

Оглавление

Введение	6
Глава 1. ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ	7
1.1. История развития методов расчета конструкций	7
1.2. Развитие принципа коэффициента запаса	10
1.3. Концепция необходимости анализа предельного состояния	11
Глава 2. НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ, НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ.....	14
2.1. Положения основных законодательных и нормативных документов в области нормирования надежности, несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций.....	14
2.2. Граничное неравенство для предельных состояний первой группы.....	19
2.3. Переменные и параметры граничного неравенства как случайное явление. Вероятностные свойства переменных и параметров граничного неравенства.....	21
2.4. Граничное неравенство для предельных состояний второй группы	30
2.5. Особые предельные состояния.....	32
Глава 3. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ	34
3.1. Место нагрузок и воздействий в расчетах конструкций.....	34
3.2. Нагрузки как форма взаимодействия с внешней средой	35
3.3. Классификация нагрузок и воздействий	36
3.4. Основные виды нагрузок	37
3.4.1. Вес конструкций и грунтов.....	37
3.4.2. Нагрузки от оборудования, людей, животных, складированных материалов и изделий, транспортных средств	38
3.4.3. Нагрузки от транспортных средств	41
3.4.4. Атмосферные воздействия.....	42
3.4.4.1. Снеговые нагрузки	44
3.4.4.2. Воздействия ветра.....	51
3.4.4.3. Температурные климатические воздействия.....	61
3.4.4.4. Гололедная нагрузка	64
3.5. Крановые нагрузки	65
3.6. Особые воздействия	68
3.6.1. Сейсмические воздействия.....	68
3.6.2. Воздействия пожара	71
3.6.3. Воздействия взрыва.....	72
3.6.4. Особый режим работы несущих систем с учетом отказа несущих конструкций вследствие внешнего воздействия или аварии.....	74
3.7. Совместное действие различных нагрузок	77
3.8. Прогибы и перемещения	79
3.9. Особенности нормирования нагрузок и воздействий для высотных и уникальных зданий	82
Глава 4. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	89
4.1. Критериальные характеристики конструкционных материалов	89
4.2. Разброс нормируемых показателей	95

Глава 5. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ	101
5.1. Стальные конструкции	101
5.2. Железобетонные конструкции	103
5.3. Каменные конструкции.....	108
5.4. Деревянные конструкции	112
Глава 6. РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ НЕСУЩИХ СИСТЕМ И КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	114
6.1. Несущие системы зданий и сооружений	115
6.1.1. Каркасные конструктивные системы	115
6.1.2. Стеновые конструктивные системы.....	120
6.1.3. Конструктивные системы с изменяющейся по высоте схемой конструкций.....	120
6.2. Виды несущих систем по типам конструктивных решений.....	122
6.3. Особенности несущих систем	129
6.4. Расчетная модель несущей системы.....	131
6.5. Модель материала	136
6.6. Модель нагрузки	137
6.7. Конструктивная поправка как оценка расчетной модели.....	137
6.8. Расчетная модель внешних связей несущей системы	139
6.9. Расчетные ситуации для обоснования надежности, несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций.....	139
6.10. Предельные состояния в жизненном цикле строительного объекта	140
6.11. Основные технологии расчетного анализа	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	145
Библиографический список	146

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с конституционными приоритетами Российской Федерации результат деятельности в области строительства (объект строительства) должен обеспечивать защиту жизни и здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества. Реализация прав граждан и организаций обеспечивается проектными и технологическими решениями, принятыми при проектировании и возведении объектов строительства, в рамках которых решается важнейшая задача расчета прочности и устойчивости конструкций и несущих систем зданий и сооружений в целом.

Общие принципы расчета строительных конструкций имеют большую историю — от проверки конструкций методом «прямого» эксперимента (т.е. нагружалась выполненная в натуре конструкция) до детального научного исследования напряженно-деформированного состояния конструкций и узлов с их анализом по различным критериям.

В рамках курса «Теория расчета и проектирования» рассматриваются общие теоретические основы, на базе которых разрабатывается прогноз поведения конструкций при воздействиях различного рода. Для оценки поведения конструкции используется система критериев, что также является предметом настоящего курса.

Глава 1. ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. История развития методов расчета конструкций

Задача прогноза прочности и устойчивости конструкций и сооружений является одной из важнейших в строительном деле. На начальных этапах развития строительства задача прогноза не имела теоретического решения, и оценка работоспособности конструкций решалась методом «прямого» эксперимента, т.е. нагружалась выполненная в натуре конструкция и наблюдался эффект такого нагружения. На следующем этапе широкое распространение получил метод физического эксперимента с использованием моделей конструкций. При этом вопрос корректного моделирования воздействия в рамках такого эксперимента, а также соблюдение условий подобия модели и моделируемой конструкции определяли качество прогноза.

Теоретические основы расчета конструкций сформулированы в методах строительной механики, с появлением которой стало возможным становление правил проектирования сооружений. Подход к проблеме принадлежит Клоду Луи Навье (1785–1836), который выбрал путь изучения действительной работы сооружения под нагрузкой и расчета по рабочему состоянию. При этом подходе следовало изучить напряжения рабочего состояния и найти их отношения к разрушающим напряжениям.

Очевидно, что допустимые напряжения должны быть значительно меньшими, чем разрушающие. Сопротивления разрушению, по словам Анри Навье, недостаточно для проектирования, поскольку нужно знать не разрушающую силу, а ту, которой можно загрузить элемент без того, чтобы возникающие в нем переменные возрастали со временем. Стальная балка разрушается при напряжении 4000 кгс/см^2 . Навье предлагает при изгибе принимать допускаемое напряжение равным 1300 кгс/см^2 . Так возникло направление расчета конструкций, основанное на теории наибольших напряжений.

В рамках теории наибольших напряжений расчет конструкции сводится к сравнению действительных рабочих напряжений с допускаемыми напряжениями, т.е. проблема сводилась к требованию, чтобы для любого волокна конструкции выполнялось неравенство $k\sigma \leq \sigma_d$, где σ_d — допускаемое напряжение, σ — напряжение в волокне, определяемое методами строительной механики, k — коэффициент запаса. По этой причине расчет по рабочему состоянию часто называют расчетом по допускаемым напряжениям.

