

Обеспечение безопасности – приоритетная цель при проектировании, строительстве и эксплуатации строительных конструкций зданий и сооружений. Основным нормативным документом в области обеспечения безопасности строительных конструкций зданий и сооружений является Федеральный Закон РФ №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», вступивший в силу с 30 декабря 2009 года. В соответствии со статьей 5 Закона, безопасность зданий и сооружений, а также связанных со зданиями и сооружениями процессов проектирования, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации и утилизации (сноса) обеспечивается посредством установления соответствующих требованиям безопасности проектных значений параметров зданий и сооружений и качественных характеристик в течение всего жизненного цикла здания или сооружения, реализации указанных значений и характеристик в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта и поддержания состояния таких параметров и характеристик на требуемом уровне в процессе эксплуатации, консервации и сноса. Установление проектных параметров является комплексной научно-технической проблемой, т.к. практически все проектные параметры, присутствующие в математических моделях предельных состояний, представляют собой случайные величины с различными типами неопределенности [1-7].

Для зданий и сооружений необходимо выполнить требование обеспечения механической безопасности. Механическая безопасность – это состояние строительных конструкций и основания здания или сооружения, при котором отсутствует недопустимый риск (ст. 2, п. 2, Закон РФ №384-ФЗ). Риск – это комбинация вероятности или частоты возникновения события и величины ущерба [8-11]. С позиции теории принятия решений, это ожидаемая величина всех нежелательных последствий, т.е. сумма всех ущербов от какого-либо события с учетом вероятностей их наступления, как отмечено в Национальном стандарте РФ ГОСТ Р ИСО 13824-2013 «Практические аспекты менеджмента риска. Общие принципы оценки риска систем, включающих строительные конструкции».

Таким образом, задачи проектирования элементов строительных конструкций и оснований зданий и сооружений напрямую связаны с положениями теории вероятностей и математической статистики в области анализа изменчивости данных,

входящих в расчетные математические модели предельных состояний. Наиболее эффективным инструментом в решении задач такого рода является теория надежности строительных конструкций.

Как отмечено в актуальном исследовании по теории надежности строительных конструкций [12], «вероятностный анализ надежности конструкций в настоящее время является ведущим методом в области оптимизации и проектирования строительных конструкций, поскольку он обеспечивает рациональную обработку неопределенностей в исследованиях такого рода».

На текущий момент в РФ надежность строительных конструкций обеспечивается за счет выполнения требований (критериев) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы (метод предельных состояний), в соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». Как отмечает в актуальной научной статье [7] ведущий в РФ ученый в области теории надежности строительных конструкций, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой сопротивления материалов НИУ МГСУ О.В. Мкртычев, **«метод предельных состояний позволяет обеспечить необходимый уровень надежности зданий и сооружений, что подтверждается опытом проектирования, строительства и эксплуатации. Однако данный метод имеет ряд недостатков, например, невозможно сказать, какой уровень надежности в количественном измерении формируется в результате применения норм проектирования, одинаков ли этот уровень надежности для зданий и сооружений различных конструктивных схем и выполненных из различных материалов».**

Целью настоящей работы является исследование и разработка методов стохастического проектирования несущих элементов строительных конструкций зданий и сооружений при полной статистической информации (на основе теории вероятностей и математической статистики) и ограниченной статистической информации (на основе новых математических теорий анализа данных: теории нечетких множеств, теории выпуклых множеств, теории свидетельств и др.).

Особую актуальность и своевременность работы можно обосновать следующими тезисами:

1. Согласно статистической отчетности Минстроя РФ, суммарный срок эксплуатации зданий и сооружений превышает нормативный более чем в два раза. Для того, чтобы избежать неконтролируемых отказов и аварий зданий и сооружений, необходимо оперативно и достоверно выполнять оценку и анализ их уровня безопасности, в т.ч. с количественным ее выражением для составления ранжированных списков наиболее ненадежных конструкций;

По расчетам ИНП РАН, объем многоквартирного жилищного фонда, который начнет достигать условного срока предельной эксплуатации и требовать обновления в агломерациях, возрастет к 2040 году с текущих 2 млн кв. м в год до 5 млн кв. м в год. Таким образом, к 2035 году накопленный объем жилья, предполагаемого к выбытию в крупнейших городах и их спутниках, увеличится до 49 млн кв. м (3,5% от текущего жилищного фонда агломераций), а к 2040-му возрастет до 74 млн кв. м (или 5,3% от текущего жилищного фонда агломераций) рис.1.

