

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.046

*ПЕРЕЛЬМУТЕР АНАТОЛИЙ ВИКТОРОВИЧ, докт. техн. наук,
aperel@i.com.ua; anatolyperelmutter@gmail.com
Научно-производственное объединения SCAD Soft,
Украина, 03037, г. Киев, ул. Просвещения, 3а*

РАЗВИТИЕ ТРЕБОВАНИЙ К БЕЗОТКАЗНОСТИ СООРУЖЕНИЙ

В мире современного компьютерного проектирования запас прочности является странной вещью: нагрузки и параметры прочности материалов заданы с точностью 10–20 %, усилия вычислены с точностью до 0,01 %, а некоторые нормативные рекомендации устанавливают запасы прочности, достигающие 50–100 %. В прошлом запас прочности обычно был простым числом, включенным в нормативный документ, но у современных норм есть сложные системы частных коэффициентов надежности (запасов прочности), которые не всегда дают возможность оценить истинный резерв безотказности. Какие значения запасов прочности использовались и как они изменились с течением времени? В статье рассматривается, как менялись отечественные и зарубежные нормы проектирования, какие запасы прочности они предусматривали, как происходил обмен идей и заимствование методик и как, наконец, менялись подходы к самой цели нормирования.

Ключевые слова: безотказность; допускаемое напряжение; коэффициент запаса; нормы проектирования; метод расчетных предельных состояний; метод частных коэффициентов надежности.

*ANATOLII V. PEREL'MUTER, DSc, RAACS International Fellow,
aperel@i.com.ua; anatolyperelmutter@gmail.com
SCAD Soft,
3a, Prosveshcheniya Str., 03037, Kiev, Ukraine*

STRUCTURAL RELIABILITY REQUIREMENTS

The paper presents the problem of the safety factor because in terms of computer simulation this factor is an interesting thing: loads and parameters of material strength are given with 10–20 % accuracy, forces are computed with accuracy up to 0,01 %, while certain regulatory documents sometimes contain factors of safety coming to 50–100 %. Formerly, the safety factor was a prime number included in a regulatory document, however today there are complex systems of partial safety factors which not always give a possibility of estimating the real potential of reliability. This paper focuses on amendments and correction made in Russian and

foreign design codes, safety factors provided therein, the exchange of experiences and ideas, adoption of methodologies, and, finally, different approaches to regulation goal achievement.

Keywords: reliability; allowable stress; safety factor; design code; limit state method; partial safety factor method.

Введение

Современный инженер чаще всего полагает, что аккуратное следование указаниям норм проектирования является необходимым и достаточным условием обеспечения безотказности создаваемых конструкций. Но проверка показывает, что многие старые сооружения, не удовлетворяющие требованиям современных норм, существуют и прекрасно работают. Значит ли это, что наши требования не являются абсолютно необходимыми? Ответ на этот вопрос, по-видимому, является положительным, но тогда возникает вопрос о том, каким же образом наши предшественники добивались выполнения требований безотказности. Без знания истории вопроса это трудно понять.

История развития отечественных и зарубежных норм проектирования, как любая история (если только она не представлена тенденциозно), дает не только фактические знания о прошлом опыте, но и в некоторой степени позволяет прогнозировать тенденции развития проблемы. По мнению автора, современные нормы находятся в преддверии нового этапа. Действующие у нас и в других странах подходы к нормированию почти не учитывают тот факт, что сегодняшний проект создается с помощью компьютерного анализа и уже только это является тенденцией к совершенствованию норм.

Предыстория

Как показывает многовековой опыт строительства, проблема прочности и безопасности сооружений существовала всегда, актуальна она и сейчас. Развитие философии обеспечения безопасности проектируемых зданий и сооружений проходило отдельными этапами и в своем основном русле всегда развивалось под лозунгом все более детального прогнозирования работы конструкций, изучения природы действующих на эти сооружения нагрузок, более отчетливого описания требований к конструктивной форме и условий выполнения таких требований.

История строительства свидетельствует, что даже в наиболее совершенных древних сооружениях можно найти грубые ошибки, которые обнаруживают незнание основ сопротивления материалов и теории сооружений. Суеверный страх перед непознаваемой тайной материала заставлял строителей обращаться за помощью к потусторонним силам с привлечением молитв, заговоров и даже жертвоприношений. С древних времен профессия строителя считалась весьма ответственной, и возможные строительные ошибки имели очень серьезные последствия для тех, кто их допускал.

Нормы же по обеспечению безопасности конструкций были обычно весьма нечеткими. Традиционно считается, что самые ранние известные письменные строительные нормы и правила включены в Кодекс Хаммурапи, который датируется приблизительно 1772 г. до н. э. В нем сказано:

– если строитель строит дом для кого-то и не строит его должным образом, а дом, который он построил, обрушивается и убивает его владельца, тогда этот строитель должен быть казнен;

– если убьет сына владельца, то сын строителя должен быть казнен;

– если убьет раба владельца, то он должен заплатить за раба владельца дома;

– если разрушит товары, то строитель должен сделать компенсацию за все, что было разрушено, и поскольку он не строил должным образом, дом, который он построил, упал, он должен повторно установить дом за счет своих собственных средств;

– если строитель строит дом для кого-то, даже при том что он еще не закончил строительство, и если тогда стены окажутся разрушенными, то строитель должен сделать стену из его собственных средств;

– если человек был нерадив в отношении укрепления плотины, которая находится на его земле, то в наказание он должен возместить убытки вплоть до продажи его самого в рабство.

Строительные нормы и правила можно отыскать даже в Библии (Второзаконие, глава 22, стих 8): «Если будешь строить новый дом, то сделай перила около кровли твоей, чтобы не навести тебе крови на дом твой, когда кто-нибудь упадет с него».

Строители определяли прочность интуитивно, методом многочисленных проб и ошибок, анализируя причины аварий и обрушений конструкций. Каждая авария добавляла строителям новые знания, ставила новые задания. Когда же знаний не доставало, в инженерные расчеты вводили (и вводят сейчас) коэффициент запаса и ограничивали допустимые напряжения. Поскольку никто не знал, какие непредсказуемые, непознанные явления учитывает этот коэффициент и должен ли он быть именно таким, а не меньшим, он был, по сути, коэффициентом незнания.

Допускаемые напряжения

Теоретические основы расчета конструкций сформулированы в методах строительной механики, которая оформилась как самостоятельная научная дисциплина к середине XIX в. С ее возникновением появилась возможность установить правила проектирования сооружений. Впервые в строительную науку коэффициент запаса ввел знаменитый французский инженер и ученый Л.М.А. Навье, предложивший в 20-е гг. XIX столетия установить расчетные допустимые напряжения, которые должны быть гораздо меньше разрушающих и при которых конструкция должна работать надежно.