Развитие механики (сопротивление материалов, строительная механика, теория упругости) позволило расчетом определить прогноз напряжений в конструкции и ее элементах от действия нагружающего фактора, что сформировало идею использования критериев напряжений в прогнозе работоспособности конструкции. Метод расчета строительных конструкций по допускаемым напряжениям был разработан еще в начале XIX в. вслед за методом расчета по предельному равновесию.

Такой подход в общем виде можно представить как отношение

$$S \leq R, \quad (1.1)$$

где S — напряжения в конструкции и ее элементах от действия нагружающего фактора;
 R — сопротивление конструкции, выраженное в тех же единицах, что и величина S .

Таким образом, возникла необходимость определить величину второго критерия в соотношении прогноза работоспособности — сопротивление конструкции. Очевидно, величина R зависит от материала, из которого выполнена конструкция, что позволяет на основе исследований конструкционных материалов получить характерные константы, определяющие их прочностные свойства (предел прочности), которые можно выразить в единицах, соответствующих единицам измерения напряжений.

Отметим, что величина допускаемых напряжений имеет смысл только при *пропорциональности между действующей нагрузкой и напряжениями вплоть до разрушения*, а это, как известно, в строительных конструкциях имеет место лишь в редких случаях. Метод расчета по допускаемым напряжениям предполагает гипотетическое упругое тело, игнорирует пластические свойства строительных материалов и недостаточно полно учитывает действительные условия работы конструкций под нагрузкой. Поэтому данный метод не дает и не может дать правильной оценки несущей способности строительных конструкций. Более того, метод допускаемых напряжений пришел в противоречие с результатами исследований.

В течение первой половины XX в. величины допускаемых напряжений для отдельных видов конструкционных материалов (например для стали) повысились в два раза. Но этот показатель относится к конструктивным элементам в целом. Однако уточненный расчетный анализ выявляет значительные «всплески» напряжений в отдельных локальных зонах конструкции (например в приопорных зонах раскосов стальных ферм), что по формальным признакам должно приводить к отказу (разрушению) конструкции. При этом практика эксплуатации стальных ферм, рассчитанных по допускаемым напряжениям для элементов конструкции в целом, свидетельствует о работоспособности таких ферм. Таким образом, расчетные величины наибольшего напряжения не являются критерием прочности сооружения.

В качестве модели разрушения зачастую рассматривался случай перехода конструкционного материала в пластическое состояние, что наглядно проявляется при испытаниях стали (см. диаграмму Прандтля для сталей). В конце XIX в. было высказано предположение, что переход материала в пластическое состояние связан с достижением удельной потенциальной энергии некоторого предельного значения. Эта идея была положена в основу теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения фон Мизеса.

Однако приведенное выше предположение о критериях перехода материала в пластическое состояние не получило экспериментального подтверждения. Было замечено, что при гидростатическом сжатии в теле накапливается большое количество потенциальной энергии, а материал не переходит в пластическое состояние.

Впоследствии было сделано предположение, что материал переходит в пластическое состояние после того, как предельного значения достигает не вся потенциальная энергия, а только та ее часть, которая обусловлена изменением формы тела. Это предположение и было положено в основу рассматриваемой теории, называемой часто теорией энергии формоизменения.

Согласно теории течение материала (т.е. пластическое деформирование) начинается в тот момент, когда в какой-либо точке тела удельная энергия изменения формы достигает предельного значения, вполне определенного для каждого материала. Элемент и образец из того же материала, подвергнутый осевому растяжению, будут равноопасны, если удельная потенциальная энергия изменения формы в рассматриваемом элементе равна удельной потенциальной энергии изменения формы в образце.

Теория прочности энергии формоизменения устанавливает *начало течения, а не разрушения материала*. Поэтому она неприменима для хрупких материалов. Эта теория, как показывают опыты, дает хорошие результаты для пластических материалов, *одинаково работающих на растяжение и сжатие*. Для материалов, имеющих различные пределы текучести при растяжении и сжатии, данная теория опытами не подтверждается.

Исследования конструкционных материалов показали, что существует зависимость касательных напряжений материала от величины нормальных напряжений. Теория, описывающая указанную зависимость, названа в честь Шарля Огюстена де Кулона и Отто Кристиана Мора — теория Кулона — Мора. В основе ее лежит гипотеза Мора о зависимости предельных касательных напряжений от среднего нормального напряжения и гипотеза Кулона о том, что названная зависимость обусловлена внутренним трением в твердом теле.

Теория связывает предельные касательные и нормальные напряжения. При этом принимается, что прочность тел практически не зависит от величины промежуточного напряжения σ_2 .

Теория Кулона основывается на предположении о том, что прочность тела на сдвиг по данной площадке равна сумме величины сцепления τ_c и нормального напряжения σ с учетом угла внутреннего трения φ : $\tau = \tau_c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$. Основное положение теории прочности Мора заключается в том, что разрушение тела обусловлено совместным действием нормальных и касательных напряжений. Эти напряжения взаимосвязаны и могут быть рассчитаны методом сложения векторов и представлены с помощью соответствующих кругов предельных напряжений. Каждому частному значению напряженного состояния соответствует свой круг напряжений. Таким образом, можно построить целое семейство кругов напряжений, построенных для различных случаев предельного напряженного состояния горной породы. Кривая, огибающая круги предельных напряжений, называется *оггибающей Мора*, или *паспортом прочности*. Эта огибающая представляет собой совокупность точек, характеризующих предельное напряженное состояние конструкционного материала.

Расчет по приведенным выше теориям прочности (по допускаемым напряжениям) во многих случаях стал препятствовать развитию строительной техники. Он приводил к тому, что, несмотря на углубление знаний о работе сооружений, уменьшение коэффициентов запаса, а следовательно, облегчение и удешевление конструкций в ряде случаев (вопреки развитию теории расчета) оказывалось невозможным. Более того, в отдельных случаях расчет по допускаемым напряжениям указывал на необходимость усиления конструкций, несмотря на то, что они благополучно существовали в течение многих лет.

