



ПРЕДПОСЫЛКИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XX ВЕКА

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01035,
<https://rscf.ru/project/23-79-01035/>*

Теория надежности строительных конструкций как фундаментальная наука в современном представлении возникла в 1950–1960-е годы XX века. Ее формированию способствовало развитие общей технической теории надежности, а также развитие норм проектирования строительных конструкций и строительной механики в целом. Предпосылки к формированию современной теории надежности строительных конструкций возникли в начале XX века, если вынести за скобки общую историю развития науки и накопленный строительный опыт. Более того, отдельные исследования в инженерно-строительной отрасли опережали общетехнические положения теории надежности в рассматриваемый период времени. В данной статье приведен научный литературный обзор исследований, которые послужили базисом для теории надежности строительных конструкций в вероятностной постановке.

Теория надежности, история, строительные конструкции, сооружения, здания, безопасность, вероятностное проектирование.

В статье Райерсона [1] предлагается деление истории развития работ по теории надежности в США на этапы. Таких этапов условно он отмечает четыре: 1930–1940 гг. – выработка стандартов, 1940–1950 гг. – разработка статистических методов текущего и приемочного контроля за качеством продукции; 1950–1960 гг. – постановка задач и систематическое изучение вопросов надежности элементов; с 1960 г. наметилась тенденция изучения надежности систем на всех стадиях их создания – от проектирования до эксплуатации включительно.

Исследования по вероятностным методам в теории надежности, которые отражают ее текущее состояние, начались еще с 1920-х годов, причем именно в строительной отрасли. В 1926 г. М. Майер предложил вместо расчета по допускаемым напряжениям использовать вероятностные методы для выбора значений параметров, вводимых в расчет. В 1929 г. Н.Ф. Хоциалов, принимая во внимание изменчивость основных параметров, предложил вести проектирование конструкций, исходя из некоторой регламентируемой вероятности аварийного отказа конструкции. Как отмечено в [2], Н.Ф. Хоциалов, работая на крупнейшей в то время стройке «Свирь ГЭС», обратил внимание на неизбежный разброс кубиковой прочности бетона, укладываемого в плотину электростанции. Считая максимальную гидростатическую нагрузку на плотину детерминированной, а прочность бетона подчиняющейся нормальному закону распределения, он вывел формулу для необходимого запаса прочности, гарантировавшего неразрушаемость с заданной заранее обеспеченностью, достаточно близко к единице. Однако формулировка Н.Ф. Хоциалова «проектировать с учетом возможно-

сти аварии» встретила сильное сопротивление, и его идеи были надолго отвергнуты.

В 1935 г. инженер Я.М. Туровер ввел понятие «надежность» применительно к электрическим системам и указал на необходимость количественной оценки надежности с привлечением теории вероятностей.

Существенным развитием идей М. Майера и Н.Ф. Хоциалова явились работы Н.С. Стрелецкого, М. Плото, В. Вержбицкого и А.М. Фрейденталя, 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. Первая работа А.М. Фрейденталя по вероятностной механике «Безопасность и рабочие напряжения» (на иврите) была опубликована в 1938 г. в журнале Ассоциации инженеров Палестины (Journal of Associates of Engineers of Palestine), а в 1947 году вышло одно из самых цитируемых изданий – книга «Safety of Structures» (1947). А.М. Фрейденталь справедливо отмечает: «Кажется абсурдным стремиться к все большему и большему совершенствованию методов анализа напряжений только для того, чтобы определить размеры конструктивных элементов. Его результаты впоследствии сравниваются с так называемым рабочим напряжением, полученным довольно грубым образом путем деления значений несколько сомнительных параметров материала при классических испытаниях материалов на еще более сомнительные эмпирические цифры, называемые коэффициентами безопасности».

В середине 30-х годов шведский инженер и математик В. Вейбулл, анализируя отказы, связанные с износом шарикоподшипников, предложил простую и удобную математическую модель для их описания, которая известна теперь как распределение Вейбулла. В 1943 году Б.В. Гнеденко нашел три класса распределений вероятностей, один из которых совпадал с распределением Вейбулла. В 1945 году публиковались работы об использовании нормального распределения в качестве моделей описания прочности и применении статистической теории экстремальных значений для описания разрушения материалов, в том числе анализ логнормального распределения вероятностей. Чуть позже, в 1953 году, Бенджамин Эпштейн и Милтон Собел предложили экспоненциальное распределение в качестве модели отказов элементов.

Как отмечает А.В. Перельмутер, «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».