У.Дж. Ренкин, знаменитый шотландский инженер, физик и механик, определил коэффициент запаса как отношение предела прочности материала к максимально допускаемому напряжению при воздействии действительной или рабочей нагрузки на конструкцию. Ренкин также указал на различие между постоянно действующей нагрузкой, которая может быть точно определена, и временной нагрузкой, величина которой не может быть установлена с такой же точностью. Он полагал приемлемым значение коэффициента запаса $k = 4,0$.

К концу XIX и началу XX в. это допускаемое рабочее напряжение было включено в строительные нормы для различных материалов и строительных конструкций.

Допускаемые напряжения, принимаемые в различных странах, заметно отличались друг от друга. Так, в Англии для конструкционной стали допустимые усилия были основаны на четырехкратном запасе прочности *по отношению к среднему пределу текучести*, который равнялся приблизительно 432–494 Н/мм². Лондонский закон 1909 г. Совета графства определил допустимое напряжение при изгибе, растяжении и сжатии величиной 116 Н/мм². Для конструкций из сварочного железа в России Урочным положением [7] были установлены допускаемые напряжения, равные примерно 80 Н/мм² для растяжения и 65 Н/мм² для сжатия. А в Германии эти величины составляют соответственно 115 и 95 Н/мм².

Позже значения допускаемых напряжений неоднократно пересматривались, и к 40-м гг. XX в. для стальных конструкций они примерно соответствовали двукратному коэффициенту запаса, но уже *по отношению к браковочному минимуму предела текучести* σ_T , а не к его среднему значению.

В Советском Союзе, например, для стали марки Ст3 значение σ_T принималось 240 Н/мм². Коэффициент запаса учитывал много факторов, неблагоприятно влиявших на работу конструкций и, в частности, зависел от числа и характера нагрузок, на которые рассчитывалась конструкция. До 1942 г. наибольший коэффициент запаса $k = 1,7$ и наименьшее допускаемое напряжение $[\sigma] = 140$ Н/мм² принимались при расчетах на нагрузки, действовавшие постоянно или часто совпадавшие, например, постоянные нагрузки и снег. При учете большего числа и более случайных нагрузок (ветер ураганной интенсивности, влияние температуры) допускаемое напряжение принималось $[\sigma] = 170$ Н/мм², а $k = 1,4$. В 1942 г. значения допускаемых напряжений были повышены до 160 и 180 Н/мм². Коэффициенты запаса принимались соответственно 1,5 и 1,33.

На первых порах, т. е. в конце XIX в., железобетонные конструкции также рассчитывались по допускаемым напряжениям на основе законов поведения упругих материалов. Но уже в 1904 г. А.Ф. Лолейт написал работу «О коэффициенте прочности железобетонных сооружений» [3], в которой показал, что расчет изгибаемых железобетонных элементов по упругой стадии их работы совершенно недопустим. Он утверждал, что «критическая нагрузка, соответствующая мгновенному равновесию, непосредственно предшествующему разрушению... даёт возможность определить запас прочности с точностью, удовлетворяющей самым строгим требованиям практики».

Идеи Артура Фердинандовича Лоллейта (как и аналогичные идеи американского инженера Чарльза С. Уитни) вошли в практику в 30-х гг. XX в. [4, 17]. Однако переход от предельного напряжения к предельному усилию не поменял основной парадигмы расчета по допускаемым напряжениям. Просто вместо предельного напряжения материала на коэффициент запаса делилась предельная нагрузка железобетонного элемента.

Следует отметить, что в практике проектирования используются и другие определения коэффициента запаса. Например, в механике грунтов широ-

кое распространение имеет теория прочности Мора – Кулона, в соответствии с которой разрушение по некоторой площадке не происходит, если выполняется неравенство

$$\tau < \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1)$$

где τ – касательное, σ – нормальное напряжения, действующие по рассматриваемой площадке; φ – угол внутреннего трения; c – удельное сцепление. Коэффициент запаса иногда определяется как величина, на которую следует разделить параметры сопротивления грунта $\operatorname{tg} \varphi$ и c , чтобы условие (1) обратилось в равенство. Такой подход обосновывается тем, что в отличие от большинства конструкций, где изменчивость нагрузки намного выше изменчивости сопротивления, у грунтовых оснований наиболее изменчивым фактором являются расчетные характеристики грунта. Поэтому при оценке коэффициента запаса логичнее варьировать не нагрузку, а сопротивление.

В 20-х гг. XX в. новая отрасль промышленности – самолетостроение – стимулировала поиски более точных основ определения коэффициента запаса. Разумное его уменьшение, не создающее опасности для надежности сооружения, естественно, дает экономию материалов и денежных средств. Это важно в строительстве, но особенно в самолетостроении, т. к. слишком тяжелый самолет вообще не сможет взлететь. Поэтому коэффициент запаса в конструкциях самолетов значительно меньше, чем в зданиях, однако этот более низкий запас прочности сочетается с тщательным контролем качества материалов, частой проверкой состояния конструкций, заменой поврежденных частей, точностью методов проектирования конструкций, основанных на математических расчетах. Методы проектирования, разработанные для самолетостроения, в определенной степени повлияли на проектирование зданий.

Новые идеи

Таким образом, начиная с XIX столетия метод допускаемых напряжений с учетом коэффициента запаса, который устанавливался на основе инженерной интуиции, опыта проектирования и эксплуатации конструкций, использовался в строительных расчетах до 50-х гг. XX в.

Между тем в ряде работ обосновывались предложения по развитию методов расчета конструкций. В 1926 г. М. Майер предложил вместо расчета по допускаемым напряжениям использовать вероятностные методы для выбора значений параметров, вводимых в расчет [13]. В 1929 г. Н.Ф. Хоциалов, принимая во внимание изменчивость основных параметров, предложил вести проектирование конструкций, исходя из некоторой регламентируемой вероятности аварийного отказа конструкции [9]. Однако формулировка Н.Ф. Хоциалова «Проектировать с учетом возможности аварии» встретила сильное сопротивление, и его идеи были надолго отвергнуты. Существенным развитием идей М. Майера и Н.Ф. Хоциалова явились работы Н.С. Стрелецкого, М. Плата, В. Вержбицкого и А.М. Фрейденталя [8, 16, 18, 12], где в качестве случайных величин использовались не только прочностные характеристики материала, но и параметры нагрузок, при этом речь шла уже о вероятности отказа в виде

нарушения некоторых регламентируемых требований, а не о вероятности аварийного разрушения.

Однако метод расчета конструкций по допускаемым напряжениям имеет и ряд других недостатков, к главным из которых могут быть отнесены следующие: все конструкции рассчитывались с единым коэффициентом запаса независимо от видов нагрузок и условий работы элементов конструкций; коэффициент запаса не учитывал эксплуатационные требования.