Так произошло, например, с безбалочными железобетонными перекрытиями. Еще в начале XX в. чисто экспериментальным путем были установлены размеры этих перекрытий. В 20-х гг. немецкие специалисты дали расчет перекрытий, основанный на теории упругости, который привел почти к полуторному утяжелению перекрытий, что указывает на неправильность рассмотрения конструкций железобетонных безбалочных перекрытий как конструкций, изготовленных из идеально упругого материала.

Недостатки метода допускаемых напряжений и других феноменологических методов были осознаны уже давно, в связи с чем появился ряд работ, в которых предлагался иной подход к расчету строительных конструкций на прочность и устойчивость, с более правильным учетом физических свойств материалов и *действительной работы конструкций в стадии разрушения*, т.е. по разрушающим (предельным) нагрузкам.

Отличием методики расчета по разрушающим (предельным) нагрузкам от метода допускаемых напряжений являются значительно более широкое использование данных экспериментальных исследований, обобщение опыта строительства и учет пластических форм деформирования материалов конструкций. Расчетные приемы такого метода основаны на анализе фактических свойств строительных материалов и условий работы конструкций. Все это привело к переходу от метода расчета по допускаемым напряжениям к методу расчета по разрушающим усилиям:

$$P \leq [P], \quad (1.2)$$

где P — действующие усилия;

$[P]$ — разрушающие усилия.

Концепция метода расчета по разрушающим усилиям впервые была разработана в СССР и представлена в 1938 г. для расчетного обоснования железобетонных конструкций. Это было связано с тем, что железобетон является композитным материалом, основная составляющая которого — бетон — обладает выраженными анизотропными свойствами: прочность бетона на сжатие на порядок превышает прочность на растяжение. Арматура,

входящая в состав железобетона в объемах 1–5 %, компенсирует малое сопротивление бетона растяжению, что обеспечивает общее сопротивление железобетонной конструкции достаточно большим нагрузкам при наличии трещин в бетоне (т.е. при формальном разрушении бетона в растянутой зоне).

Основные принципы расчета железобетонных конструкций по разрушающим усилиям сформулированы А.Ф. Лолейтом на основе выполненных обширных экспериментальных исследований. Впоследствии метод расчета был обобщен и получил дальнейшее развитие в работах научного коллектива, возглавляемого А.А. Гвоздевым, что позволило в результате создать стройную теорию расчета железобетонных конструкций по стадии разрушения.

Для каменных конструкций, материал которых также является анизотропным, разработка метода расчета по разрушающим усилиям выполнена под руководством Л.И. Онищика. Метод расчета был дополнен по результатам работ С.А. Семенцова и других исследователей, что позволило сформировать эффективную теорию расчета каменных конструкций для условий осевого и внецентренного сжатия.

На основе работ Н.С. Стрелецкого по изучению проведения стальных конструкций в упругопластической стадии сформулирован и обоснован метод расчета стальных конструкций по разрушающим усилиям.

1.2. Развитие принципа коэффициента запаса

Введенное еще Анри Навье понятие коэффициента запаса для практически мыслящих инженеров не вызывало никаких возражений. Было понятно, что наши знания ограничены и что от этого незнания следует каким-то образом защититься, увеличив, например, значение ожидаемой нагрузки или имея запас по напряжениям. Как реализовать такой запас, путем ли применения каких-то добавок Δq к нагрузке (расчет на $q + \Delta q$) или использования множителя $k > 1,0$ (расчет на kq), тоже не вызывало вопросов, поскольку фиксированная добавка приводила к различным последствиям при малых и больших значениях q .

Для линейных систем умножение нагрузки на коэффициент запаса или деление величины допускаемого напряжения на тот же коэффициент приводило к одинаковым результатам. Поэтому испытания до разрушения, на основе которых верифицировались значения коэффициентов запаса, использовали возрастающую нагрузку. Но были и другие подходы, где коэффициент запаса связывался не с ростом нагрузки, а с варьированием физических параметров, определяющих сопротивление.

Например, в случаях, когда изменчивость нагрузки существенно ниже изменчивости материала (допустим, во время анализа работы грунтового массива), при оценке коэффициента запаса логичнее варьировать не нагрузку, а сопротивление.

Рассматривая вопрос о коэффициенте запаса, следует всегда добавлять, по отношению к чему введен этот коэффициент. Ведь в основе самого принципа введения некоторых запасов лежит неуверенность в точности нашего знания обстановки. Если бы максимальная нагрузка была известна абсолютно точно и абсолютно точно было известно сопротивление, которое может оказать конструкция, то вводить запас было бы не нужно. Не зря коэффициент запаса часто называли коэффициентом незнания.

Отметим, что коэффициент запаса учитывает только *общие факторы*, и то лишь *при статической нагрузке*. Учет других факторов, влияющих на оценку неразрушимости, выполнялся либо за счет изменения коэффициента запаса (например, он мог быть различным для разных вариантов действующей нагрузки), либо за счет введения дополнительных коэффициентов (коэффициент динамичности, коэффициент продольного изгиба и т.п.). Этими фактами, давно известными инженерам, по существу, рушилась концепция единого коэффициента запаса, влияющего лишь на установление допускаемого напряже-

ния для рассматриваемого материала. На такую особенность обратил внимание Н.С. Стрелецкий, который, по-видимому, первым проанализировал каноническую структуру коэффициента запаса в виде произведения компонент, каждая из которых является ответственной за тот или иной расчетный фактор:

$$k = k_1 k_2 \dots k_n = \prod k_i. \quad (1.3)$$

Каждый коэффициент k_i представляет собой отношение некоторой переменной величины к его значению, принятому в качестве единицы сравнения. В частности, это может быть отношение сжимающей силы к критической силе (коэффициент продольного изгиба), отношение динамического перемещения к статическому (динамический коэффициент), отношение действующей нагрузки к разрушающей (коэффициент запаса по нагрузке) и т.п.