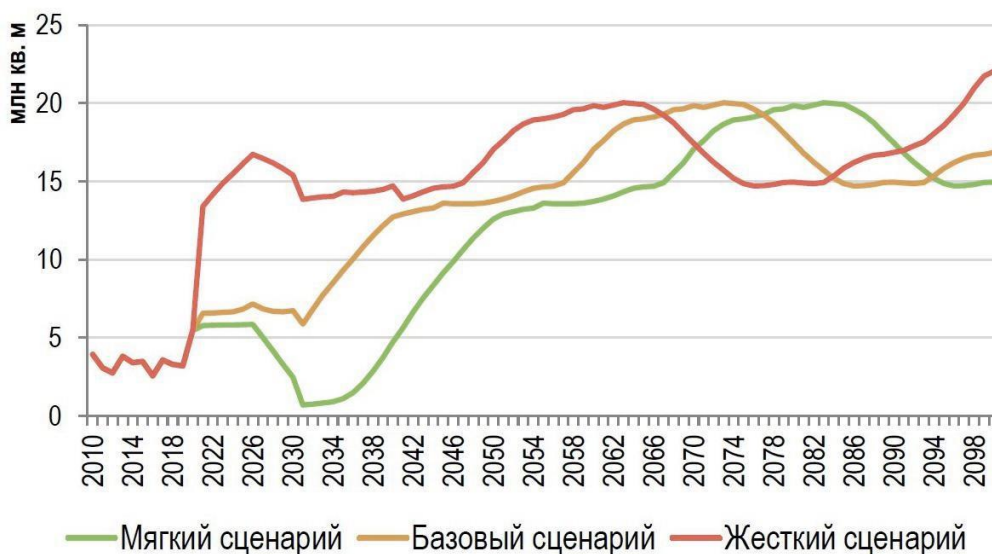


Рисунок 1 - Оценка объемов ежегодно выбывающего жилфонда МКД России в сверхдолгосрочной перспективе при различных сценариях сроков службы домов (Фото: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН (2023))

2. В ходе проведения Специальной Военной Операции растет количество поврежденной инженерной инфраструктуры (рис.2) на новых территориях Российской Федерации. Необходимость быстрой и достоверной оценки надежности и остаточного ресурса поврежденных зданий будет ключевой задачей при

восстановлении зданий и сооружений, т.к. полное вероятностное обследование и обоснование надежности повлечет за собой колоссальные финансовые затраты;



Рисунок 2– Поврежденный и восстановленный вид здания [102]

3. Уровень надежности возведенного объекта строительства отличается от проектного уровня надежности: как в большую, так и в меньшую сторону. Количественная оценка уровня надежности сразу после возведения сооружения позволит уточнить срок эксплуатации до капитального ремонта, принять результаты и оценить качество строительно-монтажных работ, что крайне актуально в условиях большого числа недобросовестных подрядчиков.

К.И. Ерёмин в своих работах [103] **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, [104] распределяет процентное отношение причин аварий (технических и человеческих факторов) согласно диаграмме на рис.3.