Поэтому существенным этапом в развитии расчета конструкций явился полувероятностный метод расчетных предельных состояний, по идее лишенный указанных недостатков, и по сути реализующий практический вариант использования некоторых положений вероятностного подхода. Будучи по форме детерминированным, он идейно основан на использовании методов статистического анализа при нахождении коэффициентов надежности, характерных для этого метода. Условная система упомянутых коэффициентов надежности была предложена в 1945 г. И.И. Гольденблатом, М.Г. Костюковским и А.Н. Поповым и положена в основу схемы расчета для разработки строительных норм и правил [1].

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 он положен в основу большинства международных и национальных стандартов по проектированию, в частности, в системе Еврокодов, где он получил название «метод частных коэффициентов надежности»¹.

Известно, что за рубежом внедрение метода расчетных предельных состояний растянулось на десятки лет. Объясняется ли это простым незнанием работ отечественных ученых, или здесь имели место другие соображения? Автор полагает, что основную роль здесь сыграло отсутствие в середине 50-х гг. необходимого статистического материала для обоснования значений частных коэффициентов надежности (об этом честно говорили авторы метода, которые при этом полагались на будущие исследования, а на первых порах подгоняли результаты под решения, проверенные предшествующим опытом).

В западных странах, где не принята командная система внедрения нововведений, не рассматривалась возможность убедить инженерную общественность в срочной необходимости смены подхода к проектированию, тем более что подгонка под предшествующий опыт не давала заметного экономического эффекта. В частности, некоторая экономия была достигнута для конструкций, на которые действуют преимущественно постоянные нагрузки с минимальными коэффициентами перегрузки, а именно экономия 3–10 % для стропильных и подстропильных ферм, в то время как подкрановые балки остались практически неизменными, а колонны производственных зданий или остались без изменений, или даже стали несколько тяжелее.

¹ EN 1990:2001. Eurocode. Basis of structural design. Brussels: CEN. 2002. 89 p.

Следует отметить, что и в западных нормах проявилась идея преемственности. Так, в предисловии к британскому стандарту CP110² утверждает-ся, что «...соответствующие статистические данные недостаточны, чтобы позволить методу частных коэффициентов надежности быть развитым в полном согласии с теорией вероятности, и используемые значения коэффициентов были основаны на текущей практике». Однако было сказано, что у метода частных коэффициентов надежности есть преимущество, заключающееся в том, что «впоследствии это упростит включение поправок к Кодексу, по мере того как новое знание становится доступным относительно изменчивости в нагрузках и сопротивлениях».

А при формировании Еврокодов Европейская комиссия по нормированию (CEN) столкнулась с тем, что часть стран, в которых использовался метод расчетных предельных состояний, опасалась, что некоторые расчеты, основанные на методе допускаемых напряжений, укажут на формальное нарушение требований метода предельных состояний. Другие страны, в которых использовался метод допускаемых напряжений, указывали, что уже построенные сооружения оказываются менее экономичными при пересчете по предельным состояниям. Таким образом, современные Еврокоды – это результат компромисса, и только в следующих редакциях Еврокодов можно ожидать полной вероятностной обоснованности всех нормативных требований.

Предельные состояния

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

Если рассматривать 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, по отношению к которым и формулируются расчетные требования к объекту. Такой подход, кроме известных преимуществ, обладает и серьезным недостатком, поскольку, приняв, например, за одно из предельных состояний условие прочности и запроектировав конструкцию так, чтобы с определенной степенью уверенности можно было говорить, что в течение всего срока службы это условие не будет нарушено, мы почти ничего не можем сказать о том, какой уровень фактических напряжений будет соответствовать нормальному (не-предельному) состоянию при наиболее часто реализующихся условиях эксплуатации.

Например, нормы проектирования железобетонных конструкций построены на идее рассмотрения предельного состояния сечения, когда вследствие пластической деформации арматуры достигли предельного значения и сжимающие напряжения в бетоне. Но в нормальных условиях эта гипотеза А.Ф. Лоллейта не выполняется, и реализуется совершенно другая картина напряженного состояния. Именно она должна быть положена в основу изучения таких, например, реологических процессов, как ползучесть.

² CP110 Part 1:1972 The Structural Use of Concrete: Part 1 Design, Materials & Workmanship. London: British Standards Institution, 1972.

Состояния конструкции, наиболее часто реализующиеся в условиях эксплуатации, в основном определяют и ее долговечность. Но с точки зрения предельного анализа почти равноправными могут оказаться и конструкция плотины, обычный уровень нагружения которой не очень далек от предельно допустимого (например, он составляет 80 % расчетного), и конструкция дымовой трубы, у которой появление расчетной нагрузки является весьма редким событием, а обычное нагружение соответствует, например, 15 % расчетного.

Если же фиксировать внимание на системе частных коэффициентов надежности, то увидим, что произошла замена одного общего коэффициента запаса произведением нескольких (частных) коэффициентов, каждый из которых связан с определенной стороной проблемы безопасности – характером нагрузки, свойствами материала, степенью ответственности объекта и т. п.

Эта особенность метода предельных состояний имела положительным следствием значительную активизацию исследования указанных коэффициентов и развитие норм проектирования. Именно детализация в применении комбинации частных коэффициентов надежности обеспечивает (точнее, должна обеспечивать) ситуацию равной вероятности реализации предельного состояния рассмотренных выше двух объектов, обычное состояние которых резко отличается степенью близости к предельному.

Но и здесь имеется определенная неувязка, поскольку мы можем полагаться на равнонадежность только по отношению к тем факторам (например, внешним воздействиям), которые были приняты во внимание при проектировании и статистические характеристики которых использованы при назначении расчетных коэффициентов метода. В случае некоторого не предусмотренного проектом (и нормами) случайного возмущения вероятность исчерпания 20%-го запаса в первом случае намного выше, чем исчерпание 85%-го запаса во втором случае.

Кроме того, следует иметь в виду, что коэффициент запаса может меняться с течением времени (например, за счет износа конструкции), и сегодня обычно ставится задача об обеспечении некоторого заданного значения коэффициента запаса в течение планируемого срока эксплуатации T_{ef} без всякой связи с картиной изменения коэффициента запаса во времени (рис. 1).