В 1944 г. И.И. Гольденблат предложил заменить единый коэффициент запаса прочности системой коэффициентов перегрузки и коэффициентов качества материалов. Эта идея послужила значительным толчком в деле разработки единой методики расчета строительных конструкций из всех материалов в условиях воздействий различного вида.

В развитие уравнения (1.3) было внесено предложение использовать три группы коэффициентов:

- 1) зависящая от режима нагружения;
- 2) зависящая от состояния конструкции;
- 3) условностей расчета.

Существенным здесь является лишь то, что такие группы независимы друг от друга. Это давало возможность самостоятельного изучения каждой группы закономерностей, входящих в нее коэффициентов, статистического анализа экспериментальных данных и вычисления на вероятностной основе рекомендуемых значений соответствующих коэффициентов (в современной терминологии — коэффициентов надежности по материалу и по нагрузке).

Поскольку единый коэффициент запаса, учитывающий одновременно изменчивость нагрузки и свойств материалов, а также точность расчетных схем и многообразные условия работы, не мог быть объективным критерием надежности конструкций, от идеи единого коэффициента запаса отказались. Тем не менее нельзя отрицать практического значения коэффициента запаса в реальном проектировании, так как это наиболее простой и доступный вид оценки эффективности конструктивного решения. Практически через коэффициент запаса обычно оценивают и результаты испытаний.

1.3. Концепция необходимости анализа предельного состояния

Начало науки о прочности, заложенное Галилеем еще в XVII в., было связано с постановкой вопроса о разрушающей нагрузке. Определение разрушающей нагрузки являлось предметом исследований еще около столетия. Немногочисленные эксперименты того времени ставились с единственной целью — найти значение разрушающей нагрузки и форму разрушения, на угадывание такой формы были направлены и выдвигавшиеся теоретические (чаще всего умозрительные) положения. Сегодня мы бы сказали, что строительная наука того времени была направлена на анализ предельного состояния конструкции, и в качестве предельного состояния мыслилось состояние разрушения.

Переход к расчетам по предельному усилию (А.Ф. Лоллейт) увеличил интерес к изучению состояния конструкции в режиме разрушения, т.е. предельного состояния. Важно, что упомянутый переход сопровождался идеей рассмотрения возможного сопротивления конструктивного элемента (предельного усилия) в состоянии, когда он работает за пределами упругости, хотя такое сопротивление и сопоставлялось с внутренними усили-

ями, найденными из упругого расчета системы в целом. Этот факт свидетельствовал об определенной условности расчета по предельным усилиям.

Преимуществом расчета по предельным усилиям, как указывал А.Ф. Лоллейт в докладе «Пересмотр теории железобетона», было то, что рассмотрение сооружения в момент, непосредственно предшествующий обрушению, с теоретической точки зрения представляет то удобство, что избавляет нас от необходимости делать какие бы то ни было новые предложения сверх тех, на которых основаны обычные выводы строительной техники.

Пришедший на смену подходу к проверке прочности по разрушающей нагрузке (и развивающий этот подход) метод расчетных предельных состояний уже в самом начале своего развития был ориентирован на анализ несущей способности. Но прочность — не единственное качество, определяющее пригодность конструктивного решения, и вряд ли правильно проектировать конструкцию на основании какой-то одной проверки.

Даже для сравнительно простых конструкций вариантов работы каждого элемента может быть очень много, и для разных случаев (позже их стали называть расчетными ситуациями) требуется проверить различные параметры механического поведения (прочность, устойчивость, жесткость и др.).

Наконец, важными условиями для конструктивного решения могут быть не только механические свойства конструкции. Предъявляются требования по удобству использования, огнезащищенности, доступности для обслуживания и пр. Иными словами, предельные состояния представляют собой идеализацию нежелательных событий или явлений.

Постепенно выработалось положение, что в качестве обобщенной характеристики предельного состояния может выступать состояние прекращения эксплуатации сооружения. Такой критерий является более общим, поскольку помимо опасности разрушения учитываются такие характеристики, как назначение, условия и продолжительность эксплуатации, экономические соображения и др.

Невозможность или затруднение эксплуатации стали, в конце концов, характеристиками, с которыми связали два основных предельных состояния. Естественно, что они были детализированы в терминах расчетной оценки, зафиксированной в нормах проектирования.

Метод расчетных предельных состояний, пришедший на смену методу расчета по разрушающим нагрузкам, сохранил его некоторые черты, а именно ориентацию на использование критерия предельной несущей способности при учете неупругого поведения конструкции. При этом из множества состояний конструкции за время ее жизненного цикла выбираются лишь критичные (предельные), по отношению к которым формулируются расчетные требования.

В методе предельных состояний произошла замена общего коэффициента запаса на произведение частных коэффициентов, и поэтому в Еврокодах, как и в других зарубежных публикациях, метод расчетных предельных состояний фигурирует под названием *метод частных коэффициентов надежности*. Два названия отражают наиболее существенные стороны метода, при этом каждая из этих сторон имеет определенную независимость.

Если рассматривать этот 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.

Новый метод расчета конструкций был предложен и обоснован комиссией специалистов в составе: М.В. Келдыша (председатель), И.И. Гольденבלата, Ю.М. Иванова, В.М. Коченова, Л.И. Онищика, Н.С. Стрелецкого, К.Э. Таля. Этой же комиссией разработаны на базе нового метода расчета нормы проектирования конструкций (стальных, деревянных, бетонных и железобетонных, каменных и армокаменных).

Важнейшим отличием нового метода расчета от всех предшествующих является введение понятия — *предельное состояние конструкции*. Предложено несколько видов предельных состояний, характеризующих такие состояния конструкций, которые «в преде-

ле» могут быть допущены. Каждое предельное состояние имеет систему признаков, позволяющих однозначно оценивать соответствие конструкции установленным предельным характеристикам. Такие характеристики являются критериями предельных состояний. В соответствии с указанным выше новый метод расчета получил название *метод расчета конструкций по предельным состояниям*.

