструкций с современными методами теории надежности успешно разрешена фундаментальными работами В.В. Болотина [35–41], который развил в специальный раздел строительной механики – статистическую динамику – вероятностный расчет конструкций с учетом фактора времени и особенностей работы при внешних воздействиях. Под руко-

водством В.В. Болотина был разработан и в 1990 г. введен ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения» [81], давший методологические основы единого подхода к вопросам надежности в разных областях техники, в том числе в строительстве.

Общие вопросы надежности и вероятностного расчета строительных конструкций изучались в работах А.А. Гвоздева, А.В. Геммерлинга, Б.Н. Кошутина, А.П. Кудзиса, О.В. Лузина, А.С. Лычева, В.А. Отставнова, Ю.А. Павлова, А.В. Перельмутера, Д.М. Подольского, В.Д. Райзера, Н.Н. Складнева, Б.И. Снарскиса, Ю.Д. Сухова, С.А. Тимашева, С.Б. Усаковского, Е.И. Федорова, А.А. Чираса, В.П. Чиркова и др. [68, 70, 121, 132, 148, 151, 177, 178, 180, 194, 237, 252, 281, 282, 293, 310, 316, 335, 341, 357, 360].

В разное время высказывались предложения по переходу целиком на вероятностный расчет строительных конструкций (Б.И. Беляев, А.Р. Ржаницын, С.А. Тимашев и др. [26, 28, 243, 256, 263]), однако поддержки они не получили. В качестве удачных примеров последовательного вероятностного подхода к отдельным реальным вопросам можно назвать разработанные в ЦНИИСК под рук. А.Я. Дривинга «Рекомендации по применению экономико-статистического метода при расчете сооружений с чисто экономической ответственностью» [91, 237] и систему управления качеством изготовления металлических конструкций, разработанную в Уральском Промстройпроекте под руководством С.А. Тимашева [256].

Принципиально важным поэтому является разработанный ЦНИИСК (В.Д. Райзер, А.А. Бать, В.А. Отставнов, Ю.Д. Сухов) и введенный в 1988 г. ГОСТ 27751-88 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету» [82], объединивший расчет надежности конструкций с методом предельных состояний. Этим нормативным документом *надежность строительного объекта определяется, как свойство выполнять заданные функции в течение требуемого промежутка времени*. Отказом конструкций является переход их в предельное состояние. Основное свойство, определяющее надежность строительных конструкций, – безотказность их работы – формулируется как способность сохранять заданные эксплуатационные качества, т. е. не переходить в запредельные состояния в течение определенного срока службы конструкции. Открывает интересные возможности совершенствования методики расчета конструкций определение трех расчетных ситуаций в работе: установившейся, переходной и аварий-

ной. В нашей книге мы будем опираться на терминологию, основные определения и понятия ГОСТ [81, 82].

Вопросы надежности металлоконструкций в различной постановке рассматривались рядом перечисленных выше ученых, а также В.А. Балдиным, Г.Е. Бельским, Е.В. Гороховым, И.Д. Грудевым, Н.П. Мельниковым, С.В. Орешкиным, В.А. Прицкером, Е.Н. Селезневой, А.В. Сильвестровым, Ю.В. Смирнягиным, В.Н. Шимановским и др. [14, 25, 28, 78, 83, 123, 157, 172, 192, 193, 194, 241, 242, 275, 278, 279, 289, 290, 367].

Для решения рассматриваемой в книге проблемы надежности полезен опыт исследований надежности железобетонных конструкций, зданий и сооружений и их оснований, освещенный в работах Л.С. Авиромы, А.Я. Барашикова, О.Г. Виноградова, В.Ю. Дубницкого, Н.Н. Ермолаева и В.В. Михеева, А.Я. Исайкина, М.М. Заставы, Б.М. Колотилкина, М.Б. Краковского, В.А. Никифорова, Б.Б. Ужполявичуса, Вл. П. Чиркова и др. [1, 15, 16, 58, 93, 101, 117, 127, 130, 168, 244, 330, 331, 363].