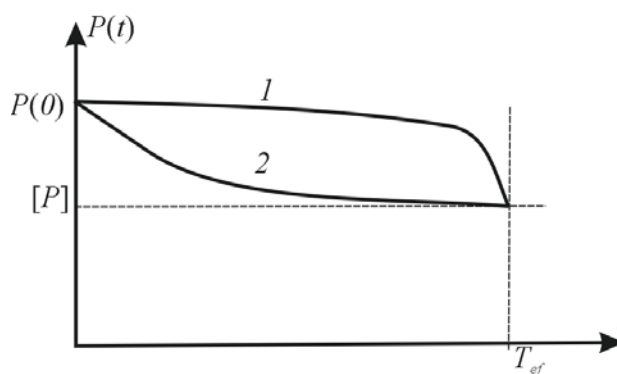


Рис. 1. Изменение коэффициента запаса во времени

При этом по сути равноправными будут конструкции, у которых фактическое значение коэффициента запаса $k(t) = P(t)/[P]$ определено графиком 1 или графиком 2 (рис. 1), которые оба реализуют требуемое значение $k(t) \geq [k]$ на всем временном интервале, хотя в случае 1 конструкция «в общем» более надежна. В современных нормах этот факт пока никак не учитывается.

Критерии отказов

В соответствии с действующими нормами расчета конструкций по методу предельных состояний предполагается, что эксплуатация здания или сооружения прекратится ранее, чем будет исчерпана его фактическая несущая способность, и этот факт объявлен одним из постулатов метода расчета по предельным состояниям.

Именно таким образом формулирует условие первого предельного состояния действовавший многие годы ГОСТ 27751–88, где к предельным состояниям 1-й группы отнесены «...предельные состояния, которые ведут к полной непригодности эксплуатации конструкций, оснований (зданий или сооружений в целом) или к полной (частичной) потере несущей способности зданий и сооружений в целом». Эта формулировка предполагает, что кроме потери несущей способности в качестве критерия предельного состояния 1-й группы могут иметь место и такие события, как прекращение эксплуатации в связи с экономической нецелесообразностью дальнейшего содержания. Таким образом, например, завершила свое существование башня Киевского телецентра, построенная на ул. Крещатик в начале 50-х гг., для которой переход к новым типам антенн оказался связанным со слишком дорогой модернизацией. Иными словами, формулировка ГОСТ 27751–88 предусматривает в числе причин перехода в предельное состояние 1-й группы не только физический, но и моральный износ.

Заметим, что термин «полная непригодность объекта к эксплуатации» в каждом отдельном случае требует определения. Если в старом здании выходит из строя водоснабжение, можно решать, стоит ли устанавливать новые трубы или снести здание. Если здание представляет исторический интерес, можно превратить его в нежилое музейное помещение, и в этом случае устанавливается непригодность здания в качестве жилого дома.

Многие известные старые здания и памятники в этом смысле фактически давно вышли из строя. Например, пирамиды в Гизе часто приводятся в качестве примера долговечности, но они больше не служат и не могут служить той цели, для которой были предназначены, поверхность их граней сильно разрушена (рис. 2).

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

В определенном смысле последовательнее поступили составители международного стандарта³, которые определили, что «3.1.1. ... предельные

³ ISO ST 2394. General Principles on Reliability for Structures. 1994, 50 p.

состояния 1-й группы, которые соответствуют максимальной несущей способности (связаны с безопасностью)», или Еврокода 0⁴, где указано, что «3.2. (1) Абсолютные предельные состояния (ultimate limit state) – это такие предельные состояния, которые ассоциируются с разрушением или с другим подобным видом отказа. (2) Состояния, непосредственно предшествующие разрушению, которые для простоты рассматриваются вместо разрушения как такового, относятся также к абсолютным предельным состояниям. (3) Абсолютные предельные состояния имеют отношение к: безопасности конструкции и ее окружения; безопасности людей».



Рис. 2. Пирамида Хефрена в Гизе (XXVI в. до н. э.). Современный вид

Аналогичную позицию занял и новый стандарт⁵, в котором вводятся такие предельные состояния:

- первая группа предельных состояний – состояния строительных объектов, превышение которых ведет к потере несущей способности строительных конструкций;

- 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 зданий и сооружений с катастрофическими последствиями.

Если первое предельное состояние обычно связывается с достижением каким-либо параметром конструкции критического значения (достижение предела прочности, потеря устойчивости равновесия и т. п.), то по поводу второго предельного состояния имеется заметная неопределенность,

⁴ EN 1990:2001. Eurocode. Basis of structural design. Brussels: CEN. 2002. 89 p.

⁵ ГОСТ Р 54257–2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. М. : Стандартинформ, 2011. 18 с.

и назначение каких-то пределов во многом является условным. Но в последнее время (см., например, Еврокод 0) стараются различать обратимые и необратимые варианты второго предельного состояния.

Необратимые предельные состояния (рис. 3, а) – это такие состояния, которые не исчезают и после того, как те воздействия, которые их вызвали, прекратились (например, локальное повреждение или деформации от ползучести бетона). А обратимые предельные состояния (рис. 3, б) не развиваются, а иногда исчезают после того, как те воздействия, которые их вызвали, прекратились (например, перемещения под действием ветровой нагрузки или чрезмерная вибрация).

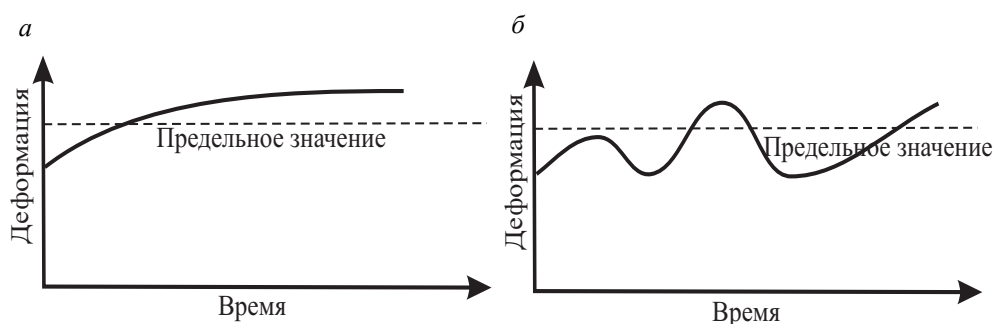


Рис. 3. Варианты второго предельного состояния

Для необратимых предельных состояний второй группы предельные значения устанавливаются из соображений эксплуатационной пригодности, которые в некоторых случаях можно определить в достаточной мере объективно, но чаще всего такие пределы являются в определенном смысле условными. Например, трудно доказать, что прогиб в 1/250 пролета еще является допустимым, а уже при значении 1/245 недопустимым.

Для обратимых предельных состояний часто устанавливается доля времени, в течение которой такое состояние может быть нарушено. Например, для остронаправленной радиосвязи, когда заметные углы поворота антенных устройств снижают качество приема, может быть условно принято, что такое ухудшение качества связи допустимо в течение 5 % времени. Такой подход регламентирован украинскими нормами⁶.