Неотъемлемой частью нового метода является идея использования системы расчетных коэффициентов — надежности по нагрузке, по материалу, условий работы (учитывают специфику работы конструкции или ее элементов / узлов), надежности по ответственности. Такой подход позволяет отдельно учитывать особенности формирования характеристического показателя любой составляющей, формирующей общую оценку работоспособности конструкций, что представляется вполне корректным, — свойства материала являются независимыми от условий формирования нагрузки и т.д.

Использование в методе расчета по предельным состояниям системы отдельных расчетных коэффициентов стало основанием для наименования метода в рамках единых европейских строительных норм — *метод частных коэффициентов надежности*.

Метод расчетных предельных состояний был введен в СССР в качестве руководящего принципа расчетов строительных конструкций с 1 января 1955 г. при утверждении первого издания строительных норм и правил. В дальнейшем расчет по предельным состояниям завоевал широкое признание во всем мире и в настоящее время положен в основу стандартов ИСО и системы Еврокодов.

Глава 2. НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ, НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

Введенный в нормы проектирования более 60 лет назад метод расчетных предельных состояний до сих пор сохранил свои принципиальные особенности, хотя за это время и получил некоторое развитие главным образом за счет уточнения формулировок и значений коэффициентов надежности.

По результатам развития общей теории расчета конструкций сформулировано следующее: основным показателем надежности строительных объектов является невозможность превышения предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы. Такое требование должно выполняться на всех этапах жизненного цикла и проверяться в следующих расчетных ситуациях:

1) *установившихся* — это ситуации, имеющие продолжительность, близкую к сроку службы строительного объекта (например эксплуатация между двумя капитальными ремонтами или изменениями технологического процесса);

2) *переходных* — это ситуации, имеющие небольшую по сравнению со сроком службы строительного объекта продолжительность (например изготовление, транспортирование, монтаж, капитальный ремонт и реконструкция строительного объекта);

3) *аварийных* — это ситуации, соответствующие исключительным условиям работы сооружения (в том числе и при особых воздействиях), которые могут привести к существенным социальным, экологическим и экономическим потерям.

Оценка предельного состояния на основе критериев эксплуатационной пригодности существенно видоизменила подход к установлению правил проектирования, зафиксированных в соответствующих нормах. Понадобилось установить связь между фиксируемыми в расчетах характеристиками сооружения (перемещения, внутренние усилия, напряжения, критические состояния по устойчивости и т.п.) с требованиями эксплуатационного типа. И лишь тогда, когда такие связи были названы (точно или приближенно), можно было сказать, что предельное состояние наступает тогда, когда работа сооружения под нагрузкой выходит за рамки проектных решений.

Для юридически значимой трактовки концепции предельных состояний указанная концепция и ее ключевые положения должны быть отражены как в законодательных, так и в нормативных документах, в рамках требований которых осуществляется деятельность в строительной отрасли.

2.1. Положения основных законодательных и нормативных документов в области нормирования надежности, несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций

История нормирования

В утвержденном в 1955 г. СНиП была принята классификация предельных состояний по виду явлений, составляющих критерии предельных состояний (I — потеря несущей способности; II — деформации; III — трещины). Но уже в тот период Н.С. Стрелецкий отметил, что, по существу, все предельные состояния связаны с деформациями в широком смысле этого слова и что в частности для металлических конструкций предельные состояния по прочности определяются в большинстве случаев не действительной потерей несущей способности, а чрезмерным развитием пластических деформаций. А в 1962 г.

в тексте главы СНиП II-A.10–62 классификация предельных состояний была уточнена и указано, что в расчетах учитываются следующие предельные состояния:

- а) *первое* — по несущей способности, включая чрезмерные пластические деформации;
- б) *второе* — по деформациям и перемещениям, затрудняющим нормальную эксплуатацию;
- в) *третье* — по трещиностойкости.

Здесь можно различать одновременно два признака классификации — вид явлений, составляющих критерии предельных состояний, и степень ответственности предельных состояний (поскольку деформации, ведущие к прекращению эксплуатации в первом предельном состоянии, противопоставляются деформациям, затрудняющим нормальную эксплуатацию во втором предельном состоянии).

В результате обсуждений и дискуссий, проходивших в конце 60-х гг. XX в., было уточнено, что потеря несущей способности может проявляться как общая потеря устойчивости формы, потеря устойчивости положения, хрупкое, вязкое, усталостное или иного характера разрушение, качественное изменение конфигурации. А чрезмерные деформации (текучесть материала, сдвиги в соединениях и т.п.) в общем случае не составляют потери несущей способности.

С учетом сказанного в п. 8 измененного СНиП II-A.10–71 приведена новая формулировка:

«Предельные состояния подразделяются на две группы:

первая группа — по потере несущей способности или непригодности к эксплуатации;

вторая группа — по непригодности к нормальной эксплуатации».*

Таким образом, классификация принята теперь по степени потери эксплуатационной способности. Предельные состояния, определяемые как деформациями, так и трещинами, могут относиться теперь к первой и второй группам в зависимости от степени потери эксплуатационной способности, вызываемой этими деформациями или трещинами. Потеря несущей способности рассматривается как крайний случай потери эксплуатационной способности.

Исчезновение предельного состояния по трещиностойкости связано с тем, что его самостоятельное существование относилось лишь к железобетонным и каменным конструкциям, что было не совсем логично. В связи с тем, что применительно к другим материалам теория трещинообразования и сопротивления развитию трещин была недостаточно разработана, трещинообразование отнесли как вариант ко второму предельному состоянию. Таким образом, разрушение за счет трещинообразования (например связанное с хрупкими разрушениями трубопроводов при катастрофическом росте магистральной трещины) было исключено из рассмотрения, а трещинообразование связали лишь с потерей эксплуатационного качества.

Современное состояние правовых и нормативных документов

Федеральный закон № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [1].

Статья 16. Требования к обеспечению механической безопасности здания или сооружения.

1. Выполнение требований механической безопасности в проектной документации здания или сооружения должно быть обосновано расчетами и иными способами, указанными в части 6 статьи 15 настоящего Федерального закона, подтверждающими, что в процессе строительства и эксплуатации здания или соору-

* СНиП II-A.10–71 Строительные конструкции и основания. Основные положения проектирования : строительные нормы и правила : дата введения 1972-01-01 / Госстрой СССР. — Изд. официальное. — Москва : Стройиздат, 1979. — Статус: недействующий.