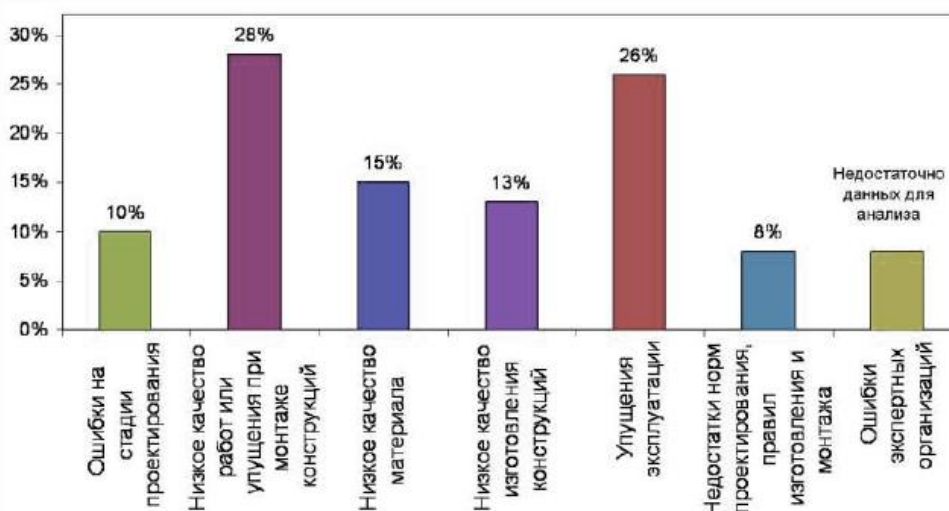


Рисунок3 – Анализ причин аварий по [104] **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

По [105] вероятности строительных аварий определяются согласно табл. 1.

Таблица 1– Данные о вероятности строительных аварий [105]

Значение вероятности отказа (аварии)	Доля сооружений	Для зданий	
		одноэтажных	многоэтажных

Теоретическое	1×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-6}
Фактическое	2×10^{-4}	$8 \times 10^{-5} \dots 7 \times 10^{-4}$	5×10^{-4}
Допустимое по расчету	2×10^{-5}	$2 \times 10^{-6} \dots 1 \times 10^{-5}$	8×10^{-6}
Превышение фактического над теоретическим	200	8...70	50

В [104**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] отмечается, что в среднем за год более 700 объектов строительства приостанавливается и около трети из них – по причине угрозы аварии.

При оценке экономического ущерба вначале следует представить данные доклада 2021 г. К.И.Ерёмина[104], представленные на рис.4, которые определяют группы последствий.