Обеспечение надежности

Связь между требованиями надежности и расчетом по предельным состояниям обычно считается очевидной и указывается при помощи простого отождествления отказа (основного понятия теории надежности) достижению предельного состояния. И хотя понятие отказа в общем случае шире списка ситуаций, связываемых с предельными состояниями, в качестве первого приближения с этим можно согласиться.

⁶ ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надежности и конструктивной безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований. Киев : Укрархбудинформ, 2009. 37 с.

Следует также заметить, что и в нормативной, и в научной литературе по надежности строительных конструкций по традиции практически исключительно рассматриваются только принципы обеспечения надежности, основанные на обеспечении «безопасного ресурса», т. е. в той или иной мере сводящиеся к назначению запасов несущей способности конструкций. Путь обеспечения надежности, связанный с проведением контрольно-проверочных работ, ремонтом и заменой частей конструкций, с другими действиями при эксплуатации, исследован гораздо в меньшей степени и практически не нормирован.

Вместе с тем при более широком взгляде на надежность следовало бы рассмотреть весь комплекс проблем, приводящих к возможным отказам (рис. 4). Тогда станут очевидными место и роль норм проектирования в обеспечении надежности, а также их взаимосвязь с проблемами контроля и его неполной достоверностью.

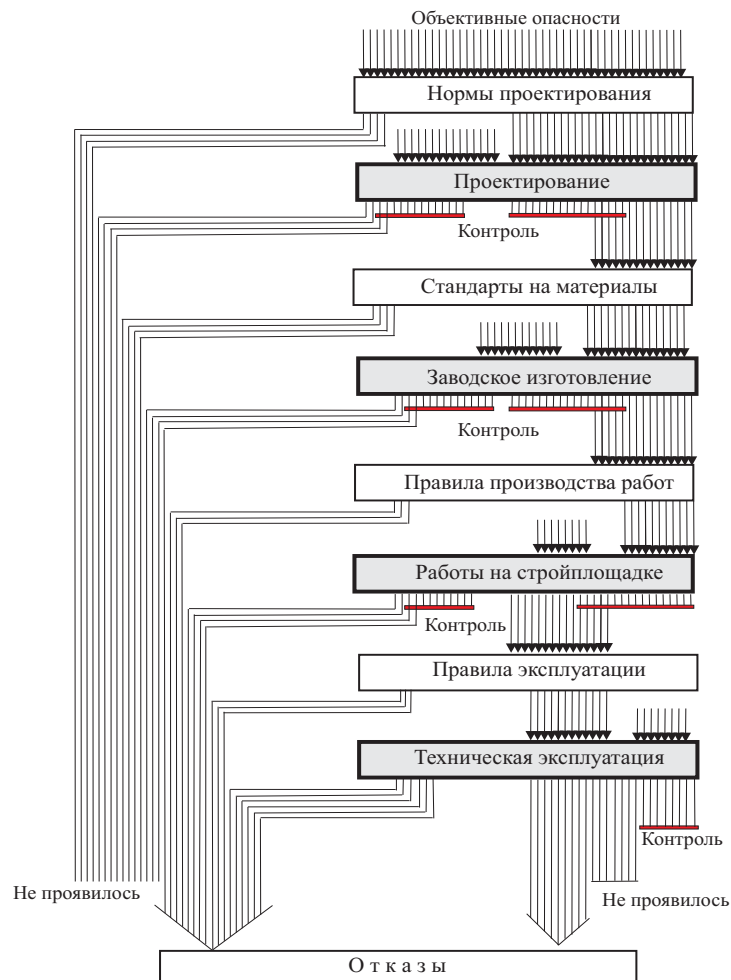


Рис. 4. Поток событий, приводящих к отказам

Схема формирования потока отказов (рис. 4) содержит все основные этапы жизненного цикла (проектирование, заводское изготовление, работы на стройплощадке и техническая эксплуатация), которые изображены жирными прямоугольниками. Светлыми прямоугольниками показаны регламентирующие упомянутые этапы нормативные документы, затененными – процессы, реализуемые при создании конструкций. Использование рекомендаций и регламентирующих указаний нормативных документов лишь частично препятствует проникновению ошибок на соответствующих этапах работы. А сами процессы жизненного цикла могут порождать ошибки, которые по идее должны парироваться соответствующими контрольными процедурами, однако никакой контроль не может гарантировать абсолютное отсутствие ошибок, и часть из них попадает на следующие этапы жизненного цикла конструкции.

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

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

Условный и реальный коэффициент запаса

В предыдущем разделе уже отмечалось, что в основе метода предельных состояний лежит идея отказа от детального анализа всех обычных (нормальных, эксплуатационных) состояний конструкции. Сосредоточение внимания только на отказовых состояниях с практическим упором на первое предельное состояние, как определяющее конструктивную форму, является не только достоинством рассматриваемого метода.

Поскольку основное время жизни конструкции соответствует состояниям нормальной эксплуатации, и именно для таких состояний происходят деструктивные изменения в материале конструкции (например, коррозионные процессы или накопление усталостных повреждений), то с позиций обеспечения эксплуатационной надежности и долговечности определяющим становится анализ конструкции, нормально работающей и далекой от исчерпания прочности и устойчивости. Для многих параметров сооружения определяющую роль могут играть расчеты в эксплуатационной стадии. По этому поводу Л.И. Иосилевский [2] замечает: «Иначе, как провалом в методологии расчетного прогноза поведения несущей конструкции под нагрузками, нельзя назвать потерю инженером расчетного контроля за сооружением в период перехода его от “здорового” (нормального, эксплуатационного) к предельному состоянию... Образовавшийся логический вакуум между эксплуатационным и предельным (аварийным) состоянием недопустим».

Можно предположить, что наличие проверок по второму предельному состоянию ликвидирует этот методологический провал, но дело в том, что

и эта группа состояний тоже является предельной, т. е. соответствует достаточно редко встречающимся крайним состояниям параметров сооружения и окружающей среды. Например, для конструкций, работающих под воздействием снеговой или ветровой нагрузки, их нормативные значения реализуются один раз за пять-семь лет и отстоят от нормального эксплуатационного состояния достаточно далеко.

В большинстве случаев основное неравенство метода расчетных предельных состояний представляется в форме

$$\psi\gamma_n\gamma_f F_n \leq \gamma_c R_n / \gamma_m, \quad (1)$$

где ψ , γ_c , γ_f , γ_m , γ_n – соответственно коэффициент сочетаний нагрузок, коэффициент условий работы и коэффициенты надежности по нагрузке, по материалу и по ответственности сооружения; F_n и R_n – нормативные⁷ значения обобщенных воздействия и сопротивления, по которым оцениваются предельные состояния.

В более общем случае, когда рассматривается нелинейная система, вместо (1) используют условие в обобщенных силах

$$F(\psi, \gamma_n, \gamma_f) \leq F_{ult}(\gamma_c, \gamma_m, R_n), \quad (1a)$$

где в левой части неравенства представлено максимальное расчетное усилие от внешней нагрузки, а в правой – минимальная несущая способность конструкции.

Некоторые исследователи (см., например, [2, 11]) величину

$$K = \psi\gamma_n\gamma_f\gamma_m / \gamma_c \quad (2)$$

отождествляют с нормируемыми коэффициентами запаса системы.

Нетрудно заметить, что коэффициент K не очень сильно отличается от единицы (чаще всего он колеблется в интервале 1,15–1,25, хотя для некоторых видов нагрузки и материала конструкции верхняя граница этого интервала может быть и большей), что предполагает совпадение расчетного предельного состояния с истинным пределом работоспособности конструкции, хотя в действительности это далеко не так. Истинные коэффициенты запаса превышают единицу заметно больше, поскольку фактический предел работоспособности отличается от той условности, которая выступает в роли расчетного предельного состояния. Оценка (2) не соответствует истинному запасу несущей способности системы главным образом потому, что реальное исчерпание несущей способности обычно связано с рядом нелинейных эффектов, которые заметно перераспределяют усилия в системе при приближении к ее разрушению. Вследствие такого перераспределения оценка, полученная с использованием (2) и вычисленная с использованием совершенно другой расчетной модели (как правило, линейной), может оказаться как завышенной, так и заниженной.

Таким образом, мы видим, что использование метода расчетных предельных состояний не только не определяет поведение системы в эксплуатационной

⁷ В последнее время его часто называют характеристическим значением.

стадии, о чем речь шла выше, но и достаточно приближенно оценивает тот запас, который отделяет переход от расчетного (чаще всего условного) предельного состояния к истинному пределу несущей способности системы.

Для более уверенных суждений требуется выполнение экспериментов и/или специальных расчетов, которые выполняются методами, отличными от приведенных в нормативных документах.

В случае, когда речь идет о сооружении, находящемся под действием единственной нагрузки, определение коэффициента запаса на основе физического эксперимента или численного моделирования очевидно. Необходимо путем увеличения расчетной нагрузки F_d до максимально возможного значения F^* довести систему или ее математическую модель до «разрушения» и определить реальный коэффициент запаса k как отношение

$$k = F^* / F_d. \quad (3)$$

Использование этого метода в случае, когда сооружение подвержено действию нескольких нагрузок, связано с предположением, что все нагрузки меняются пропорционально одному параметру, а соотношение между ними при этом остается неизменным. Такая схема поведения нагрузки характерна далеко не для всех случаев, и часто необходимо считаться с тем, что соотношения между нагрузками меняются с ростом интенсивности нагружения.

Даже в простейших ситуациях полученный указанным выше способом коэффициент запаса k может не иметь четкого физического смысла. На рис. 5 эта ситуация продемонстрирована в пространстве нагрузок, где граница области состоит из точек, в которых соответствующая комбинация нагрузок является предельной.

Действительно, представим себе конструкцию, находящуюся под действием постоянной нагрузки G_0 от собственного веса и временной нагрузки P_0 . Коэффициент запаса $k' = 1,25$ для суммарной нагрузки равен отношению длин отрезков OC и OA и соответствует явно нереальному росту собственного веса на 25 %. Если же выделить возможный рост нагрузок как для собственного веса, например, на 10 % (то есть положить $k_g = 1,1$), что соответствует переходу в точку B , то для достижения критического состояния (точка D) временная нагрузка должна вырасти намного больше. Естественно, что при таком рассуждении, графическая иллюстрация которого представлена на рис. 5, довольно скромный коэффициент запаса 1,25 предстает совсем в другом свете, поскольку k_p намного превышает величину 1,25.

Результат, разумеется, будет сильно зависеть от вида границы области несущей способности, и при другой ее конфигурации все коэффициенты запаса могут оказаться такими, что значение $k_p P_0$ будет существенно меньшим. Но важно отметить сам факт недостаточной точности анализа системы с привычной трактовкой коэффициента запаса.

Если к сказанному выше добавить, что переход к фактическому состоянию разрушения связан с изменением характера работы конструкции и обобщенные параметры сопротивления конструкции, определенные в большинстве случаев простым линейным расчетом, не просто умножаются на некоторый коэффициент типа коэффициента безопасности по материалу или по

нагрузке, то станет очевидной условность самого понятия коэффициента запаса по типу (2). В действительности перераспределение напряжений в случае нелинейной работы материала вблизи предельных значений его прочности зачастую в разы меняет оценку (2).

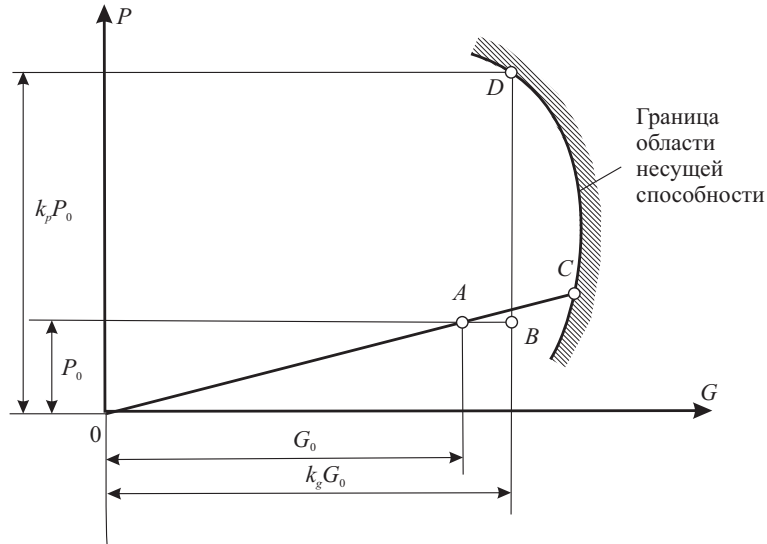


Рис. 5. Коэффициент запаса в случае двух нагрузок

Таким образом, следует констатировать, что и от действительного состояния разрушения расчетное предельное состояние отделено некоторым барьером, величина которого чаще всего неизвестна.

Не все учитывается проектными расчетами

Известны многочисленные случаи значительного превышения расчетного значения некоторой нагрузки, но, тем не менее, не приводившие к аварийному разрушению. Возникает естественный вопрос о причинах этого явления.

Чаще всего это связано с тем, что редкая конструкция рассчитывается на действие только одной нагрузки. При этом коэффициент надежности по нагрузке γ_f учитывает далеко не все факторы, определяющие реальную картину изменения нагрузок во времени. Так, для крановой нагрузки строительные нормы и правила дают значение $\gamma_f = 1,2$, что очень далеко отстоит от реальности. Нормируемые величины γ_f определены для «нагрузки вообще» и не учитывают целого ряда дополнительных случайных параметров, появляющихся при анализе способа реализации такой нагрузки в определенной конструкции.

Для крановой нагрузки, например, важным может быть такой фактор, как вероятность вполне конкретного положения на линии влияния, когда может реализоваться расчетное усилие в конструкции. Если же учитывать совместное действие нескольких кранов, то оказывается, что вероятность совпадения их расчетных позиций в разы меньше, что резко снижает средний уровень усилия в конструкции.

Упомянутые особенности реального нагружения конструкций в весьма малой степени учитываются и значениями коэффициентов сочетаний нагрузок, которые также подсчитаны для «нагрузок вообще». При этом зачастую создаются дополнительные резервы несущей способности.

Можно предположить, что такие дополнительные резервы дают нам возможность игнорировать некоторые нормативные ограничения. Но факт нарушения предельного неравенства говорит о том, что конструкция стала работать в условиях, которые не предполагались проектировщиком и, следовательно, им не обсчитывались и не анализировались. В этих условиях отсутствуют гарантии безопасной эксплуатации. Это нежелательно, даже если авария и не произошла, особенно если учесть, что величина отмеченных выше запасов является оценочным, а отнюдь не гарантированным фактом. Такими запасами многие конструкции могут и не обладать, в особенности в настоящее время при общем снижении качества изготовления, монтажа и тщательности контроля свойств материалов.

Следует также иметь в виду, что помимо четко предсказуемых нагрузок и воздействий всегда существует возможность реализации некоторого не предусмотренного ни нормативными документами, ни прогнозом проектировщика случайного воздействия на объект проектирования. Причем в этом контексте понятие «воздействие» понимается очень широко и включает в себя такие, например, события, как грубый брак, ошибка персонала, необычное для данной местности природное явление и т. п., одним словом, всяческие «сюрпризы», которые ведут к существенным последствиям. Эти воздействия, безусловно, не являются массовыми, и поэтому затруднен их статистический анализ, а также учет их влияния в вероятностном анализе надежности. Возможная правдоподобная гипотеза вероятностного типа состоит в том, что их реализация равновероятна в течение времени и что они являются весьма редкими явлениями. Они настолько редки, что обычно не попадают в ту выборку, на основе которой определяются статистические параметры (рис. 6, а), или же вообще не имеют вероятностной природы. Американский экономист Nicolas Nassim Taleb [15] назвал подобные события «черными лебедями»⁸. А с точки зрения этих «сюрпризных» событий важной характеристикой объекта проектирования является его уязвимость.

Уязвимость – это параметр, характеризующий возможность нанесения рассматриваемой системе повреждений любой природы теми или иными внешними средствами или факторами. Уязвимость неразрывно связана с известной характеристикой «живучесть» и с дополнительно предложенной в работе [6] характеристикой «мобилизованность».

Применительно к строительным объектам понятие живучести начало развиваться существенно позже, чем в других областях техники. Связано это с осознанием того факта, что всегда существует возможность появления некоторых неучтенных аварийных воздействий, которые могут создать локальные

⁸ Ювенал говорил: «*gala avis in terris nigroque simillima cygno*» (лат.) – «хороший человек так же редок, как чёрный лебедь», поскольку существовала гипотеза о том, что все лебеди белые. Это было верно, пока в 1700 г. не был обнаружен черный австралийский лебедь...

разрушения. В первую очередь эта парадигма реализовалась применительно к сейсмостойкому строительству (хотя сам термин «живучесть» мог и не применяться), и, в частности, здесь появилась идея выделения так называемых *главных несущих конструкций*, безотказность которых обеспечивает здание или сооружение от полного разрушения при аварийных воздействиях, даже если его дальнейшее использование по назначению окажется при этом невозможным без капитального ремонта.

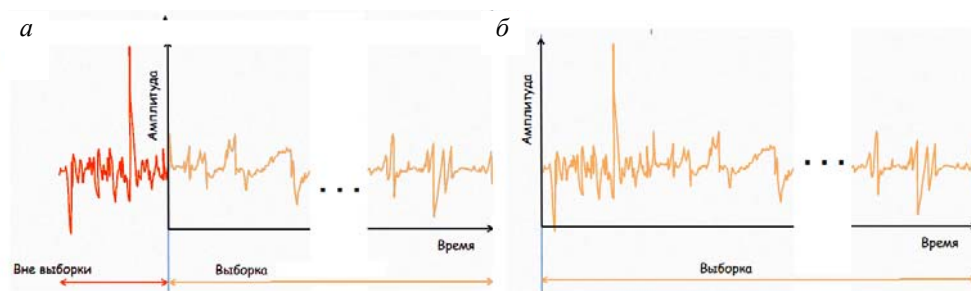


Рис. 6. К вероятностной оценке очень редких событий

Можно полагать, что живучесть конструкции обеспечена, если первичный локальный отказ приводит к разрушению лишь на ограниченной области, допускаемый размер которой регламентирован нормами или заранее согласован с заказчиком.

Указанные требования реализуются в зависимости от рассматриваемой аварийной ситуации, когда используются две заметно отличающиеся друг от друга стратегии, которые определяются степенью информированности о причинах возникновения такой ситуации. В общем случае необходимо рассмотреть оба варианта: или случай установленного (прогнозируемого) аварийного воздействия, например взрыв или наезд транспортного средства, или локальное разрушение от неустановленных причин, например таких, как ошибки персонала или грубый брак в работе.

При разработке защитных мер по снижению риска от аварийных воздействий используют одну или несколько стратегий (рис. 7):

- а) предотвращение появления воздействия, снижение вероятности появления и/или величины воздействия;
- б) защита конструкции путем уменьшения эффекта от эпизодического воздействия;
- в) обеспечение достаточной живучести.

Явное требование обеспечения живучести впервые было предложено ввести при разработке проекта норм Украины [5] еще в 1998 г., но сделать это удалось после продолжительных дискуссий и бюрократической волокиты лишь в 2009 г.

Если, как обычно считается, живучесть является в некотором смысле пространственной характеристикой, показывающей, как локальное возмущение распространяется по пространству системы и может ли это локальное

разрушение получить непропорционально большое развитие «вширь», то в качестве мобилизованности будем рассматривать временную характеристику, показывающую, насколько система за время эксплуатации готова и способна среагировать на локальное во времени (импульсное) неожиданное возмущение.



Рис. 7. Стратегии учета аварийных ситуаций

Заметное отсутствие мобилизованности конструкции, как и недостаточная живучесть, должны служить поводом к повышенному вниманию и использованию некоторых защитных мероприятий.

Эти мероприятия сегодня не кодифицированы, они в большей степени относятся к искусству проектирования, чем к строгому анализу, но важность проблемы уязвимости (как живучести, так и мобилизованности) уже осознана профессиональным сообществом и скорее всего найдет свое отражение в следующем поколении норм проектирования. Вся история развития норм проектирования свидетельствует о том, что новые знания или осознание ранее не учитывавшихся опасностей в конце концов находят свое отражение в нормативных документах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Расчет* строительных конструкций по предельным состояниям / В.А. Балдин, И.И. Гольденблат, В.И. Коченов, М.Я. Пильдиш, Э. Таль. – М. : Стройиздат, 1951. – 272 с.
2. *Иосилевский, Л.И.* Практические методы управления надежностью железобетонных мостов / Л.И. Иосилевский. – М. : НИЦ «Инженер», 1999. – 295 с.
3. *Лоллейт, А.Ф.* О коэффициенте прочности железобетонных сооружений / А.Ф. Лоллейт // Записки Московского архитектурного общества. – 1904. – Вып. 1. – С. 1–16.
4. *Лоллейт, А.Ф.* Новый проект норм / А.Ф. Лоллейт // I Всесоюзная конференция по бетону и железобетону 20–25 апреля в Москве : труды конференции. – М., 1930.

5. *Перельмутер, А.В.* Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. – 256 с.
6. *Перельмутер, А.В.* Об оценке уязвимости строительных конструкций / А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 5. – С. 5–14.
7. *Рошефор, Н.И. де.* Иллюстрированное Урочное положение: Пособие при составлении и проверке смет, проектировании и исполнении работы / Н.И. де Рошефор. – Пятое исправленное издание. – СПб. : Типография Училища глухонемых, 1910. – 694 с.
8. *Стрелецкий, Н.С.* Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений / Н.С. Стрелецкий. – М. : Стройиздат. 1947. – 92 с.
9. *Хоциалов, Н.Ф.* Запасы прочности / Н.Ф. Хоциалов // Строительная промышленность. – 1929. – № 10. – С. 840–844.
10. *Adams, H.* The Practical Designing of Structural Ironwork / H. Adams. – London : E. & F.N. Spon, 1894.
11. *Alasdair, N. Beal.* Thomasons Leeds. A history of the safety factors / N. Beal. Alasdair // The Structural Engineer. – 2011. – V. 89. – № 20.
12. *Freudenthal, A.M.* The safety of Structures / A.M. Freudenthal // Proc. ASCE, 1947. – V. 112. – №1. – P. 125–180.
13. *Maier, M.* Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen / M. Maier. – Berlin : Springer Verlag, 1926. – 73 p.
14. *Mungan, I.* Structural engineering and structures from antiquity to the present / I. Mungan // Proc. IASS Symposium 2001, Nagoya, Japan. – P. 1–3.
15. *Nassim, Nicolas Taleb.* The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable / Nicolas Taleb Nassim. – New York : Random House, 2007. – 394 p.
16. *Plot, M.* Nor sur la nation de coefficient de securite / M. Plot // Annals des points et chaussées. – Paris. – 1936. – V. II. – Fase 7.
17. *Whitney, Charles S.* Bridges; a study in their art, science and evolution / Charles S. Whitney. – New York : W.E. Rudge, 1929. – 400 p.
18. *Wierzbicki, W.* Safety of Structures as a Probability Problem / W. Wierzbicki. – Warsaw : Przegląd Techniczny, 1936. – 690 p.

REFERENCES

1. *Baldin V.A., Gol'denblat I.I., Kochenov V.I., Pil'dish M.Ya., Tal' E.* Raschet stroitel'nykh konstrukttsii po predel'nym sostoyaniyam [Limit state method]. Moscow : Stroyizdat Publ. 1951. 272 p. (rus)
2. *Iosilevskii L.I.* Prakticheskie metody upravleniya nadezhnost'yu zhelezobetonnykh mostov [Practical methods of reliability control of reinforced concrete bridges]. Moscow : NITs 'Inzhener', 1999. 295 p. (rus)
3. *Loleit A.F.* O koeffitsiente prochnosti zhelezobetonnykh sooruzhenii [Safety factor in reinforced concrete structures]. *Zapiski Moskovskogo arkhitekturnogo obshchestva*, 1904. V. 1. Pp. 1–16. (rus)
4. *Loleit A.F.* Novyi proekt norm [New project regulations]. Proc. 1st All-Union Sci. Conf. on concrete and reinforced concrete. Moscow.: 1930.
5. *Perel'muter A.V.* Izbrannye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitel'nykh konstrukttsii [Problems of reliability and safety of buldings]. 3rd ed. Moscow. : ASV Publ., 2007. 256 p. (rus)
6. *Perel'muter A.V., Pichugin S.F.* Ob otsenke uyazvimosti stroitel'nykh konstrukttsii [Estimation of sensitivity of buildings]. *Magazine of Civil Engineering*, 2014. No. 5. Pp. 5–14. (rus)
7. *Roshefor N.I.* Illyustrirovannoe Urochnoe polozhenie: Posobie pri sostavlenii i proverke смет, proektirovanii i ispolnenii raboty [Illustrated building regulation: design and project manual]. St-Petersburg, Tipografiya Uchilishcha glukhonemykh, 1910. 694 p. (rus)
8. *Streletskii N.S.* Osnovy statisticheskogo ucheta koeffitsienta zapasa prochnosti sooruzhenii [Basics of statistical accounting for safety factor]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1947. 92 p. (rus)

9. *Khotsialov N.F.* Zapasy prochnosti [Safety factor]. *Stroitel'naya promyshlennost'*. 1929. No. 10. Pp. 840–844. (rus)
10. *Adams H.* The Practical Designing of Structural Ironwork. London: E. & F.N. Spon, 1894.
11. *Alasdair N. Beal, Leeds T.* A history of the safety factors. *The Structural Engineer*, 2011. V. 89. No. 20.
12. *Freudenthal A. M.* The safety of structures. *ASCE Transactions*, 1947. V. 112. Pp. 125–180.
13. *Maier M.* Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen. Berlin : Springer Verlag, 1926. 73 p.
14. *Mungan I.* Structural engineering and structures from antiquity to the present // *Proc. IASS Symposium 2001*, Nagoya, Japan. Pp. 1–3.
15. *Nassim Nicolas Taleb.* The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable. New York : Random House, 2007. 394 p.
16. *Plot M.* Nor sur la nation de coefficient de securite // *Annals des points et chaussées*. Paris : 1936. V. II. Fase 7.
17. *Whitney Charles S.* Bridges: a study in their art, science and evolution. New York : W.E. Rudge, 1929. 400 p.
18. *Wierzbicki W.* Safety of Structures as a Probability Problem. Warsaw : Przegląd Techniczny, 1936. 690 p.