жения его строительные конструкции и основание не достигнуто предельного состояния по прочности и устойчивости при учитываемых в соответствии с частями 5 и 6 настоящей статьи вариантах одновременного действия нагрузок и воздействий.

2. За предельное состояние строительных конструкций и основания по прочности и устойчивости должно быть принято состояние, характеризующееся:

- 1) разрушением любого характера;
- 2) потерей устойчивости формы;
- 3) потерей устойчивости положения;

4) нарушением эксплуатационной пригодности и иными явлениями, связанными с угрозой причинения вреда жизни и здоровью людей, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений.

3. В расчетах строительных конструкций и основания должны быть учтены все виды нагрузок, соответствующих функциональному назначению и конструктивному решению здания или сооружения, климатические, а в необходимых случаях технологические воздействия, а также усилия, вызываемые деформацией строительных конструкций и основания.

4. Расчетные модели (в том числе расчетные схемы, основные предпосылки расчета) строительных конструкций и основания должны отражать действительные условия работы здания или сооружения, отвечающие рассматриваемой расчетной ситуации. При этом должны быть учтены:

- 1) факторы, определяющие напряженно-деформированное состояние;
- 2) особенности взаимодействия элементов строительных конструкций между собой и с основанием;
- 3) пространственная работа строительных конструкций;
- 4) геометрическая и физическая нелинейность;
- 5) пластические и реологические свойства материалов и грунтов;
- 6) возможность образования трещин;
- 7) возможные отклонения геометрических параметров от их номинальных значений.

5. В процессе обоснования выполнения требований механической безопасности должны быть учтены следующие расчетные ситуации:

- 1) установившаяся ситуация, имеющая продолжительность того же порядка, что и срок эксплуатации здания или сооружения, в том числе эксплуатация между двумя капитальными ремонтами или изменениями технологического процесса;
- 2) переходная ситуация, имеющая небольшую по сравнению со сроком эксплуатации здания или сооружения продолжительность, в том числе строительство, реконструкция, капитальный ремонт здания или сооружения.

6. При проектировании здания или сооружения повышенного уровня ответственности должна быть учтена также аварийная расчетная ситуация, имеющая малую вероятность возникновения и небольшую продолжительность, но являющаяся важной с точки зрения последствий достижения предельных состояний, которые могут возникнуть при этой ситуации (в том числе предельных состояний при ситуации, возникающей в связи со взрывом, столкновением, с аварией, пожаром, а также непосредственно после отказа одной из несущих строительных конструкций).

ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» [2]:

Строительные объекты должны удовлетворять требованиям (критериям), соответствующим следующим предельным состояниям:

– первая группа предельных состояний — состояния строительных объектов, превышение которых ведет к потере несущей способности строительных конструкций и возникновению аварийной расчетной ситуации;

– вторая группа предельных состояний — состояния, при превышении которых нарушается нормальная эксплуатация строительных конструкций, исчерпывается ресурс их долговечности или нарушаются условия комфортности;

– особые предельные состояния — состояния, возникающие при особых воздействиях и ситуациях и превышение которых приводит к разрушению сооружений с катастрофическими последствиями.

К первой группе предельных состояний следует относить:

– разрушение любого характера (например пластическое, хрупкое, усталостное);

– потерю устойчивости отдельных конструктивных элементов или сооружения в целом;

– условия, при которых возникает необходимость прекращения эксплуатации (например чрезмерные деформации в результате деградации свойств материала, пластичности, сдвига в соединениях, а также чрезмерное раскрытие трещин).

Ко второй группе предельных состояний следует относить:

– достижение предельных деформаций конструкций (например предельных прогибов, углов поворота) или предельных деформаций оснований, устанавливаемых исходя из технологических, конструктивных или эстетико-психологических требований;

– достижение предельных уровней колебаний конструкций или оснований, нарушающих нормальную работу оборудования или вызывающих вредные для здоровья людей физиологические воздействия;

– образование трещин, не нарушающих нормальную эксплуатацию строительного объекта;

– достижение предельной ширины раскрытия трещин;

– другие явления, при которых возникает необходимость ограничения во времени эксплуатации сооружения из-за нарушения работы оборудования, неприемлемого снижения эксплуатационных качеств или расчетного срока службы сооружения (например коррозионные повреждения).

Характеристики особых предельных состояний нормами не установлены.

Предельные состояния могут быть отнесены как к конструкции в целом, так и к отдельным элементам и их соединениям.

Для каждого учитываемого предельного состояния должны быть установлены расчетные модели сооружения, его конструктивных элементов и оснований, описывающие их поведение при наиболее неблагоприятных условиях возведения и эксплуатации. Допущения, принятые при выборе расчетных моделей, необходимо учитывать при расчете строительных объектов по предельным состояниям.

Проведем анализ характеристик предельных состояний, изложенных в ГОСТ 27751–2014.

Разрушение пластическое

С учетом возможной работы конструкции за пределом упругости предельная несущая способность определяется:

а) невозможностью оказывать сопротивление дальнейшему росту нагрузочного эффекта. Требования прочности сечений и напряжения ограничиваются соответствующими значениями расчетных сопротивлений (например R_s — для стальных конструкций, R_b и R_{bt} — для бетона);

б) получением таких остаточных деформаций, которые исключают дальнейшую эксплуатацию. Требования ограничиваются относительными деформациями и установлением их предельных значений для бетона ϵ_{b0} , ϵ_{bt0} и арматуры ϵ_{s0} в нормах проектирования

железобетонных конструкций, а также использованием критерия ограниченной пластической деформации в нормах проектирования стальных конструкций.

Разрушение хрупкое

Хрупкое разрушение может реализоваться в стальных конструкциях при номинальных напряжениях, меньших, чем предел текучести, в элементах значительной толщины ($s > 10$ мм), при концентрации напряжений, низких температурах или ударных воздействиях, или при одновременном действии указанных факторов, а в железобетонных — при перearмировании или мгновенных динамических воздействиях.