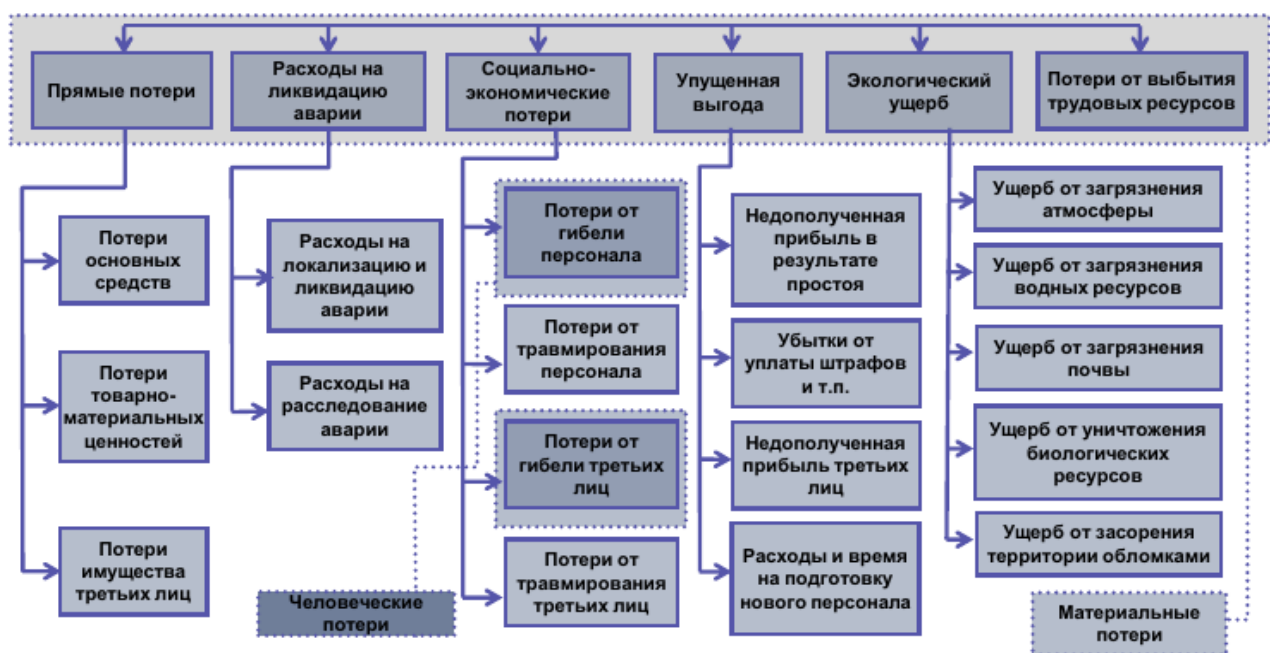


Рисунок 4 – экономический ущерб от аварий [104**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]

Не все группы последствий возможно экономически оценить, в том числе в долгосрочной перспективе. Сайт [b>Ошибка! Закладка не определена.106] предоставляет статистику Всероссийского союза страховщиков на 1 сентября 2019 г. по авариям/обрушениям на период с 2017 по 2019 гг., представленную в табл.2.

Таблица 2 – Статистика по авариям/обрушениям [106**Ошибка! Закладка не определена.**]на 01.09.2019

Год	Количество аварий/обрушений в процессе строительства	Количество аварий/обрушений зданий, сооружений	Размер ущерба собственника из-за ошибок при строительстве
2017	19	9	817 152 137,59
2018	31	19	575 926 099,42
2019	22	8	3 840 419 093,3

Научная новизна и главный ожидаемый результат научной работы – изменение парадигмы проектирования и обеспечения безопасности строительных конструкций,

построенной на полном вероятностном анализе с количественной оценкой надежности строительного объекта в виде его вероятности безотказной работы.

В первой главе работы приведены основные выкладки, позволяющие получить представление о математическом и геометрическом смыслах индекса надежности β (рис.5).

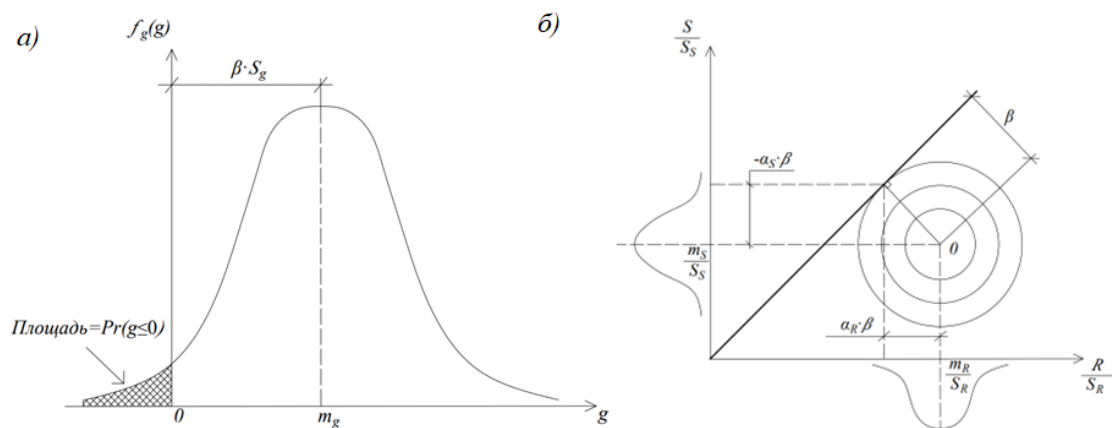


Рисунок 5 – Графическая интерпретация индекса надежности β

а) в одномерном случае; б) в двумерном случае

Важной особенностью первой главы является постановка вопроса о проблемах расчета индекса надежности для различных проектных ситуаций. Некоторые классические методы определения индекса надежности дают некорректные значения при высоконелинейных задачах. Численные примеры отражают тот факт, что для использования классических вероятностных методов проектирования необходима полная статистическая информация: законы распределения случайных величин и их параметры, информация о корреляции случайных величин и т.п. Неслучайно в Межгосударственном стандарте ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» указано, что «использование вероятностно-статистических методов допускается при наличии достаточных данных об изменчивости основных параметров в случае, если количество (длина ряда) данных позволяет проводить их статистический анализ (в частности, эти данные должны быть однородными и статистически независимыми)». Во многих практических задачах вероятностного проектирования такие данные получить невозможно или экономически нецелесообразно.

Также первая глава данной работы содержит общую информацию о концепции надежности в российских и зарубежных стандартах. Основным методом расчета

строительных конструкций в том и другом случае по-прежнему остается «полувероятностный» метод предельных состояний (или метод частных коэффициентов). Однако зарубежные исследования в области теории надежности строительных конструкций получили существенное развитие с начала 1990-ых годов (рис.6), в то время как отечественные разработки остались практически на том же уровне. Для обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации необходимо оперативно компенсировать разрыв в научно-исследовательских разработках и выйти на передовой уровень концепции понимания, обеспечения и управления безопасностью инженерной инфраструктуры.



Рисунок 6 – Структура развития методов расчета согласно Еврокод 0

Во второй главе работы рассматривается практическое применение методов оценки индекса надежности и вероятности безотказной работы, а также методы вероятностного проектирования на заданный уровень надежности. Данные методы подразумевают наличие полной статистической информации и позволяют получить точную оценку вероятности безотказной работы. Рассмотрены конкретные виды несущих элементов строительных конструкций: деревянная стропильная балка, железобетонная плита и грунтовое основание. Каждая задача рассматривается по мере возрастания сложности ее решения с включением дополнительных случайных величин как источников неопределенности. На численных примерах показаны алгоритмы и подходы к анализу влияния статистической изменчивости случайных величин на индекс надежности несущих элементов. Данный анализ может быть

использован для рекомендаций контроля качества строительной продукции на заводе или строительной площадке.

Третья глава работы содержит информацию о новых разработанных методах вероятностного проектирования несущих элементов строительных конструкций в случаях неполной (ограниченной) статистической информации.

Данные методы обладают высоким уровнем практической значимости в задачах оценки уровня безопасности и анализа надежности при обследовании зданий и сооружений, когда статистическая информация зачастую ограничена. Описаны методы формирования моделей случайных величин на основе p -блоков. Подробно рассмотрены аспекты создания моделей случайных величин на основе положений теории нечетких множеств. Передовым является применение технологий машинного обучения в задачах анализа надежности строительных конструкций при неполной статистической информации.

Разработана новая модель случайной величины, которая позволяет достоверно оценивать границы возможных функций распределения вероятностей физико-механических параметров строительных конструкций. Такая модель позволяет дать объективную оценку надежности, как при малом числе контрольных образцов (в интервальной форме), так и при полной статистической информации – в виде дискретной оценки. Эффективная комбинация неравенства Дворецкого-Кифера-Вульфовица, положений теории нечетких множеств и теории свидетельств Демпстера-Шефера для стохастического анализа при неполной статистической информации (рис.7). Научная гипотеза и предлагаемая модель успешно верифицированы путем проведения лабораторных и численных исследований контрольных образцов стали из исследуемой стропильной фермы покрытия.

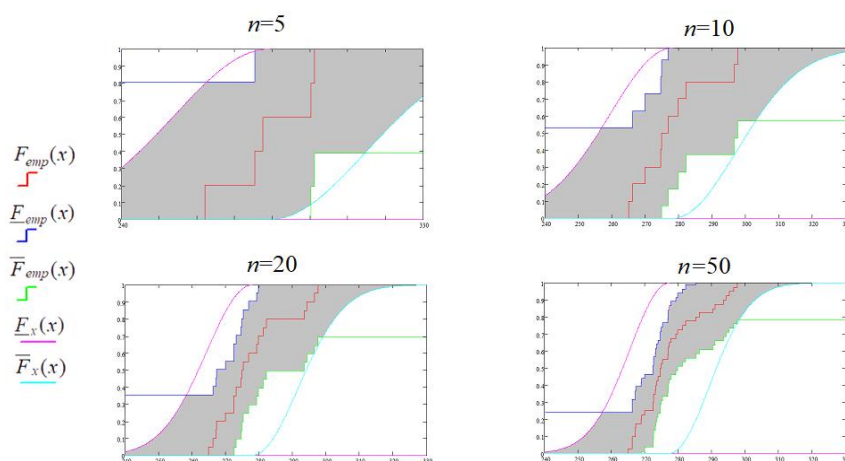


Рисунок 7 - Снижение области неопределенности р-блока с ростом числа испытаний

Другой важной особенностью предлагаемых методов является понимание уровня надежности конструкции в целом на стадии ее проектирования. Как видно из рис.8, приблизительно одинаковая масса стальной фермы и ее соответствие нормам не означает, что конструкции являются равнонадежными. Главным критерием оптимального проектного решения с экономической точки зрения является минимальная стоимость единицы индекса безопасности при выполнении требований его абсолютного значения на заданный период эксплуатации объекта.

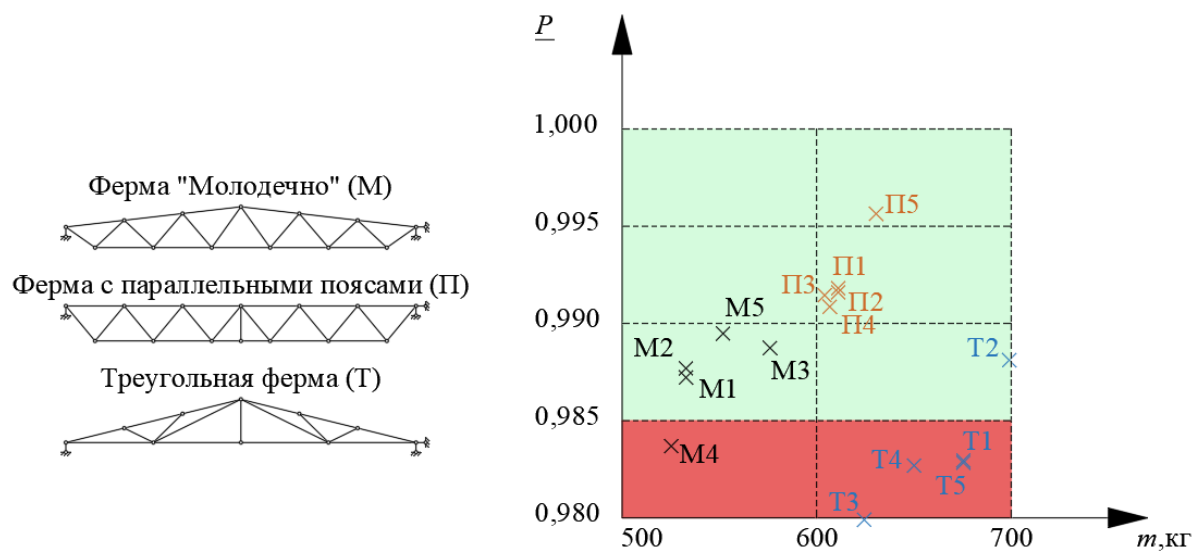


Рисунок 8 - График зависимости нижней границы вероятности безотказной работы и массы фермы

В заключении отмечены перспективные задачи развития вероятностных методов проектирования строительных конструкций.

Настоящая работа будет полезна специалистам в области проектирования, моделирования и анализа конструкций инженерной инфраструктуры, а также научно-педагогическим работникам, студентам и аспирантам для понимания новой парадигмы обоснования уровня надежности строительных конструкций.