Важной особенностью периода 1940–1950-х годов стало появление метода предельных состояний. В 1943 году при Техническом совете Наркомстроя была организована комиссия по унификации методов расчета строительных конструкций, впоследствии перешедшая в ЦНИПС, для разработки единого метода расчета строительных конструкций из всех материалов и научного обоснования величин коэффициентов прочности. В Наркомстрой в 1944 г. И.И. Голденблат, С.Н. Добрынин и А.Н. Попов внесли предложение о замене единого коэффициента запаса системой коэффициентов перегрузки и качества материала [3]. В 1947 году комиссия по разработке метода расчета по предельным состояниям под руководством зам. директора ЦНИПС В.М. Келдыша и членов: В.А. Балдина, А.А. Гвоздева и др. приступила к работе. Комиссия сумела сблизить экспериментальное и теоретико-экспериментальное направления разработки норм и выработать общие предложения, составившие «Расчет по предельным состояниям». Общий коэффициент запаса был расчленен на три коэффициента: однородности, перегрузки и условий работы, учитывающих соответственно возможные отклонения характеристик прочности материала, случайные превышения нагрузок и суммарно все другие, менее значимые факторы. Исходя из этого, комиссия установила три предельных состояния, обязательных для провер-

ки расчетом: по исчерпанию несущей способности, по предельной деформации и по образованию трещин. 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».

Вопросам анализа коэффициента запаса и вероятностно-статистическому обоснованию проектирования строительных конструкций посвящены фундаментальные исследования Николая Станиславовича Стрелецкого. В работе «Новые идеи и возможности в металлических промышленных конструкциях» (1934 г.) он отмечает «ненужные конструктивные запасы все время держат в плену проектировщика: все время проектировщик чувствует, что стропильная ферма недостаточно полнокривна, мощна». В 1930–1940-е годы выходит ряд публикаций Н.С. Стрелецкого с исследованием коэффициентов запаса прочности и безопасностью, которые вылились в базовую книгу «Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений» (1947 г.). В данной работе отмечается, что одним из первых основоположников статистических методов в строительстве является инженер Василий Васильевич Кураев, который выполнил большой объем работ по подбору распределений вероятностей для нагрузок, воздействий и физико-механических свойств строительных материалов. Также отмечается ключевая идея: «одинаковый коэффициент запаса в общем случае не характеризует равной прочности сооружения. Последняя определяется равной величиной гарантии неразрушимости, более первичным понятием по сравнению с коэффициентом запаса».

В издании 1947 года уже отмечается, что А.Р. Ржаницын вывел коэффициент безопасности, по своей сути отражающий нынешний показатель – индекс надежности β . В 1940–1950-е годы А.Р. Ржаницын публикует ряд исследований, которые в 1954 году составят раздел книги «Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов». В XIV главе обсуждаются вопросы определения вероятности разрушения конструкций, вводится вероятностное понятие характеристики безопасности γ (эквивалент индекса надежности β), приводятся примеры, когда использование прямых вероятностных расчетов позволяет получить более экономичные решения, чем использование коэффициентов запаса. В качестве итога главы А.Р. Ржаницын отмечает: «Статистические методы расчета на безопасность еще только начали развиваться. Однако именно они, по нашему мнению, наряду с уточнением формул и методов, определяющих разрушающие состояния, должны лечь в основу новых усовершенствованных методов расчета сооружений».

Внедрение метода расчетных предельных состояний растянулось на десятки лет. Как отмечает А.В. Перельмутер, «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». В предисловии к британскому стандарту CP1102 утверждается, 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».

В 1949 году в США была сформирована «Профессиональная группа по вопросам контроля качества Института инженеров электроники и электротехники» (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE), название которой в 1954 году было изменено на «Профессиональная группа института радиоинженеров по вопросам надежности и контроля качества» (IRE, Institute of Radio Engineers). Объединение и сегодня занимается исследованием проблем надежности, в том числе строительных конструкций, под названием IEEE Reliability Society.

21 августа 1952 года сформирована «Консультативная группа по надежности электронного оборудования» The Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment (AGREE). Коппола в исследовании [4] отмечает роль данной группы в формировании теории надежности как научной дисциплины: «Официальное объявление о рождении теории надежности было представлено в отчете AGREE от 4 июня 1957 года. Отчет предоставил вооруженным силам уверенность в том, что надежность может быть определена, развита и доказана».

В начале 1950-х годов вооруженные силы США профинансировали ряд мероприятий по повышению надежности вакуумных ламп. Военно-морской флот

заключил контракт с компанией Aeronautical Radio Inc. (ARINC) на сбор и анализ данных о неисправностях силовых трубок, а затем на отправку производителям рекомендаций по повышению их надежности. Одним из важных вкладов, внесенных ARINC (Aeronautical Radio Inc.) в формирующуюся дисциплину проектирования надежности, стала публикация в 1952 году отчета «Процентная ставка при изучении надежности» (Terms of Interest in the Study of Reliability). Он оказал значительное влияние на принятое определение надежности в терминах вероятностей. Сегодня это может показаться странным, но в то время существовало значительное сопротивление признанию стохастической природы времени до отказа и, следовательно, надежности. Важной особенностью деятельности ARINC стало формирование ключевых терминов и определений в области теории надежности, а также отражение стохастической природы показателей надежности.

Советский ученый Игорь Ушаков отмечает, что первый фундаментальный скачок в развитии теории надежности произошел в 50-е годы XX века и был связан с Корейской войной (1950–1953 гг.): «советские и американские „ястребы“ соревновались в гонке вооружений. Оборудование становилось все более изощренным, все более сложным и, как следствие, все более ненадежным. Обе стороны теряли огромные деньги из-за ненадежности, и, конечно, американцы были первыми, кто начал разрабатывать теорию надежности: они всегда умели лучше считать деньги».

В 1950 году Министерство обороны США сформировало группу под названием «Консультативная группа по надежности электронного оборудования» (Advisory Group on the Reliability of Electronic Equipment, AGREE) для изучения методов повышения надежности военной техники. Эта группа рекомендовала три основных способа работы: повысить надежность компонентов; установить требования к качеству и надежности для поставщиков; собрать полевые данные и найти первопричины отказов.

Первая конференция по контролю качества и надежности (электроники) «National Symposium on Quality Control and Reliability in Electronics» была проведена 12–13 ноября 1954 года в Нью-Йорке, и ее материалы превратились в журнал, который издается до сих пор (IEEE Transactions on Reliability). Техническая литература по надежности получила широкое распространение в начале 1950-х годов как с практическим уклоном (надежность вакуумных ламп, тематические исследования и методы проектирования для повышения надежности устройств), так и с теоретическим, более сложным с математической точки зрения, уклоном (например, работа Вейбулла о статистическом распределении).

В 1960-х происходит качественный переход к анализу надежности элементов и систем не только по числу зафиксированных отказов, но и в соответствии с прогнозом надежности на базе математических вероятностно-статистических методов. В 1960-х вводится стандарт MIL-STD-781 Министерства обороны США «Handbook for Reliability Test Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development, Qualification, and Production».

Одним из первых успешных учебных изданий по теории надежности в технике, по мнению И.А. Ушакова, стала книга Игоря Базовского «Надежность. Теория и практика» 1961 года. В переводном издании от 1965 года отмечается, что «До недавнего времени различные вопросы надежности рассматривались лишь в журнальных статьях, рассчитанных на узкий круг специалистов. Предлагаемая читателю книга американского инженера И. Базовского является одной из первых попыток систематического изложения теории надежности». В издании уделяется большая роль определению термина надежность, описанию различных видов отказов, износу элементов и моделированию систем.

Первыми изданиями в СССР по теории надежности технических систем являлись сборники переводов зарубежных научных статей по проблеме анализа надежности радиоэлектроники [5]. Отдельные самостоятельные исследования по теории надежности технических систем существовали в формате научных статей в СССР уже в начале 50-х годов. В 1958 году состоялась Первая Всесоюзная конференция по надежности, на которой председательствовал член-корреспондент Академии наук В.И. Сифоров. После конференции в одном из судостроительных НИИ в Ленинграде был организован отдел надежности, которым руководили Н.А. Романов и И.М. Маликов. Одним из первых ключевых изданий по теории надежности в СССР стала работа И.М. Маликова, А.М. Половко и др. «Основы теории и расчета надежности» 1959 г.

Дальнейшее развитие уже сформировавшейся науки можно найти в очерке профессора В.Д. Райзера [6].

Литература

1. Ryerson, C. M. Reliability testing theory based on the Poisson distribution / C. M. Ryerson // Proc. 4 th Nat. Sympos. Reliabil. and Qual. Control Electron (Washington, D. C, 1958). – New York, N. Y., Inst. Radio Engrs. – 1958. – P. 3–18.
2. Базанова, И. А. Математические методы расчета защитных сооружений с заданным уровнем надежности / И. А. Базанова, М. М. Орынбет // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – № 2 (68). – 2018. – С. 21–26.
3. Звездов, А. И. История строительных норм проектирования в России и задачи их совершенствования / А. И. Звездов, И. И. Ведяков, К. П. Пятикрестовский // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 11. – С. 28–34.
4. Coppola, A. Reliability engineering of electronic equipment: a historical perspective / A. Coppola // IEEE Trans Reliab. – 1984. – Vol. R-33(1). – P. 29–35.
5. Малогабаритная радиоаппаратура: Вопросы конструирования, производства и эксплуатации: Сборник переводов статей из иностр. периодич. литературы / под редакцией члена-корреспондента АН СССР В. И. Сифорова. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1954. – 372 с.
6. Райзер, В. Д. Очерк развития теории надежности и норм проектирования строительных конструкций / В. Д. Райзер // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – № 2. – С. 29–35.

S.A. Solovov

Vologda State University

PREREQUISITES FOR STRUCTURAL RELIABILITY THEORY FORMATION IN THE FIRST HALF OF THE TWENTIETH CENTURY

*The research was funded by Russian Science Foundation (RSF) No. 23-79-01035
<https://rscf.ru/en/project/23-79-01035/>*

The structural reliability theory as a fundamental science in the modern view arose in the 1950s and 1960s of the twentieth century. Its formation was facilitated by the development of the general technical theory of reliability, as well as the development of standards for the design of structures and structural mechanics in general. The prerequisites for the formation of a modern theory of reliability of structures arose at the beginning of the twentieth century if we put aside the general history of the development of science and the accumulated construction experience. Moreover, some studies in the engineering and construction industry were ahead of the general technical provisions of the theory of reliability in the period under review. This article presents a scientific literature review of studies that served as the basis for the theory of structural reliability in a probabilistic formulation.

Reliability theory, history, structures, buildings, safety, probabilistic design.