Этот вид предельного состояния представляет собой *особую опасность*, поскольку реализуется *при малых деформациях* и ведет к *полной потере* несущей способности. Однако методы его прогнозирования еще недостаточно разработаны для использования в обычной инженерной практике, поэтому основным способом предупреждения хрупких разрушений пока остаются косвенные методы.

В стальных конструкциях способность противостоять хрупкому разрушению обеспечивается выполнением требований к выбору сталей, применением соответствующих конструктивных решений и т.п. Для железобетонных конструкций — ограничение высоты сжатой зоны и минимального процента армирования.

Потеря устойчивости

Явление потери устойчивости имеет одну важную особенность, близкую к хрупкому разрушению. Потеря устойчивости всегда носит *неожиданный характер* и в большинстве случаев *отсутствуют* какие-либо *предупреждающие признаки* о возможности ее наступления.

Это сближает предельное состояние по потере устойчивости с хрупким разрушением и заставляет предусматривать некоторые дополнительные запасы, но их наличие часто является глубоко скрытым в нормативных рекомендациях.

При проектировании элементов стальных конструкций было принято ввести дополнительный коэффициент запаса k_1 к теоретическому значению φ , назначив $k_1 = 1$ — для гибкости $\lambda = 0$, $k_1 = 1,4$ — для гибкости $\lambda = 90$ и $k_1 = 1,15$ — для гибкости $\lambda = 200$ с интерполяцией для промежуточных значений.

Для несущей системы в целом проверка устойчивости обычно выполняется применительно к идеализированной расчетной схеме в упругой стадии. Такой расчет является в достаточной мере условным, и поэтому к результатам проверки добавляется специальный коэффициент запаса, значение которого не должно быть меньше 1,3.

Усталость

Усталостное разрушение конструкции имеет ряд специфических особенностей, к числу которых относится *зависимость предельной нагрузки* от числа циклов нагружения (времени действия нагрузки).

В отличие от других видов разрушения, реализующихся при редко встречающейся высокой интенсивности нагружения, интенсивность нагрузки, предельной по усталости, чаще всего соответствует обычным эксплуатационным условиям или более низким уровням нагрузки.

Усталостные изменения, связанные с появлением микротрещин, могут иметь разрушительный эффект, когда такие трещины начинают развиваться. Но при выполнении определенных условий (например при достаточной вязкости материала) развитие трещин может не произойти либо их можно отследить при регулярных проверках состояния конструкции и выполнить замену конструкции или ее предупредительный ремонт.

Таким образом, усталостное разрушение выделяется из ряда других разрушений, что требует использования несколько иной системы нормирования.

Нормативно-правовыми документами установлено: *целью расчета конструкций (несущей системы)* является получение надлежащей гарантии, что за время эксплуатации сооружения не наступит ни одно из недопустимых предельных состояний для конструкции в целом и отдельных ее элементов.

Таким образом, принцип расчета по предельным состояниям заключается в анализе процесса перехода строительной конструкции в предельное состояние с учетом всех факторов, оказывающих влияние на ее несущую способность.

Важно! В основе метода расчета по предельным состояниям лежит идея отказа от рассмотрения всех возможных состояний конструкции, кроме предельных, для которых сформулированы соответствующие требования. Таким образом, использование метода расчета по предельным состояниям не позволяет исследовать состояние конструкций на стадиях, соответствующих «нормальным» (непредельным) условиям эксплуатации.

Например, для статически определимой конструкции (однопролетная шарнирно опертая балка) превышение критериев предельного состояния I группы может привести к отказу конструкции в целом.

В статически неопределимых системах (тем более в многократно статически неопределимых, например рамно-связевый каркас многоэтажного здания) ситуация с оценкой отказа существенно иная.

В случае достижения предельного состояния в одном (наиболее слабом или нагруженном) сечении может произойти локальное изменение расчетной модели элемента, например сформироваться пластический шарнир с некоторой величиной остаточной несущей способности по изгибающему моменту, что приведет к перераспределению усилий в системе. Однако несущая система в целом может оставаться в работоспособном состоянии, т.е. не произойдет отказ (авария).

Следует учитывать, что принципы оценки влияния локальных отказов на формирование предельного состояния несущих систем в целом находятся в состоянии разработки и верификации, что не позволяет широко использовать такой расчетный анализ.

2.2. Граничное неравенство для предельных состояний первой группы

Концепция расчета конструкций по предельным состояниям основана на оценке превышения эффекта воздействия (силовой или деформационный фактор) уровня предельного фактора соответствующего рассматриваемого предельного состояния.

Во всех анализируемых расчетных ситуациях выполняется проверка того, что расчетные значения нагрузок или воздействий F_d не превышают расчетные значения характеристик прочности R_d , т.е. основное требование сводится к выполнению условия

$$R_d \leq F_d. \quad (2.1)$$

Для общего случая (с учетом нелинейной работы несущей системы / элементов системы и при дифференцированных коэффициентах надежности) форма предельного неравенства выглядит следующим образом:

$$g(F_d, R_d, A_d, C) \geq 0, \quad (2.2)$$

где $g(F_d, R_d, A_d, C)$ — некоторая функция параметров системы, такая, что $g(F_d, R_d, A_d, C) < 0$ означает реализацию запредельного состояния;

A_d — расчетные значения геометрических характеристик;

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

ВНИМАНИЕ!

Неравенство описывает принципиальную структуру проверочного условия и должно уточняться для конкретных расчетных ситуаций с учетом того, что F_d , R_d и A_d — это,

как правило, несколько величин, а проверка может потребовать использования не одного, а нескольких совместных неравенств. Например, F_d может представлять целый перечень одновременно действующих нагрузок R_d при проверке железобетонных конструкций — прочность как бетона, так и арматуры.

Граничное неравенство для предельных состояний первой группы соответствует минимальному критерию, т.е. позиции крайней осторожности.

При условии полной определенности множеств рассматриваемых состояний объекта выбранные таким образом варианты полностью исключают риск. Это означает, что *принимая решение не может столкнуться с худшим результатом*, чем с тем, на который он ориентируется.