В связи с тем, что расчет надежности необходим как для вновь проектируемых зданий, так и для зданий эксплуатируемых, особенно при их реконструкции, важными являются вопросы эксплуатационной надежности, действительной работы и реконструкции зданий и сооружений со стальным каркасом. Эти вопросы рассматривались в работах Е.И. Белени, Г.И. Белого, В.Н. Валя, А.А. Васильева, В.Н. Гордеева, В.М. Горпинченко, Ю.А. Зданевича, А.И. Кикина, И.И. Крылова, В.А. Лимаренко, А.С. Никольского, В.Ф. Сабурова, М.М. Сахновского, В.Д. Сургучева, Б.Ю. Уварова, К.А. Шишова и др. [21, 23, 48, 49, 76, 78, 79, 99, 111, 131, 143, 144, 149, 193, 201, 202, 204, 206, 209, 214, 218, 221, 239, 272, 368].

Близко смыкаются с проблемой надежности методы и решения задач оптимизации конструкций, особенно по критериям надежности, которые разрабатывались П.В. Алявдиным, С.Х. Гайнуллиной, Э.М. Йеги, В.А. Пермьяковым, Ю.М. Почтманом, В.В. Трофимовичем, Л.Е. Харитон и др. [5, 64, 102, 240, 324].

За рубежом вопросы надежности конструкций разрабатывали Г. Аугусти, А. Баратта, Д.Р. Бенжамин, Р.М. Беннет, В. Вержбицкий, М. Ворличек, А.П. Джонсон, А.Д. Картер, М. Кастанета, Ф. Кашиати, С.А. Корнелл, Р. Леви, М. Майер, А.Г. Пабслей, М. Тихи, С. Треззо, И. Ферри-Боржес, А.М. Фрейденталь, М. Шинозука, А. Энг и др. [12, 153, 373, 374, 376, 377, 379, 384, 396, 417, 418].

Решение задач надежности базируется в основном на методах теории вероятности и математической статистики, в том числе теории распределений и корреляции случайных величин [50, 51, 52, 105, 110, 266, 287, 301], случайных процессов и их выбросов [29, 56, 95, 247, 248, 273], экстремумов [85], а также теории множеств и графов [22, 254, 277], логико-вероятностных методах [165, 268], теории расчета сложных систем [166, 314, 351]. Используются также некоторые специальные разделы высшей математики [61, 119], линейное программирование [356], алгоритмы и приемы программирования вероятностных задач для расчета на ЭВМ [57, 62].

Важным аспектом вероятностных методов является обоснованный выбор законов распределения случайных величин и ординат случайных процессов. Коротко остановимся на тех из них, которые будут использоваться в дальнейшем изложении.

Наиболее распространено в теории и практике вероятностных расчетов *нормальное распределение* (распределение Гаусса) [50, 287], имеющее плотность

$$f(x) = \frac{1}{\hat{X}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(X - \bar{X})^2}{2\hat{X}^2}\right]. \quad (1.1)$$

Здесь  $X$  – случайный аргумент;

$\bar{X}$  и  $\hat{X}$  – соответственно математическое ожидание и стандарт (среднеквадратичное отклонение) аргумента  $X$ .

Если вместо аргумента  $X$  учитывается нормированное отклонение от центра  $\gamma = (X - \bar{X}) / \hat{X}$ , то определяется нормированная плотность следующего вида:

$$f(\gamma) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \exp(-0,5\gamma^2). \quad (1.2)$$

С учетом этого интегральная функция нормального распределения будет

$$F(X) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \int_{-\infty}^X \exp(-0,5\gamma^2) d\gamma = \Phi(\gamma), \quad (1.3)$$

где  $\Phi(\gamma)$  – функция Лапласа, табулированная вместе с (1.2) в многочисленных статистических таблицах и приложениях [42, 179].

Распространенность нормального закона в задачах надежности связана с его относительной аналитической простотой и наличием

готовых таблиц, близким соответствием распределениям прочности материалов и некоторых нагрузок, асимптотическим стремлением к нормальному распределению суммы нескольких случайных величин с разными законами распределения.

Широко распространено в задачах надежности также *распределение Вейбулла*, имеющее следующие дифференциальную и интегральную функции распределения [10, 300]:

$$f(\gamma) = \frac{\beta}{\alpha} (X - \gamma)^{\beta-1} \exp\left[-\frac{(X - \gamma)^\beta}{\alpha}\right], \quad (1.4)$$

$$F(X) = 1 - \exp\left[-\frac{(X - \gamma)^\beta}{\alpha}\right], \quad (1.5)$$

где  $\gamma$  – параметр положения распределения; обычно  $\gamma = 0$ , тогда распределение возможно только при  $X \geq 0$ ;  $\alpha > 0$  – параметр масштаба, определяющий вытянутость распределения;  $\beta > 0$  – параметр формы, от которого зависит вид распределения (рис. 1.2); при  $\beta = 1$  распределение Вейбулла преобразуется в экспоненциальное распределение, при  $\beta = 2$  – в распределение Рэлея.

Математическое ожидание и дисперсия аргумента  $X$ , подчиняющегося распределению Вейбулла при  $\gamma = 0$ , определяются как

$$\bar{X} = \alpha^{1/\beta} \Gamma(1 + 1/\beta); \quad (1.6)$$

$$\widehat{X} = \alpha^{2/\beta} \left\{ \Gamma(1 + 2/\beta) - \left[ \Gamma(1 + 1/\beta) \right]^2 \right\}, \quad (1.7)$$

где  $\Gamma$  – гамма-функция вида

$$\Gamma(1 + p) = \int_0^\infty X^p e^{-x} dx, \quad (1.8)$$

определяемая численно или по таблицам [42, 119].

Формулы для определения асимметрии и эксцесса распределения Вейбулла приведены в [10, 300]. Для подбора этого распределения методом моментов необходимо располагать двумя первыми моментами, с использованием которых решается трансцендентное

уравнение, включающее гамма-функцию; можно также выполнять подбор по исходной выборке [252].

Распределение Вейбулла, являющееся предельным для минимальных значений, хорошо описывает хрупкое разрушение [37] и служит основой соответствующего подхода к задачам надежности [71, 300]

Статистика экстремальных (наибольших) значений располагает асимптотическими распределениями трех типов [85, 287], из которых для описания нагрузок используется закон I типа (или закон Гумбеля) – *двойное экспоненциальное распределение*, имеющее интегральную и дифференциальную функции вида

$$F(X) = \exp[-\exp(-y)], \quad (1.9)$$

$$f(X) = \alpha_n \exp(-y) \exp[-\exp(-y)]. \quad (1.10)$$

Здесь  $y = \alpha_n(X - u_n)$  – нормированное уклонение аргумента от моды;  $u_n = \bar{X}_n - 0,45005\hat{X}_n$  – характеристический экстремум;  $\alpha_n = \pi / (\sqrt{6}\hat{X}_n)$  – экстремальная интенсивность;  $\bar{X}_n, \hat{X}_n$  – соответственно выборочные среднее и стандарт совокупности из  $n$  членов.

Распределение Гумбеля табулировано в виде таблиц [85, 266], оно зависит от двух параметров  $u_n$  и  $\alpha_n$ , связанных со средним и стандартом; асимметрия и эксцесс распределения Гумбеля постоянны:  $S = 1,1396$ ;  $E = 2,4$ . Вид закона Гумбеля для наибольших значений иллюстрируется *рис. 3.5*. Данное распределение характерно для выборок экспоненциального типа, признаком которого является соблюдение (точно или асимптотически) соотношения

$$f(X)/[1 - F(X)] = -f'(X)/f(X). \quad (1.11)$$

Легко видеть, что это условие точно выполняется для экспоненциального распределения  $f(X) = \exp(-X)$  и асимптотически – для нормального, гамма-распределения и др. [85]. Экспоненциальность выборок, подчиненных некоторым другим законам, доказывается во второй главе данной книги.

Характеристический экстремум  $u_n$  является корнем уравнения

$$F(u_n) = (n - 1)/n, \quad (1.12)$$

показывающего, что в выборке из  $n$  наблюдений ожидаемое число величин, равных или больших  $u_n$ , равно 1. В выборках экспоненциального типа  $u_n$  асимптотически стремится к моде распределения экстремумов. Параметр  $\alpha_n$  определяется как интенсивность распределения  $\mu(X)$  (см. ниже формулу (2.25)) при значении аргумента, равном  $u_n$ :

$$\alpha_n = \mu(u_n) = f(u_n)/[1 - F(u_n)] = nf(u_n). \quad (1.13)$$

Отметим попутно, что величина, обратная  $\mu(X)$ , называется отношением Миллса, оно табулировано в сборниках вероятностных таблиц [179] и используется для определения вероятностей больших отклонений аргумента. Параметр  $\mu(X)$ , среди других, является как бы индикатором типа экстремального распределения – в зависимости от условия  $\mu(X) \geq f(X)/f(X)$  (табл. 4.1.6 [85]).

Связь  $u_n$  и  $\alpha_n$  с объемом выборки зависит от вида исходного распределения. Для нормального распределения Э. Гумбель [85] дает таблицы и достаточно громоздкие формулы. Для некоторых других распределений ниже в гл. 2 и приложении 2.3 приводятся соотношения и таблицы.

Распределение Гумбеля обладает устойчивостью, т. е. оно не изменяется при возведении в  $n$ -ю степень, смещаясь вдоль оси абсцисс на величину  $\ln n/\alpha_n$  [252, 263]:

$$F^n(X) = \exp[-\exp(-y + \ln n)]. \quad (1.14)$$

Это преимущество закона Гумбеля ценно, например, при экстраполяции экстремумов нагрузок (годовых, месячных и др.) на более длительный срок.

Как видно на *рис. 3.5*, экстремальное распределение Гумбеля по сравнению с нормальным распределением смещено влево, его мода находится на расстоянии  $-0,45 \widehat{X}$ , что соответствует положительной асимметрии  $S = 1,14$ . Оно более остроконечно, чем нормальное (эксцесс  $E = 2,4$ ).

Сопоставление хвостовых частей указанных распределений приведено на *рис. 3.6* на экстремальной шкале, где распределение Гумбеля описывается прямой, а нормальное – кривой, все более отклоняющейся к оси абсцисс с ростом аргумента. На *рис. 3.6* более отчетливо, чем при сопоставлении плотностей (*рис. 3.5*), видно, что распределение Гумбеля имеет «хвост», более вытянутый в сторону больших значений аргумента, чем нормальный закон.

В ряде случаев может применяться *логнормальное распределение*, полученное логарифмическим преобразованием нормального закона, которое имеет асимметричный характер и является асимптотическим для произведения случайных величин [10, 263, 301]. Полезным в применениях является также *распределение Грамма-Шарлье*, полученное путем корректировки нормального распределения на моменты 3-го и более порядков. Наряду с несомненными достоинствами это распределение, имея также бесконечные пределы, при некоторых значениях аргумента может принимать отрицательные значения и давать побочные экстремумы [110]. Достаточно широко в задачах надежности применяются *кривые Пирсона*, особенно III типа (гамма-распределение) [110, 300]. Для практических решений конкретных вопросов могут оказаться полезными распределение Крицкого-Менкеля, полученное степенным преобразованием кривой Пирсона III типа [163], распределение Гриневича на основе закона Вейбулла [65], усеченные распределения [298], линейные комбинации нормальных [338], вейбулловских [350] и других законов.

Несмотря на многочисленность стохастических распределений, только частично перечисленных выше, актуальным остается вопрос о выборе закона для многовершинных распределений, например, снеговой нагрузки. В связи с этим было обосновано применение полиномиально-экспоненциального распределения (2.140), подробно рассмотренного ниже в главе 2.

При использовании вероятностных моделей на основе стационарных случайных процессов широко применяются формулы частоты выбросов процессов за постоянный уровень [37, 273, 321]:

$$v_+(X) = Wf(X) = f_x(X) \int_0^{\infty} f_v(V) V dV, \quad (1.15)$$

где  $X$  – ордината случайного процесса;  $V$  – скорость изменения ординаты (первая производная случайного процесса);  $f_x(X)$ ,  $f_v(V)$  – плотности распределения соответственно ординаты и скорости;  $W$  – половина первого абсолютного момента распределения производной, или математическое ожидание положительной производной процесса [263].

При нормальном распределении ординаты из формулы (1.15) получается известная формула Райса [37, 273]:



ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>Глава 1. ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....</b>	<b>7</b>
1.1. Эволюция общего подхода к оценке надежности строительных конструкций.....	7
1.2. Результаты изучения нагрузок и их сочетаний .....	16
1.3. Анализ расчета надежности стальных элементов .....	30
1.4. Обзор методов оценки надежности конструктивных систем .....	35
1.5. Выводы по главе .....	38
<b>Глава 2. ВЕРОЯТНОСТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НАГРУЗОК .....</b>	<b>41</b>
2.1. Общая форма представления нагрузок (ОФПН) .....	42
2.2. Вероятностные модели крановой нагрузки .....	52
2.3. Математические модели ветровой нагрузки.....	87
2.4. Математические модели снеговой нагрузки.....	105
2.5. Выводы по главе .....	128
<b>Глава 3. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНЫХ НАГРУЗОК.....</b>	<b>130</b>
3.1. Общий подход к задаче надежности элементов, нагруженных несколькими нагрузками.....	130
3.2. Частотные характеристики сочетания нагрузок, изменяю- щихся во времени .....	134
3.3. Плотность распределения суммы нагрузок .....	156
3.4. Надежность элементов при воздействии нагрузок, представ- ленных в виде случайных величин .....	180
3.5. Оценка надежности элементов, нагруженных одной случай- ной нагрузкой.....	201
3.6. Особенности учета сочетаний нагрузок, представленных в различной форме .....	212
3.7. Определение коэффициентов сочетаний усилий при дейст- вии снеговой, ветровой и крановой нагрузок.....	215
3.8. Выводы по главе .....	217
<b>Глава 4. НАДЕЖНОСТЬ СТАЛЬНЫХ СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ .....</b>	<b>220</b>
4.1. Особенности вероятностного расчета сжато-изогнутых стержней .....	220
4.2. Надежность стальных сжато-изогнутых элементов постоян- ного сечения.....	227
4.3. Особенности расчета надежности ступенчатых стоек.....	240
4.4. Оценка надежности упругих сжато-изогнутых стержней, построенная на основе метода Ритца .....	256
4.5. Надежность упругопластических сжато-изогнутых стержней ..	277
4.6. Расчеты надежности стальных колонн.....	285
4.7. Выводы по главе .....	295
<b>Глава 5. НАДЕЖНОСТЬ СТАЛЬНЫХ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....</b>	<b>297</b>
5.1. Сравнение методов оценки надежности статически неопре- делимых конструкций .....	297

5.2. Применение логико-вероятностных методов для оценки надежности статически неопределимых конструкций.....	322
5.3. Расчет стальных рам вероятностным методом предельного равновесия (ВМПР) .....	342
5.4. Оценка резервов несущей способности стальных рам производственных зданий .....	359
5.5. Выводы по главе .....	371
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>373</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>375</b>
Приложение 1. Данные по нагрузкам мостовых кранов .....	375
Приложение 2.1. Оценка обеспеченности моделей нагрузок .....	378
Приложение 2.2. Параметры распределения Вейбулла для месячных выборок ветровых нагрузок .....	381
Приложение 2.3. Экстремальные параметры атмосферных нагрузок .....	382
Приложение 3.1. Вычисление коэффициента сочетания постоянной нагрузки от многослойной кровли .....	384
Приложение 3.2. Оценка надежности стальных элементов, загруженных крановой нагрузкой.....	385
Приложение 3.3. Оценка надежности стропильных балок .....	387
Приложение 3.4. Оценка надежности стальных элементов, воспринимающих постоянную и ветровую нагрузки.....	388
Приложение 4.1. Расчет надежности ступенчатой стойки.....	389
Приложение 5.1. Числовые расчеты систем.....	397
Приложение 5.2. Расчет рам вероятностным методом предельного равновесия .....	407
Приложение 5.3. Логико-вероятностный анализ надежности ЧС .....	416
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>426</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>448</b>

## TABLE OF CONTENTS

<b>Preface.....</b>	<b>3</b>
<b>Chapter 1. Revision of structure reliability researches .....</b>	<b>7</b>
1.1. Evolution of general approach to structure reliability estimation.....	7
1.2. Load research results and their combinations.....	16
1.3. Analysis of steel element reliability estimation.....	30
1.4. Review of estimation methods for structures system reliability.....	35
1.5. Chapter conclusions .....	38
<b>Chapter 2. Probabilistic description of loads .....</b>	<b>41</b>
2.1. General form of load presentation (GFLP) .....	42
2.2. Probabilistic models of bridge crane load .....	52
2.3. Mathematical models of wind load .....	87
2.4. Mathematical models of snow load.....	105
2.5. Chapter conclusions .....	128
<b>Chapter 3. Reliability of elements under variable loads.....</b>	<b>130</b>
3.1. General approach to reliability estimation for elements under several loads .....	130
3.2. Frequency characteristics of joint time variable loads .....	134

3.3. Density distribution of load sum .....	156
3.4. Reliability of elements under loads in the form of random value .....	180
3.5. Reliability of elements under one random load.....	201
3.6. Peculiarities of different load combinations.....	212
3.7. Determination of combination coefficients under snow, wind and crane loads .....	215
3.8. Chapter conclusions .....	217
<b>Chapter 4. Reliability of steel beam-column elements.....</b>	<b>220</b>
4.1. Probabilistic calculation peculiarities of beam-column bearing rods.....	220
4.2. Reliability of steel beam-column elements of constant section.....	227
4.3. Reliability calculation peculiarities of stepped columns .....	240
4.4. Reliability estimation of elastic beam-column bearing rods on the basis of Rits's method .....	256
4.5. Reliability of elastic-plastic beam-column bearing rods .....	277
4.6. Reliability analysis of steel beam-column .....	285
4.7. Chapter conclusions .....	295
<b>Chapter 5. Reliability of steel redundant structures.....</b>	<b>297</b>
5.1. Comparison of reliability estimation methods for redundant structures .....	297
5.2. Utilisation of logical-probabilistic methods for reliability estimation of redundant structures .....	322
5.3. Steel frame analysis by means of probabilistic method of limit equilibrium (PMLE).....	342
5.4. Estimation of load carrying capacity reserve of industrial building steel frames .....	359
5.5. Chapter conclusions .....	371
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>426</b>
<b>APPENDIX .....</b>	<b>448</b>
Appendix 1. Crane load data .....	375
Appendix 2.1. Estimation of load model provision .....	378
Appendix 2.2. Weibull's distribution parameters for month extracts of wind loads .....	381
Appendix 2.3. Extreme parameters of atmospheric loads.....	382
Appendix 3.1. Estimation of composition coefficient of dead load for multi-layer roof .....	384
Appendix 3.2. Reliability estimation of steel elements under crane load .....	385
Appendix 3.3. Reliability estimation of roof beams .....	387
Appendix 3.4. Reliability estimation of steel elements under dead and wind loads .....	388
Appendix 4.1. Reliability estimation of stepped column .....	389
Appendix 5.1. Numeric analysis of systems .....	397
Appendix 5.2. Frame analysis by means of probabilistic method of limit equilibrium .....	407
Appendix 5.3. Logical-probabilistic analysis of redundant structures (RS).....	416
<b>REFERENCES .....</b>	<b>426</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>448</b>

Учебное издание

**Сергей Фёдорович Пичугин**

**НАДЕЖНОСТЬ  
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
ЗДАНИЙ**

**RELIABILITY  
OF INDUSTRIAL BUILDING  
STEEL STRUCTURES**

Компьютерная верстка: *Е.М. Лютова*

Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*

Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.

Подписано к печати 10.12.09. Формат 60х90/16.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Усл. 28,5 п.л. 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](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>