Таким образом, граничное неравенство соответствует концепции I группы предельных состояний.

ВНИМАНИЕ! РИСК СУЩЕСТВУЕТ!

Риск определяется методикой установления минимального значения обобщенной несущей способности и максимального значения обобщенной нагрузки, т.е. при назначении их расчетных значений.

Концептуально предполагается, что расчетные значения определяются через так называемые нормативные (базовые, характеристические) значения F_n , R_n и A_n с использованием коэффициентов надежности γ , которые учитывают возможный разброс соответствующих силовых и прочностных характеристик:

$$F_d = \gamma_f F_n; \quad (2.3)$$

$$R_d = R_n / \gamma_m. \quad (2.4)$$

В граничном неравенстве используются:

- коэффициент надежности по нагрузке γ_f ;
- коэффициент надежности по материалу γ_m ;
- коэффициент надежности по ответственности γ_n (коэффициент, учитывающий значимость конструкции и объекта в целом, а также возможные последствия отказа);
- коэффициент условий работы γ_c (коэффициент надежности модели, 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» (СП 63.13330.2018).

Таким образом, расчетное неравенство имеет вид

$$g(\gamma_f, \gamma_m, \gamma_n, \gamma_c, F_d, R_d, A_d, C) \geq 0. \quad (2.5)$$

Первые два коэффициента надежности связывались (по крайней мере в идеологии) со статистическими свойствами нагрузок и материалов (с их изменчивостью), в то время как γ_c и γ_n никакой изменчивости не характеризуют.

2.3. Переменные и параметры граничного неравенства как случайное явление. Вероятностные свойства переменных и параметров граничного неравенства

Нагрузки и воздействия

Практически все нагрузки, которые рассматриваются при расчете конструкций, являются случайными величинами или случайными функциями времени. Это означает, что мы не можем указать точное значение нагрузки, которое будет реализовано, а используем некоторые расчетные величины, которые могут реализоваться лишь с определенной долей вероятности.

Вероятностные свойства нагрузки как функции времени или пространственной координаты устанавливаются путем статистической обработки данных измерений их выборочных значений (рис. 2.1).

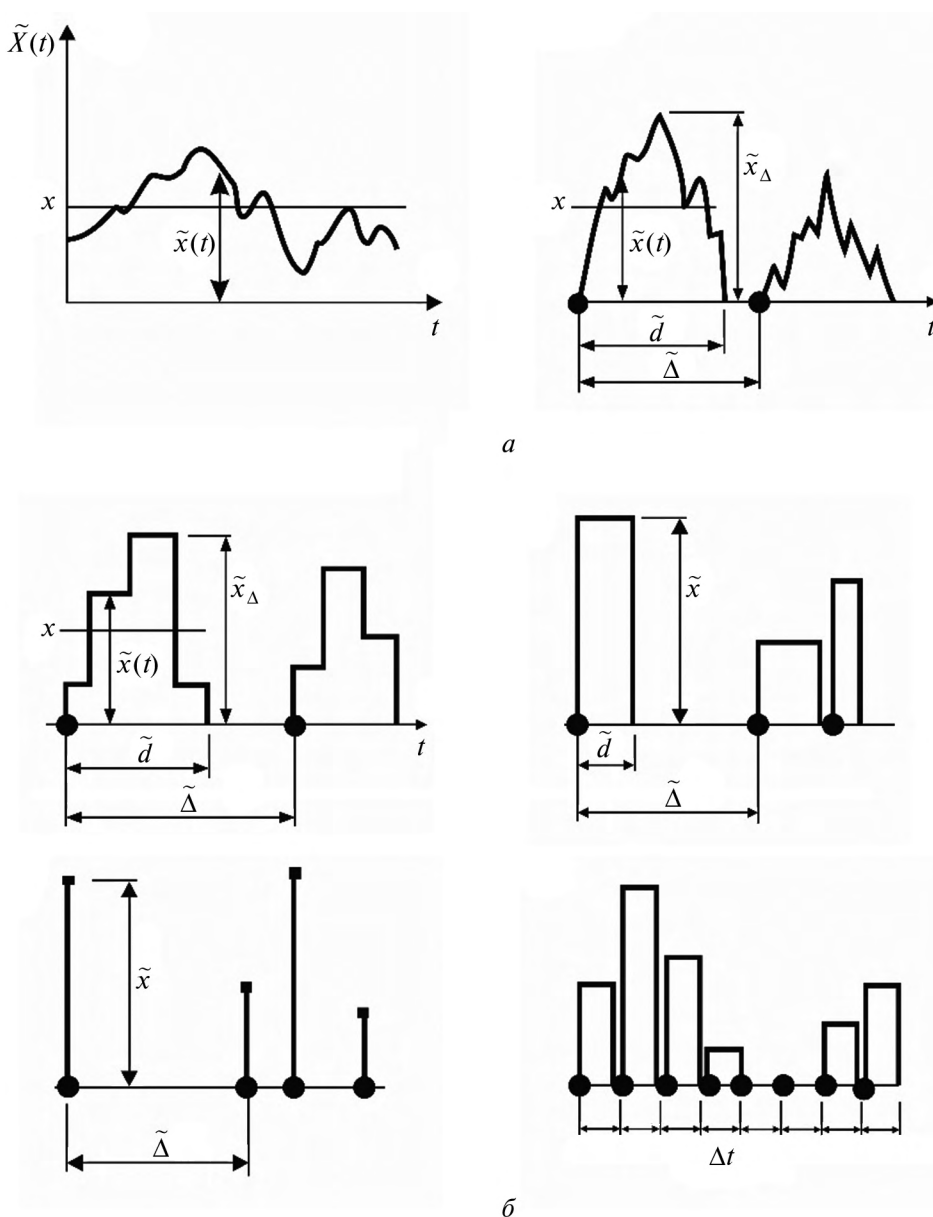


Рис. 2.1. Основные виды реализации измеренных значений:
a — дифференцируемые случайные функции; *б* — недифференцируемые функции ступенчато-импульсного типа, в том числе и с мгновенными импульсами

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru