

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права
УДК (691.32+624.042):519.2:519.8

ДЕРЕЧЕННИК
Станислав Станиславович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ
СООРУЖЕНИЙ ИЗ БЕТОНА ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ
ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальности
05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Брест, 2025

Научная работа выполнена в учреждении образования
«Брестский государственный технический университет».

Научный консультант: **Тур Виктор Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов учреждения образования «Брестский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Пойта Петр Степанович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций учреждения образования «Брестский государственный технический университет»

Полева Иван Иванович, доктор технических наук, доцент, начальник Государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», г. Минск

Колчунов Виталий Иванович, действительный член РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Оппонирующая организация: учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Защита состоится «18» июня 2025 г. в 11⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.09.01 при учреждении образования «Брестский государственный технический университет» в аудитории 323 (конференц-зал) главного корпуса университета по адресу: 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, 267; тел. +375 162 321711; e-mail: sf@bstu.by .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Брестский государственный технический университет».

Автореферат разослан «16» мая 2025 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций



(подпись)

И. П. Павлова

ВВЕДЕНИЕ

Надежность является комплексным свойством объекта техники и включает: безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость, живучесть. Наиболее часто применяют свойство безотказности, взаимосвязанными показателями которого выступают: среднее время наработки до отказа, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы в течение заданного временного периода. Для строительных сооружений, надежность которых связана, в первую очередь, с безопасностью жизнедеятельности (исключение угроз гибели людей, иных катастрофических последствий), а интенсивность их отказов весьма низкая, удобнее использовать показатель вероятности отказа.

Надежность строительных сооружений при внезапных отказах определяется риском потери несущей способности конструкции или элементов конструкций под влиянием ряда случайных факторов. Предписывающие методы проектирования конструкций, основанные на полувероятностных подходах к проверкам предельных состояний, в целом, неявно обеспечивают некоторый целевой уровень надежности конструктивной системы, установленный СТБ ISO 2394 и СН 2.01.01, хотя не дают ни конкретного значения вероятности отказа, ни статистической достоверности результата прогнозирования.

Прогнозирование надежности строительного сооружения на этапе его проектирования и возведения (до ввода в эксплуатацию), основано, главным образом, на исследовании абстрактных объектов, в качестве которых выступают модели сопротивления конструкций и их элементов, используемых материалов, механических нагрузок и иных косвенных воздействий. Известные модели надежности базируются на положениях теории вероятностей, в то же время модели свойств реальных материалов и воздействий создают статистическими методами, опираясь на выборки опытных данных ограниченного объема. При этом сами измеряемые физические параметры как случайные величины обладают существенной изменчивостью. Подтверждение адекватности моделей затруднено ввиду низкой интенсивности отказов строительных сооружений, что при сравнительно небольшом количестве однотипных объектов делает практически доступными лишь безотказные наблюдения (так называемые «нулевые эксперименты»).

Концептуальная проблема заключается в существенных неопределенностях при идентификации базисных переменных сопротивления и нагрузки, входящих в функцию состояния конструкции. Данные неопределенности порождаются, главным образом, ограниченным объемом эмпирических данных, а также заведомым принятием, в отношении случайных переменных, гипотезы о нормальности и связанных с ней вероятностных распределений.

Разработка концептуально новых подходов к оцениванию случайных базисных переменных является актуальной научно-технической задачей. Ее решение позволит обеспечить адекватное прогнозирование надежности строительных сооружений в условиях ограниченного объема эмпирических данных.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнялась в рамках программ, заданий и проектов: ГПОФИ «Строительство и архитектура» – задание ГБ-06/607 «Разработка теоретических основ, методов и средств моделирования неупорядоченных микро- и мезоструктур в композитных системах на базе цементных материалов» в 2006–2010 гг. (№ ГР 20062630); ГПНИ «Строительные материалы и технологии» – задание ГБ-11/111 «Разработка положений вероятностной деградационной модели железобетона, применяемой для расчетных оценок долговечности и нормирования срока службы вновь проектируемых и существующих строительных объектов» в 2011–2013 гг. (№ ГР 20111088); Перечня работ по техническому нормированию и стандартизации Министерства строительства и архитектуры Республики Беларусь – проект «Проведение исследований изменения климатических воздействий на строительные конструкции в Республике Беларусь с целью внесения изменений в действующие ТНПА» в 2015 г. (№ ГР 20150036); проект «Разработать СТБ EN 206 «Бетон, требования, показатели, изготовление и соответствие» в 2016 г. (№ ГР 20160038); ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы 8 «Строительные материалы и технологии» – задание ГБ-16/205 «Разработать статистические критерии оценивания соответствия показателей качества строительных материалов при ограниченном количестве результатов испытаний» в 2016–2018 гг. (№ ГР 20163678); задание ГБ-16/206 «Разработать геоинформационную систему для назначения климатических воздействий на строительные конструкции зданий и сооружений» в 2016–2018 гг. (№ ГР 20163677).

Цель работы: концептуальное развитие научно обоснованных подходов к решению актуальной научно-технической проблемы обеспечения надежности строительных сооружений из бетона при их проектировании, возведении и эксплуатации, в условиях ограниченного объема эмпирической информации о прочностных свойствах бетона и изделий из него, а также о климатических нагрузках и воздействиях на строительные сооружения.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие **задачи:**

– определены возможности непараметрических статистик применительно к анализу и прогнозированию надежности строительных сооружений как конструктивных систем в условиях ограниченного объема исходных эмпирических данных, и научно обоснована методология такого анализа;

– разработаны непараметрические методы достоверного оценивания характеристических значений переменных климатических воздействий, в частности снеговых нагрузок, для их нормирования на заданный период повторяемости, и выполнено нормирование для территории Республики Беларусь;

– выполнен анализ изменчивости случайного параметра прочности бетона, как важнейшего фактора надежности элементов конструктивных систем, в части структурных и топологических свойств цементного материала как композитной дисперсной системы;

– разработаны непараметрические методы оценивания, с управляемой статистической достоверностью, характеристической прочности бетона на сжатие по малым группам результатов испытаний, применимые для оценки соответствия на стадиях производства бетона и эксплуатации существующих конструкций.

Объектом исследования являются строительные сооружения из бетона, а также их конструктивные элементы, функционирующие в условиях переменных, в частности климатических нагрузок.

Предмет исследования – методы прогнозирования надежности строительных сооружений в части вероятности отказа, а также оценивания соответствия прочности бетона на сжатие и климатических нагрузок, в частности снеговой нагрузки.

Научная новизна

1. Концептуально развито актуальное научное направление вероятностно-статистического анализа и прогнозирования надежности строительных сооружений в части применения методов непараметрической статистики для достоверного оценивания квантилей вероятностных распределений базисных переменных функции состояния конструкции по эмпирическим выборкам ограниченного объема, что позволило создать новые непараметрические методы и критерии оценивания базисных переменных нагрузки и сопротивления, а также разработать новые подходы к анализу и расчету вероятности отказа конструкции, которые в совокупности позволяют технически и экономически эффективно решить важную научно-техническую проблему обеспечения надежности строительных сооружений на всех стадиях их жизненного цикла.

2. Разработаны методы непараметрического оценивания, с известной статистической достоверностью, вероятности принадлежности квантилей распределения случайной величины непараметрическим интервалам применительно не только к их границам, заданным порядковыми статистиками эмпирической выборки, но и, за счет линейной аппроксимации эмпирических отсчетов в нелинейно преобразованной шкале вероятности с последующей интерполяцией либо экстраполяцией зависимости – также к произвольным точкам внутри либо за пределами этих интервалов, что позволяет оценивать нижние и верхние квантили, в том числе не покрываемые размахом малой эмпирической выборки.

3. Выполнен непараметрический анализ эмпирических рядов годовых максимумов снеговой нагрузки с оцениванием медианы 0,98-квантили вероятностного распределения нагрузки и впервые показано, что эффективное оценивание достигается как путем варьирования количества старших порядковых статистик ряда для установления принадлежности эмпирических данных одному из типов экстремальных распределений и выявления крайне редких (особых) нагрузок, так и без установления типа распределения, путем интервального непараметрического оценивания с линейным сглаживанием пяти старших порядковых статистик, в том числе с интегральной минимизацией ошибки на интервалах, и последующей интерполяции на непараметрических интервалах.

4. Методом компьютерного имитационного моделирования впервые установлены тестовые коэффициенты линейной непараметрической оценки 0,05-квантили для малых (до 15 результатов) и очень малых (от 3 до 7 результатов) выборок данных с заданной статистической достоверностью из диапазона от 0,01 до 0,95. На ее основе создана методика численного восстановления эмпирического распределения квантили для выборок малого, начиная с трех результатов, объема. Полученное распределение, с учетом известной функции состояния данной существующей конструкции в конкретных условиях ее нагружения, однозначно определяет функцию распределения вероятности ее отказа. Предложен новый показатель для анализа надежности конструкций существующего сооружения: средний уровень конструкционной надежности, определенный как вероятность отказа, усредненная по функции ее распределения, что позволяет оценивать характеристическую прочность бетона на том уровне статистической достоверности, который эквивалентен достижению среднего уровня конструкционной надежности.

Положения, выносимые на защиту

1. Единая методология непараметрического статистического анализа эмпирических распределений базисных переменных, входящих в функции состояния конструкции из бетона, заключающаяся в оценивании вероятности принадлежности квантилей распределения случайных величин непараметрическим интервалам вариационного ряда результатов измерений, отличающаяся тем, что оценивание выполняется для произвольных точек внутри и за пределами крайнего слева и крайнего справа интервалов, путем линейного сглаживания отсчетов ранжированного ряда эмпирических данных в нелинейно преобразованной шкале вероятности с последующей интерполяцией и/или экстраполяцией регрессионной зависимости, что позволяет получать интервальные оценки нижних и верхних квантилей с известной и задаваемой статистической достоверностью при малом (до 15 результатов) и очень малом (от 3 до 7 результатов) объеме выборок эмпирических данных.

2. Комплексная непараметрическая методика оценивания климатических воздействий, в частности веса снегового покрова на поверхности земли, включающая установление принадлежности хвостовой части эмпирических распределений одному из типов экстремальных распределений (Гумбеля, Фреше, Вейбулла), либо интервальное непараметрическое оценивание квантилей эмпирического распределения без выявления типа самого распределения, отличающаяся применением линейной или нелинейной интерполяции старших ранговых статистик, при варьировании их количества, с экстраполяцией для выявления особых значений нагрузок, либо применением пятиточечного выравнивания пяти старших порядковых статистик и интерполяции линейной регрессии в различных вариантах нелинейного преобразования шкалы вероятности, которая позволяет прогнозировать величину характеристической нагрузки с заданным уровнем достоверности, в частности оценивать положение медианы 0,98-квантили, и обеспечивать разработку технических кодексов и строительных норм климатических воздействий (снег, ветер, температура) для условий Республики Беларусь.

3. Концептуальное развитие методов прогнозирования надежности строительных сооружений, выразившееся в создании нового непараметрического метода оценивания нормируемой квантили вероятностного распределения прочности бетона (в частности, 0,05-квантили) с малочисленными выборками эмпирических результатов испытаний отличающиеся тем, что:

- вероятность отказа конструкции рассматривают как случайную величину, распределение которой связано функцией состояния для данной конструкции, в конкретных условиях ее нагружения, с распределением квантили прочности бетона, что позволило определить усредненную вероятность отказа конструкции как новый показатель *«средний уровень конструкционной надежности»*, который достигается на соответствующем, эквивалентном уровне достоверности оценки нормируемой квантили прочности бетона,
- непараметрическая оценка заданной квантили распределения представлена линейной комбинацией трех младших порядковых статистик эмпирической выборки и предусматривает переменный уровень достоверности, что позволяет реализовать процедуру численного восстановления эмпирического распределения нормируемой квантили и определить эквивалентную характеристическую прочность бетона в существующей конструкции,
- непараметрический критерий соответствия прочности производимого бетона на основе оценки характеристической прочности, выполняемой с уровнем достоверности, назначаемым с учетом соотношения рисков производителя и потребителя, либо адаптированным к объему выборки и нормативному уровню выходного качества бетона по экономической схеме со снижением расчетной средней прочности и расхода цемента за счет рационального подбора начального состава бетона, что позволило выполнить разработку стандартов по контролю соответствия прочности конструкционного бетона для условий Республики Беларусь.

Личный вклад соискателя заключается в разработке и обосновании научной концепции работы, формулировке цели и задач исследований, разработке методик и средств выполнения численных экспериментов и обработки эмпирических данных, анализе и интерпретации полученных результатов, разработке и формулировке всех основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы.

Основным соавтором опубликованных работ является научный консультант д-р техн. наук, профессор В. В. Тур, который определил выбор направления исследований, принимал участие в их планировании, обсуждении и оценке результатов на всех этапах работы. В совместных работах с А. В. Туром, А. А. Лизогубом соискатель предложил и обеспечил применение непараметрических оценок нижних квантилей в нелинейных моделях сопротивления конструктивных элементов. Совместно с доцентом О.П.Мешиком и аспирантами А. В. Дмитриевой, В. С. Разумейчик, А. С. Дереченник, Н. Н. Мешечек выполнены: районирование и картографирование снеговых

нагрузок, имитационное моделирование и структурно-топологический анализ неупорядоченных дисперсных структур, компьютерная реализация численных моделей базисных переменных функции состояния и операционных кривых. Работы с аспирантами выполнялись при непосредственном научном руководстве соискателя. При разработке метода интегральной оценки качества регрессионных моделей с С. С. Дереченником-мл. и А. В. Дмитриевой соискатель выполнил постановку задачи. Результаты, принадлежащие названным и другим соавторам публикаций, в работе не использовались.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты исследований докладывались на II Международном научно-практическом семинаре по реализации задач ГПОФИ «Строительство и архитектура» (Минск, 2007); пятом симпозиуме «Environmental Effects on Building and People – actions, influences, interactions, discomfort» (Kazimierz Dolny, Poland, 2007); МНТК, посвященной 45-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 2009); МНТК, посвященной 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева (Минск, 2016); Международных академических чтениях «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения» (Курск, 2016); симпозиумах Международной Федерации по Бетону (*fib* Symposium – Maastricht, The Netherlands, 2017; Kraków, Poland, 2019); II МНК «Актуальные проблемы исследования материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте» (Брест, 2017); Международных конференциях Czech Concrete Days (24., 25., а 26. Betonářské dny, Litomyšl, Praha, а Hradec Kralove, Česká republika, 2017, 2018, 2019); XXI Международном научно-методическом семинаре «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров» (Брест, 2018); МНПК «Цифровая среда : технологии и перспективы» (Брест, 2022).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 46 печатных работ. В их числе: монография, 4 раздела в иностранных коллективных монографиях, 13 статей в журналах и сборнике, соответствующих перечню ВАК научных изданий Республики Беларусь, 6 статей в иностранных журналах. Из них – 2 раздела в коллективных монографиях и 4 статьи опубликованы в изданиях, входящих в базу цитирования *SCOPUS*. Объем публикаций, соответствующих п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, составляет 34,5 авторских листа, из них 4,3 авторских листа в изданиях, входящих в базу цитирования *SCOPUS*. Кроме того, в других рецензируемых журналах и сборнике опубликованы 10 статей, в сборниках международных конференций – материалы 8 докладов и тезисы 4 докладов. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 47,5 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и приложений.

Объем диссертации без приложений составляет 171 страницу, из них 130 страниц текста, 49 рисунков и 19 таблиц на 30 страницах, список использованных источников на 11 страницах. Объем приложений составляет 18 страниц, в том числе 11 таблиц на 9 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу современного состояния проблемы прогнозирования надежности строительных сооружений и возможных путей ее решения.

В настоящее время при проектировании конструкций строительных сооружений используют предписывающий подход, опирающийся на положения теории предельных состояний. В наиболее распространенных моделях надежности, основанных на концепции проверок предельных состояний, случайность учитывается следующим образом: на элементы объекта со случайными, но фиксированными во времени, значениями несущей способности (сопротивления) воздействует поток независимых случайных воздействий (нагрузок). Вероятность отказа элемента конструкции в такой модели определяется областью отрицательных значений его функции состояния $X = R - E$, как разности случайных величин сопротивления элемента R и действующей нагрузки E . Основными базисными переменными функции X являются прочностные характеристики материалов, примененных в конструкции, а также параметры нагрузки – собственный вес конструкции и переменные нагрузки, в том числе обусловленные климатическими явлениями.

Наиболее распространенной в мировой и отечественной практике проектирования является проверка предельных состояний элемента конструкции методом частных коэффициентов. Здесь базисные переменные рассматривают с учетом их средних значений (сопротивления R_m и воздействия E_m) – как параметра положения случайных величин, а также статистической изменчивости (вариации, среднеквадратического отклонения) – как их параметра масштаба. В качестве нормируемых значений характеристик свойств материалов, воздействий и эффектов воздействий устанавливают определенные квантили вероятностных распределений, называемые характеристическими значениями. Для базисных переменных, определяющих свойства материалов, по соглашению специалистов, в качестве характеристических значений обычно применяют квантили уровня 0,05, а для воздействий – квантили уровня 0,98.

Обеспечение требуемого уровня надежности, в неявном виде, достигается посредством системы частных коэффициентов, значения которых калибруют, используя полностью вероятностный метод. Относительно характеристических значений сопротивления R_k и воздействия E_k , с помощью калиброванных частных коэффициентов (соответственно, γ_M и γ_F), определяют, а затем сравнивают расчетные значения сопротивления элемента R_d и воздействий E_d , как показано на рисунке 1.

Теоретические расчетные модели сопротивления конструкции являются важным аналитическим средством, однако, на стадии проектирования они

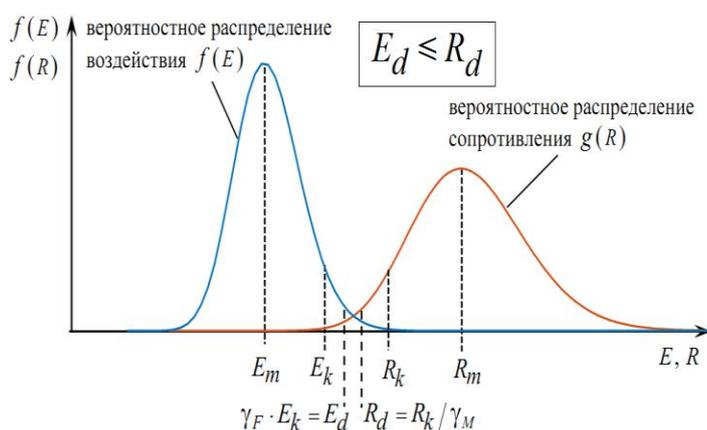


Рисунок 1 – Определение и сравнение расчетных значений воздействия и сопротивления

деленного вида. Квантили назначенного уровня определяют, как правило, опираясь на типовое распределение экстремальных значений (например, распределение Гумбеля), а в некоторых случаях на нормальное распределение случайной величины воздействия. Поскольку эмпирические распределения могут иметь «тяжелый», или, напротив, «легкий» правый хвост, итоговая достоверность оценок (как доверительная вероятность статистического вывода, основанного на эмпирических данных ограниченного объема), как правило, неизвестна.

Характеристическое значение прочности материалов предложено рассматривать в трех аспектах:

- назначение характеристических значений прочности на этапе проектирования, когда имеют место операции с абстракциями в виде гипотетически бесконечных выборок, а положение любой квантили можно определено с абсолютной (единичной) достоверностью;

- оценивание характеристических значений прочности материала, производимого и поставляемого для возведения конструкции (состояние которой должно соответствовать абстракции проекта), выполняемое по малым выборкам результатов испытаний образцов-спутников;

- оценивание характеристической прочности материалов существующей конструкции (*in-situ*), которое характеризуются, пожалуй, еще более ограниченным объемом эмпирической информации – по крайней мере, если она получена путем испытания кернов, отобранных из элементов существующей конструкции.

Полувероятностный метод частных коэффициентов является приближенным методом проверки предельных состояний. При этом достижение целевого уровня надежности гарантируется за счет соответствующей калибровки частных коэффициентов для воздействий и сопротивления.

По результатам статистического моделирования (метод Монте-Карло со 100 млн. случайных наборов данных) типовой железобетонной колонны величина индекса надежности $\beta_f = 3,87$ оказалась несколько большей целевого значения (3,8 по СН 2.01.01), но вероятность отказа $P_f = 2,18 \cdot 10^{-6}$ – в 45 раз

имеют прогнозный характер, поскольку относятся к еще несуществующей конструкции и к ее поведению в предполагаемых (будущих) условиях нагружения, поэтому оперируют определенным рода абстракциями.

Для установления характеристических значений переменных климатических воздействий пользуются эмпирическими выборками данных о годовых максимумах воздействий опре-

меньшей целевой вероятности (10^{-4} по СН 2.01.01). Объективной причиной показанного несоответствия полувероятностного и полностью вероятностного методов расчета является существенное отличие вероятностных распределений воздействия (нагрузки), сопротивления и, в целом, функции состояния от нормального распределения. Стремление гарантировать целевую надежность побуждает обеспечивать значительный конструктивный запас при калибровке частных коэффициентов, а в результате – происходит существенная недооценка надежности (завышение вероятности отказа).

Таким образом, помимо ограниченного объема эмпирических данных, важным источником неопределенности при идентификации функцию состояния конструкции, является заведомое принятие, в отношении случайных базисных переменных сопротивления и нагрузки, гипотезы о нормальности и связанных с ней вероятностных распределений.

Альтернативой в этих условиях являются методы непараметрических (порядковых, ранговых) статистик, которые не требуют предположений о конкретном виде закона распределения и являются устойчивыми (англ. *robust*) к параметрам положения и масштаба случайных величин, и позволяют решать задачи оценивания для малых выборок с заданной достоверностью.

Классические определения эмпирической функции распределения случайной выборки размера n (x_1, x_2, \dots, x_n) непрерывной случайной величины X основаны на ранжировании данных с построением вариационного ряда ($x_{(1)} \leq \dots \leq x_{(r)} \leq \dots \leq x_{(n)}$), где r – ранг конкретного элемента в ряду. Известны различные варианты ранговой оценки эмпирической функции распределения, отличающиеся величиной систематических ошибок оценки в левой и правой части вариационного ряда (т.е. на «хвостах распределения»). Однако ни один из известных вариантов не определяет статистическую достоверность получаемой оценки.

Оценивание квантилей распределения случайной величины с известной достоверностью может быть выполнено с применением аппарата непараметрических статистик. Здесь каждый результат эмпирической выборки объема n есть член вариационного ряда $x_{(r)}$ ранга $1 \leq r \leq n$ (является r -й порядковой статистикой), а квантиль X_p уровня p определяется как принадлежащая непараметрическому интервалу $[x_{(r)}, x_{(s)})$ с известной доверительной вероятностью $\gamma(r, s)$:

$$\gamma(r, s) = I_p(r, n - r + 1) - I_p(s, n - s + 1), \quad (1)$$

где $I_p(a, b) = 1 - I_{1-p}(b, a)$ – неполная бета-функция Пирсона, вычисляемая с использованием гамма-функции:

$$I_p(a, b) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \int_0^p z^{a-1} (1-z)^{b-1} dz. \quad (2)$$

Если все ранги вариационного ряда целые (в ряду отсутствуют т. н. «связки» из совпадающих измерений), гамма-функцию вычисляют как $\Gamma(a) = (a-1)!$ и выражение (2) сводится к биномиальному распределению:

$$\gamma(r, s) = \sum_{i=r}^{s-1} C_n^i p^i (1-p)^{n-i}. \quad (3)$$

В частном случае, если интервалы определены соседними статистиками $x_{(r)}$ и $x_{(r+1)}$, выражение для доверительной вероятности имеет вид:

$$\gamma(r, r+1) = C_n^r p^r (1-p)^{n-r}. \quad (4)$$

Интервальные оценки вида (3) и (4) применимы к случаям $r=0$ и $r=n$, т.е. для интервалов, выходящих за пределы размаха выборки. В этом случае вычисленную доверительную вероятность следует привязать к границе такого интервала (к порядковой статистике). Для вычисления вероятности суммируем значения (4) по интервалам, например, слева направо (от «нулевого» до заданного), и находим оценку $\hat{G}(X_p)$ функции распределения квантили для точек, определенных статистиками $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$:

$$\begin{cases} \hat{G}(X_p = x_{(1)}) = \gamma(\dots, 1), \\ \hat{G}(X_p = x_{(r+1)}) = \hat{G}(X_p = x_{(r)}) + \gamma(r, r+1). \end{cases} \quad (5)$$

Применяя процедуру аппроксимации (сглаживания), находим значения функции $\hat{G}(X_p)$ в точках внутри непараметрических интервалов путем интерполяции, и за пределами размаха выборки – путем экстраполяции.

Значения \hat{G} соответствуют вероятности принадлежности квантили X_p ограниченному справа интервалу, т.е. выполнения условия $F(X_p) > p$, поэтому величина $\gamma = \hat{G}$ является уровнем достоверности оценки квантили по верхней (правой) границе, а самой функции распределения $F(X)$ – по нижней границе. Верхней же граничной оценке функции $F(X)$ и левой граничной оценке квантили соответствует непараметрический интервал, ограниченный слева, а достоверностью оценки является кумулята $\gamma = 1 - \hat{G}$, которую находят, суммируя вероятности (4) по интервалам справа налево.

Таким образом, метод оценки квантилей эмпирической функции распределения наиболее применим как в отношении нижней квантили, например, уровня 0,05 – для оценивания характеристической прочности материала (бетона), так и верхней квантили, например, уровня 0,98 – для оценивания характеристической климатической нагрузки. С точки зрения обеспечения безопасности, оценка квантили должна выполняться на уровне $\gamma \geq 0,5$, причем для параметра прочности (нижних квантилей) – по левой границе (в смысле: «не хуже, чем ...»), а для параметра нагрузки (верхние квантили) – по правой границе («не более, чем ...»).

Разработанный метод позволил решить и обратную задачу, которая была сформулирована следующим образом: *найти уровни p квантилей, оценки которых, выполненные с заданной достоверностью γ , будут совпадать с конкретными имеющимися порядковыми статистиками $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$.* Медианную ($\gamma = 0,5$) оценку $\hat{p} = F(X_p = x_{(1)})$ эмпирической функции распределения в точке, соответствующей первой статистике ряда, получаем как решение уравнения, соответствующего первому из выражений (5):

$$\hat{G}(X_p = x_{(1)}) = \gamma(\dots, 1) = (1 - \hat{p})^n = 0,5. \quad (6)$$

Аналогичное, аналитически разрешимое уравнение имеет место и для последней статистики $x_{(n)}$ ряда. Для всех остальных порядковых статистик ранга $1 < r < n$ уравнения вида

$$\hat{G}(X_p = x_{(r)}) = \sum_{i=0}^{r-1} \gamma(i, i+1) = \sum_{i=0}^{r-1} C_n^i \hat{p}^i (1 - \hat{p})^{n-i} = 0,5 \quad (7)$$

аналитического решения относительно \hat{p} в общем случае не имеют. Эти уравнения решали численными методами. Получив достоверную оценку эмпирической функции распределения в точках вариационного ряда, выполняют процедуру сглаживания результатов для последующей интерполяции и/или экстраполяции. При этом такая процедура будет однократной, в отличие от сглаживания функции (5) в отношении каждой выбираемой квантили.

Во **второй главе** выполнено непараметрическое оценивание характеристических значений климатических нагрузок на строительные сооружения.

При проверках предельных состояний методом частных коэффициентов случайные величины климатических нагрузок представляют характеристическими значениями с весьма малой вероятностью их превышения в течение некоторого установленного периода отнесения (периода повторяемости) $T = T_{ref}$. Их определяют статистическими методами и представляют обычно верхними (высокого порядка p) квантилями S_p распределения $F(S)$ случайной величины нагрузки S . Допуская, согласно СН 2.01.01, в среднем одно превышение случайной нагрузкой этого характеристического значения, уровень квантили вероятностного распределения определяют как $p = 1/(1 - T)$.

Качество нормирования нагрузок зависит от способа статистической обработки эмпирических данных. Традиционный подход к оцениванию климатических воздействий заключается в выравнивании статистического ряда годовых максимумов нагрузки априори по первому предельному распределению Гумбеля (двойному экспоненциальному распределению, вытекающему из модели нормального распределения). Более совершенный подход основан на асимптотической теории экстремальных значений, которая описывает класс так называемых «максимум-устойчивых распределений», имеющих одну из трех параметрических форм, известных, соответственно, как законы Фишера-

Типета типа I (распределение Гумбеля), типа II (распределение Фреше) и типа III (распределение Вейбулла).

В практических задачах распределение Гумбеля с параметрами положения μ и масштаба σ обычно представляют в виде:

$$S = \mu - \sigma \ln(-\ln F(S)) = \mu + \sigma x, \quad x = -\ln(-\ln F(S)) > 0, \quad (8)$$

который позволяет получить линейный график с дважды логарифмической шкалой вероятности $F(S)$ в масштабе. Такая диаграмма удобна для анализа также и других типов распределения, при этом распределение типа II (Фреше) проявит себя отклонением данных вверх, а типа III (Вейбулла) – вниз от прямой линии на хвосте распределения (при увеличении вероятности $F(S)$ и, соответственно, абсциссы x), как показано на рисунке 2.

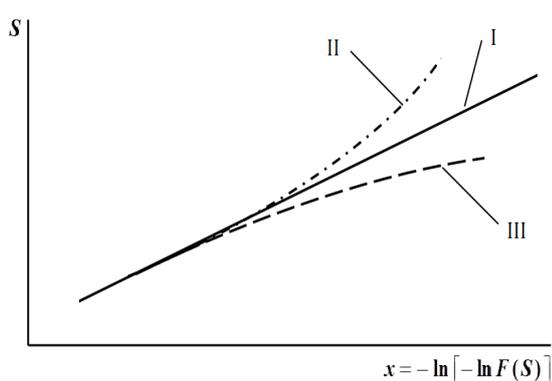


Рисунок 2 – Общий вид распределений экстремальных значений типов I, II и III на диаграмме с дважды логарифмической шкалой абсциссы

До 2008 года на территории Республики Беларусь снеговые нагрузки нормировали в соответствии с требованиями норм СНиП 2.01.07 (с Изменением № 1), а с 1.01.2008 были введены в действие ТКП EN 1990 и ТКП EN 1991, вошедшие в противоречие с действовавшими нормами. В течение предшествующего 2008 году десятилетия во многих европейских странах нормативные документы по установлению климатических, в частности снеговых нагрузок, были существенно переработаны. Причинами этого явились:

накопление новых эмпирических данных о нагрузках, участвовавшие случаи отказа строительных конструкций при воздействии снеговых нагрузок, введение нормируемых периодов отнесения. Несовершенство методик нормирования снеговой нагрузки привело к тому, что и в Республике Беларусь наблюдались неоднократные превышения установленных значений нагрузки на покрытия зданий. С целью гармонизации положений национальных нормативных документов с базовыми принципами концепции надежности, принятой в международном стандарте ISO 2394, была разработана комплексная научно-обоснованная методика оценивания и нормирования веса снегового покрова на территории Республики Беларусь. Центральным элементом этих исследований явилась разработка новых методов статистического анализа, в том числе с установлением принадлежности имеющихся эмпирических данных одному из типов (Гумбеля, Фреше, Вейбулла) распределений экстремальных значений в его правой хвостовой части.

Предложенная методика основана на статистических свойствах экстремальных событий. Она заключается в анализе правой хвостовой части (наибольших значений) эмпирического распределения годовых максимумов нагрузки в районе конкретной метеорологической станции. Исходными

данными являются: временной ряд (s_1, s_2, \dots, s_n) n -летних наблюдений годовых максимумов веса снегового покрова на поверхности земли, заданный уровень p оцениваемой квантили или период отнесения (число лет) T_{ref} .

Исходный временной ряд преобразуют в вариационный ряд, из которого выделяют правую хвостовую часть некоторой длины M , составляющей от $1/4$ до $1/3$ от длины всего ряда, но не менее 10 отсчетов:

$$s_{(n-M+1)} \leq s_{(n-M+2)} \leq \dots \leq s_{(n)}. \quad (9)$$

Статистики $s_{(r)}$ ранга r используют для вычисления ранговых оценок эмпирической функции распределения

$$\tilde{F}(s_{(r)}) = r / (n + 1), \quad (10)$$

которые наносят на диаграмму с дважды логарифмической шкалой вероятности (см. формулу (8) и рисунок 2). Для удобства анализа, дополнительно к шкале x по оси абсцисс, строят шкалы p (уровня искомой квантили) и T (периода повторяемости). На хвостовой части распределения $F(S)$ выполняли поиск линейной и нелинейной регрессий. Распределению типа I соответствовала линейная регрессия $S = ax + b$, а для типов II и III были предложены нелинейные регрессии $S = b \cdot \exp(ax)$ и $S = a \cdot \ln x + b$, соответственно. Путем варьирования длины хвоста в пределах от 10 до M отсчетов для всех типов распределений, выбирали наилучшую (по наивысшему коэффициенту детерминации) регрессию, которую принимали в качестве асимптотической аппроксимации $\tilde{F}(S)$ эмпирического распределения.

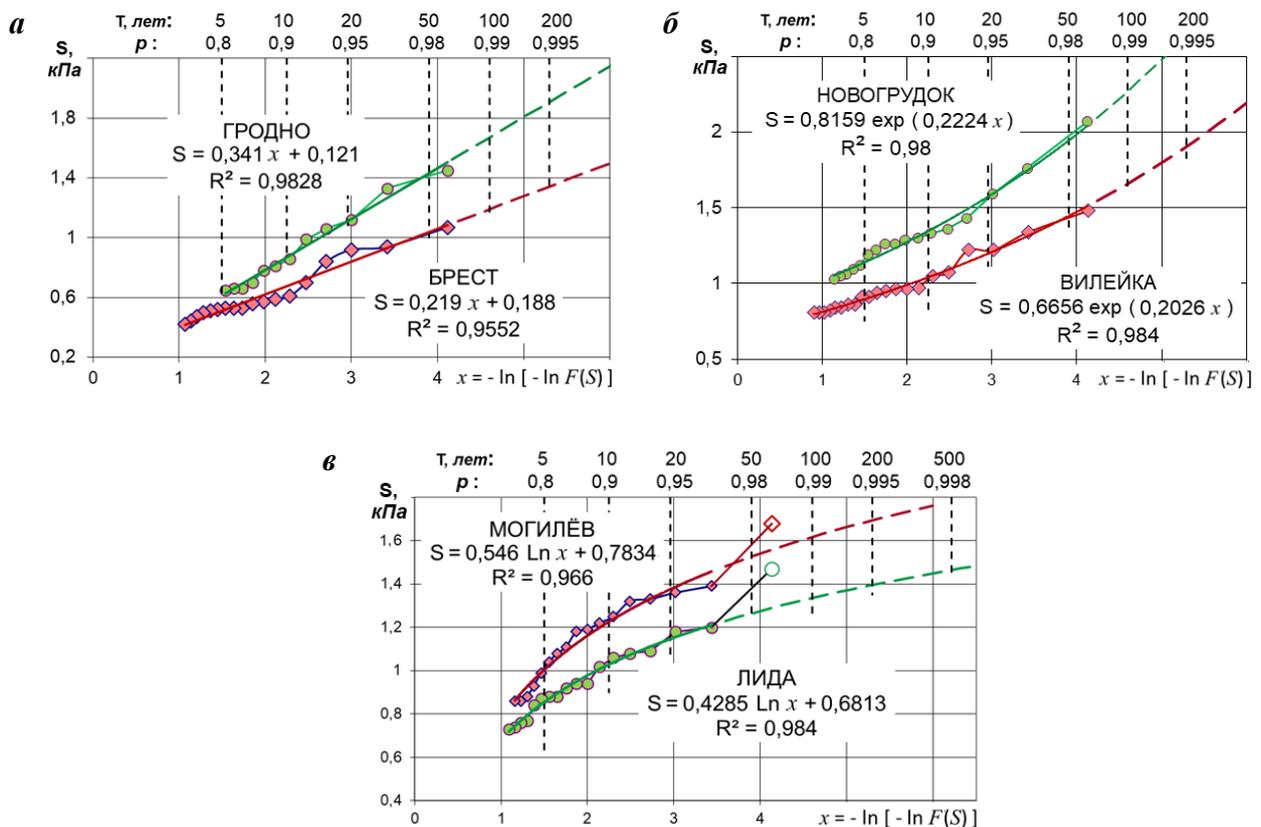
Характеристические значения снеговой нагрузки с периодом отнесения $T_{ref} = 50$ лет определяли как положение квантили уровня $p = 1 - 1/T = 0,98$ для асимптотической аппроксимации $\tilde{F}(S)$. Данному уровню квантили соответствует абсцисса $x_k = 3,90$ диаграммы, которая при больших значениях n располагается между крайними отсчетами вариационного ряда, а для более коротких исходных рядов ($n \leq 48$) требуется экстраполяция регрессионной зависимости вправо. Аналогично находим значения нагрузки для других периодов отнесения, что свидетельствует об универсальности предложенной методики. Кроме того, методика предусматривает дополнительный анализ наибольших («рекордных») значений исходной выборки.

Процедура анализа основана на сформулированной гипотезе: *наибольшее значение временного ряда наблюдений годовых максимумов климатической нагрузки, маловероятное настолько, что ожидаемый интервал его повторения кратно превышает период отнесения T_{ref} , следует отнести к категории особых событий, и исключить из оценивания характеристических значений нагрузки.*

Предложенную гипотезу следует проверять в отношении таких выборок, в которых длина крайнего непараметрического интервала $s_{(n)} - s_{(n-1)}$

значительно превышает длину любого другого интервала между соседними членами ряда (9). Интервал повторения T^* для «рекордного» значения нагрузки $s^* = s_{(n)}$ находят путем повторного поиска регрессии для ряда (9), из которого исключают статистику $s_{(n)}$, но значения абсцисс для оставшихся статистик не изменяют. Выбрав новую наилучшую регрессию $\tilde{F}^*(S)$, для значения s^* определяют абсциссу x^* и соответствующее ей значение $T^* = 1 / (1 - \exp(-\exp(-x^*)))$. Если полученное значение не превышает некоторого установленного порога $\nu \cdot T_{ref}$, где $\nu \geq (2 \div 3)$, то гипотезу считают не подтвержденной и регрессию $\tilde{F}(S)$ не корректируют. В противном случае отсчет $s_{(n)}$ относят к особому воздействию, а оценивание характеристической нагрузки выполняют по регрессии $\tilde{F}^*(S)$.

По данной методике выполнен анализ эмпирических данных годовых максимумов снеговой нагрузки за 1945–2006 гг. для 27 метеостанций Республики Беларусь. На рисунке 3 представлены примеры аппроксимации эмпирических данных регрессиями различных типов, включая проверку гипотезы о наличии особых значений нагрузки (с их исключением).

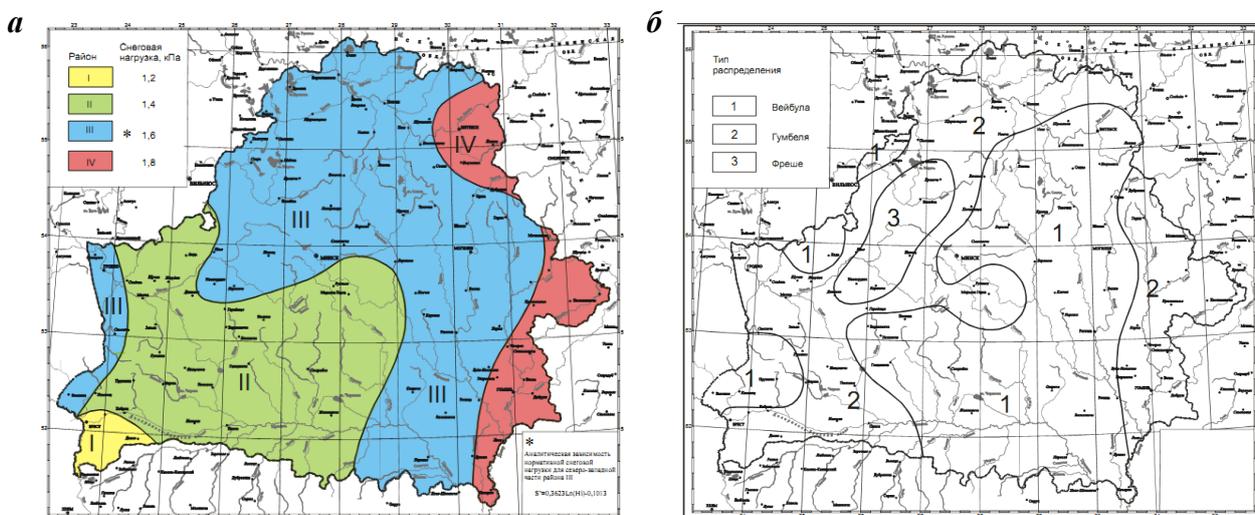


а – тип I (Гумбеля); **б** – тип II (Фреше); **в** – тип III (Вейбулла), рекордные нагрузки (маловероятные события) исключены из анализа

Рисунок 3 – Аппроксимация хвостовых частей эмпирических распределений снеговой нагрузки асимптотическими зависимостями различного типа

По результатам нормирования были построены (представлены на рисунке 4) карты районирования: характеристических значений нагрузки и, впервые в практике оценивания климатических воздействий, экстремальных типов распределения снеговой нагрузки.

Полученные результаты хорошо согласуются с границами районов подобных карт, построенных ранее для смежных территорий сопредельных государств. При практическом использовании методики определения характеристических значений снеговой нагрузки, основанной на ранговой оценке (10), были выявлены некоторые ее несовершенства. Во-первых, оценка (10) функции распределения снеговой нагрузки не предполагает назначения и контроля уровня статистической достоверности результата, зависящей от длины вариационного ряда и ранга наблюдения. Во-вторых, при определении типа эмпирического распределения во многих случаях лучшее приближение выбирали из двух или даже трех регрессий с высоким коэффициентом детерминации. Это свидетельствует о наличии, в общем случае, смеси распределений различного типа, что, наряду с малым общим количеством метеостанций, порождает неопределенность при выполнении районирования территории по типам распределений. Вследствие этого, для некоторых географических пунктов (в северо-западной части снегового района III) характеристические значения нагрузки вычисляют с учетом зависимости от высотной отметки.



а – характеристические значения (0,98-квантиль распределения);
б – экстремальные типы распределений годовых максимумов снеговой нагрузки

Рисунок 4 – Карты районирования снеговой нагрузки в Республике Беларусь

Учитывая выявленные несовершенства, было предложено выполнять прямое оценивание вероятностного распределения $G(S_p)$ искомой квантили эмпирического распределения, как случайной величины – без выявления типа экстремального распределения, но с заданной достоверностью γ . Например, для оценивания положения медианы квантили уровня $p = 0,98$ необходимо решение обратной задачи: $G(S_{0,98}) = \gamma = 0,5$. С использованием выражения (4)

рассчитано интервальное приближение плотности вероятности такой квантили для некоторых значений длины выборочного ряда измерений, как представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Вероятность принадлежности 0,98-квантили непараметрическим интервалам в правой части вариационного ряда

Длина вариационного ряда	Обозначение вероятности принадлежности квантили интервалу					
	$\gamma_{(n-5, n-4)}$	$\gamma_{(n-4, n-3)}$	$\gamma_{(n-3, n-2)}$	$\gamma_{(n-2, n-1)}$	$\gamma_{(n-1, n)}$	$\gamma_{(n, \dots)}$
$n = 30$	0,00028	0,0026	0,0188	0,0988	0,3340	0,5455
$n = 34$	0,00050	0,0040	0,0256	0,1176	0,3491	0,5031
$n = 35$	0,00057	0,0045	0,0274	0,1222	0,3522	0,4931
$n = 50$	0,00273	0,0145	0,0607	0,1858	0,3716	0,3642
$n = 60$	0,00575	0,0252	0,0865	0,2194	0,3644	0,2978
$n = 70$	0,01330	0,0387	0,1131	0,2445	0,3473	0,2431

Примечания. 1. Вероятность $\gamma_{(n, \dots)}$ соответствует расположению квантили правее старшей статистики (наибольшего значения ряда).
2. Выделенные фоном ячейки таблицы соответствуют интервалам, которым принадлежит квантиль с достоверностью $\gamma = 0,5$.

Новая методика непараметрического оценивания распределения $G(S_p)$ и медианы искомой квантили S_p основана на процедуре пятиточечного сглаживания эмпирических данных и включает следующие действия:

1) для известной длины n эмпирического ряда наблюдений, по (5) вычисляют вероятности принадлежности квантили непараметрическим интервалам: $\gamma_{(n-4, n-3)}$, $\gamma_{(n-3, n-2)}$, $\gamma_{(n-2, n-1)}$, $\gamma_{(n-1, n)}$ и $\gamma_{(n, \dots)}$;

2) из исходного вариационного ряда выделяют пять старших отсчетов:

$$s_{(n-4)} \leq s_{(n-3)} \leq s_{(n-2)} \leq s_{(n-1)} \leq s_{(n)}; \quad (12)$$

3) аналогично (6), но вычитая вероятности справа налево, вычисляют значения функции распределения $G(S_p)$ для значений (12) аргумента:

$$\begin{cases} G(s_{(n)}) = 1 - \gamma_{(n, \dots)}, \\ G(s_{(n-k)}) = G(s_{(n-k+1)}) - \gamma_{(n-k, n-k+1)}, \quad k = 1, 2, 3, 4; \end{cases} \quad (13)$$

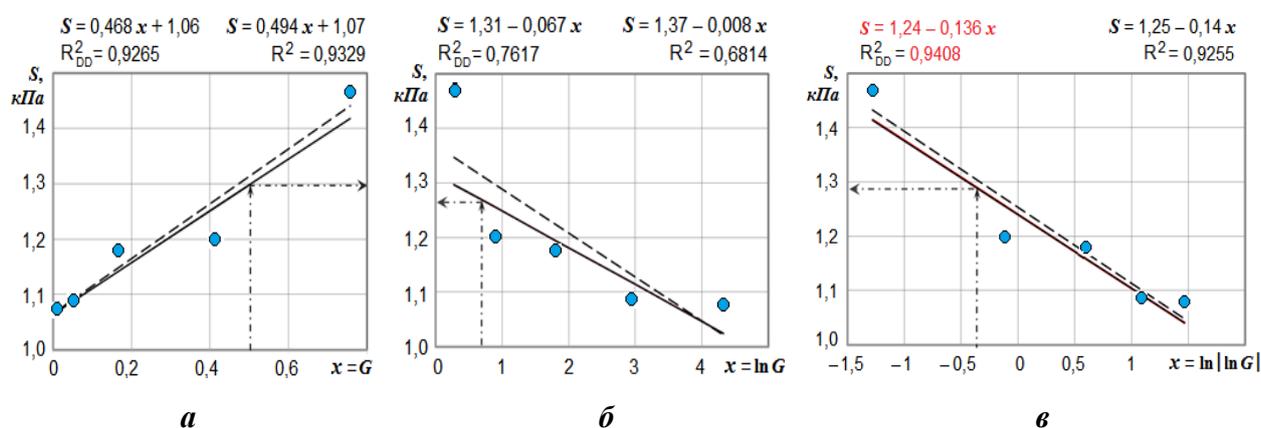
4) вычисленные значения функции распределения (13) наносят на диаграммы с одинаковой осью ординат для параметра S и с различными шкалами оси абсцисс для вероятности $G(S_p)$: простой шкалой G , логарифмической шкалой $|\ln G|$, дважды логарифмической шкалой $\ln|\ln G|$;

5) для каждого вида диаграммы находят линейную регрессию, используя метод наименьших квадратов либо метод интегральной минимизации квадратической ошибки;

6) по критерию наибольшего достигнутого коэффициента детерминации выбирают наилучшую регрессионную модель, по которой затем

вычисляют ординату S_p , которая и соответствует медиане искомой квантили, т.е. значению функции ее распределения $G = 0,5$ (или $|\ln G| = 0,693$, или $\ln|\ln G| = -0,367$).

По новой методике выполнен анализ эмпирических данных годовых максимумов снеговой нагрузки для 46 метеостанций Республики Беларусь. Прежние данные дополнены наблюдениями до 2013–14 гг., получены новые данные еще по 19 метеостанциям. Характеристическое значение снеговой нагрузки определяли, как положение медианы 0,98-квантили эмпирического распределения. Процедура иллюстрируется, на примере метеостанции Лида, рисунком 5.



сплошные линии – регрессия с интегральной минимизацией квадратической ошибки (уравнения слева); пунктирные линии – классическая регрессия методом наименьших квадратов (уравнения справа)

a – простая шкала вероятности; b – логарифмическая шкала вероятности;
 v – дважды логарифмическая шкала вероятности

Рисунок 5 – Линейная регрессия эмпирических данных снеговой нагрузки для метеостанции Лида (поиск 0,98-квантили распределения)

Были установлены три снеговых района с фоновыми характеристическими значениями снеговой нагрузки 1,35 кПа, 1,45 кПа и 1,55 кПа, в двух снеговых районах были выделены по три подрайона. Характеристическое значение нагрузки для конкретного объекта строительства определяют, в большинстве случаев, с учетом альтитуды местности (высотного положения площадки). Границы снеговых районов и подрайонов, а также зависимости нагрузки от альтитуды (высоты местности), представлены на рисунке 6.

Предложенный подход был применен при прогнозировании и других климатических нагрузок (ветровых, температурных), что позволило разработать и внедрить в практику проектирования единый методологический подход к оцениванию характеристических значений климатических нагрузок. На этой основе создана геоинформационная система с актуальными метеорологическими данными, учитывающая как региональные физико-географические особенности, так и современные климатические изменения.

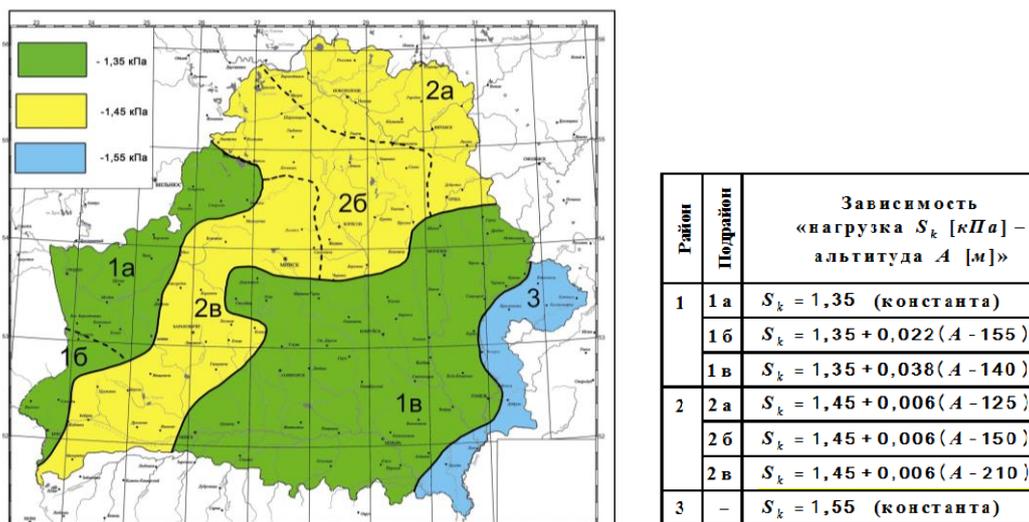


Рисунок 6 – Районирование территории Республики Беларусь по характеристическим значениям снеговой нагрузки с зависимостью значений нагрузки от альтитуды

В третьей главе выполнен анализ структурно-топологических факторов изменчивости свойств цементных материалов. Среди базисных переменных функции состояния железобетонных конструкций прочность бетона на сжатие имеет наибольшую изменчивость (коэффициент вариации). Вариации качества, в том числе прочности бетона, обусловлены вариациями рецептурных, технологических и иных влияющих внешних факторов. Значимое место среди них занимают топологические параметры структуры формирующегося композита: плотность и однородность упаковки, а также геометрия расположения дисперсных частиц в ближайшем окружении.

Для их исследования нами была создана структурно-фазовая модель эволюции цементной системы, отражающая как химические, так и структурные аспекты процесса гидратации, которая базируется на закономерностях взаимосвязи топологических характеристик структуры в объеме (3D) и плоских (2D) сечениях композита. С использованием 2D-сечений показано, что максимальная однородность упаковки частиц на уровне до 0,90 достигается в центральной зоне 3D-модели. Установлено, что плотность случайных упаковок дисперсных частиц на границах 3D-модельной области, по сравнению с центральной зоной, снижается до 30 % (краевой эффект). Следовательно, абсолютная однородность труднодостижима даже в отношении геометрической модели начальной структуры, при этом краевой эффект (например, на границе цемента и заполнителя) снижает плотность и ухудшает однородность микроструктуры.

В данном исследовании выполнено 2D-моделирование плотных случайных упаковок частиц различного гранулометрического состава, на которых определялись вероятность возникновения перколяционных кластеров в зависимости от некоторой изменяемой доли частиц (пример представлен на рисунке 7). Вычислительные эксперименты позволили получить перколяционные кривые (примеры для случаев моно- и бидисперсных случайных упаковок представлены на рисунке 8), которые показывают, что порог перколяции

существенно зависит от размерно-количественного состава дисперсной фазы и превышает порог перколяции для упорядоченных структур. В случайной монодисперсной нерегулярной структуре величина порога протекания составила $0,605 \pm 0,005$ (в отличие от классических значений на регулярных решетках: 0,5 – на треугольной и $0,5927\dots$ – на квадратной). Для полифракционных систем величина порога протекания возрастает до 0,63 и более, в зависимости от размерного состава дисперсной фазы. Топологический анализ координационного числа частиц показал, что в неупорядоченных упаковках наблюдаются флуктуации этого параметра как для моноразмерных, так и (в особенности) для полифракционных систем, как представлено на рисунке 9.

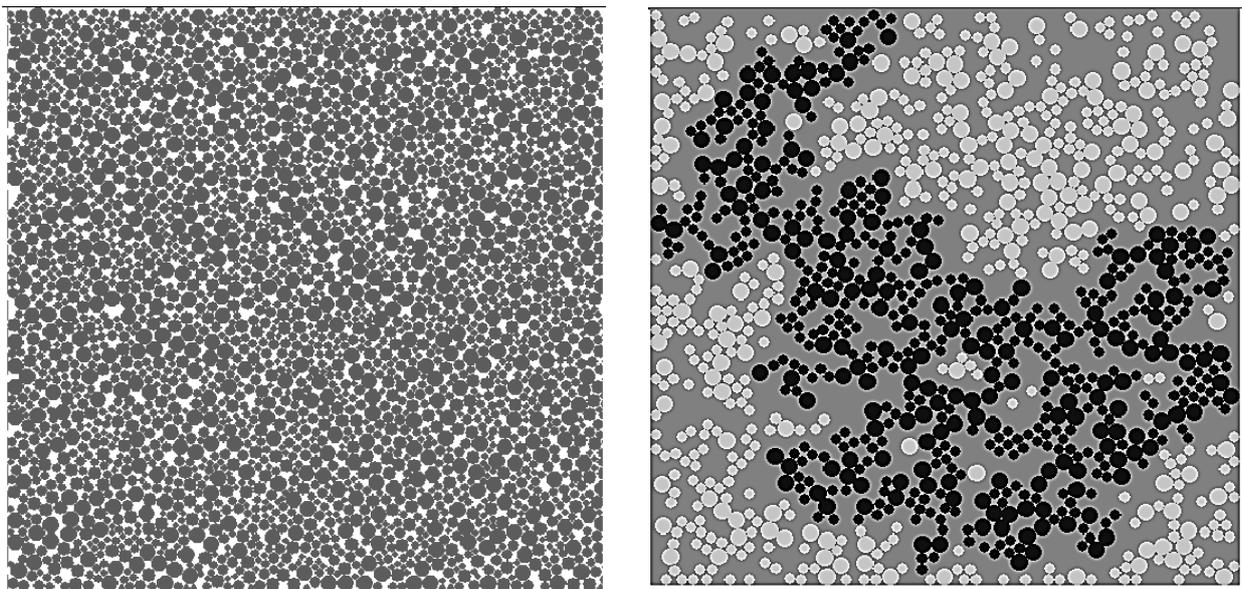
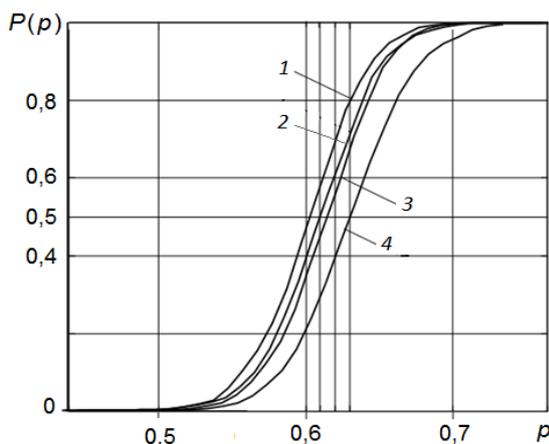


Рисунок 7 – 2D-модель случайной упаковки дисперсных частиц и перколяционного кластера (темные диски) для некоторой доли частиц



«1», «2», «3», «4» – доля больших частиц, соответственно: 0,9; 0,7; 0,1; 0,3

Рисунок 8 – Вероятность перколяции в неупорядоченной бидисперсной системе

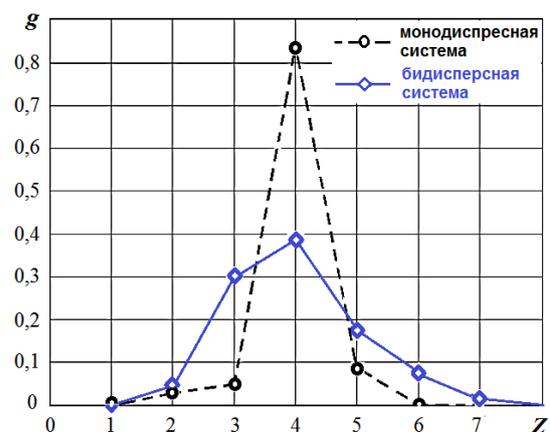


Рисунок 9 – Распределение координационного числа в плоских неупорядоченных упаковках (коэффициент плотности 0,80)

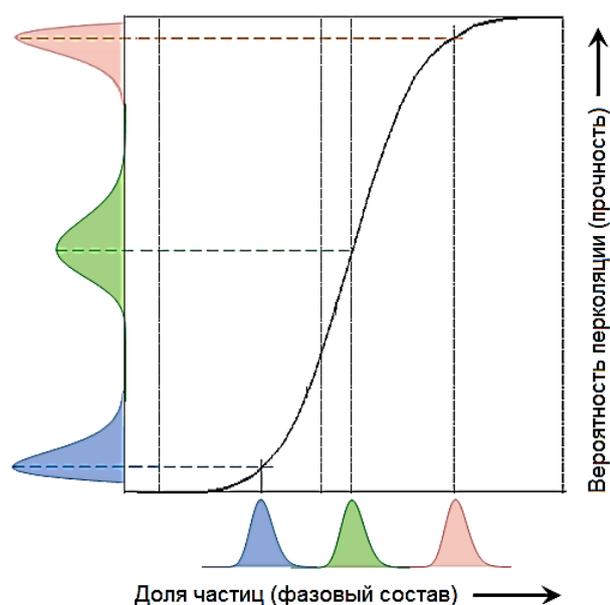


Рисунок 11 – Влияние количественных вариаций структуры и кривой перколяции на прочность цементного композита

Сдвиг перколяционной зависимости с изменением ее наклона, как и флуктуации координационного числа частиц, являются внутренними, топологическими источниками изменчивости различных свойств цементного композита, включая его прочность. Качественный анализ влияния вариаций структуры на прочность композита (иллюстрирован рисунком 10) показывает, что вероятностное распределение параметра прочности бетона, ввиду указанных причин, приобретает как положительную, так и отрицательную асимметрию на различных участках перколяционной кривой, соответствующих различным уровням средней прочности.

В четвертой главе представлена новая концепция непараметрического оценивания характеристической прочности бетона на сжатие при малом объеме эмпирических данных испытаний прочности. Концепция изложена в контексте обеспечения надежности существующих железобетонных конструкций. В отличие от этапа проектирования сооружений, данная задача предполагает обработку результатов полевых (*in-situ*) испытаний прочности бетона.

Известные классические методы оценивания характеристической прочности бетона на сжатие, например, согласно стандарту СТБ EN 13791 (EN 13791 : 2006-2012), *a priori* предполагают нормальное (логнормальное) распределение параметра прочности, а также фиксацию его стандартного отклонения (либо коэффициента вариации) на некотором усредненном уровне. Оценки характеристической прочности, получаемые стандартными методами, чрезвычайно зависимы как от вариации прочности, так и от ее абсолютного значения, и имеют неопределенную достоверность (в работе показано, что она может меняться в пределах от 0,2 до 0,95). Более надежный результат оценивания дает оценка с применением нецентрального *t*-распределения Стьюдента (внесенная в CEN Guide на основе стандарта EN 1990 и в новую версию стандарта EN 13791 : 2018) с декларированным уровнем достоверности 0,75. В отличие от европейского, американский подход основан на дифференцировании уровня достоверности γ оценки в зависимости от класса ответственности здания (так, согласно ACI 228, уровень $\gamma = 0,75$ рекомендуется для обычных конструкций, $\gamma = 0,90$ – для очень ответственных зданий, а $\gamma = 0,95$ – для критически важных частей атомных электростанций).

Выявленные недостатки известных методов мотивировали разработку концептуально нового метода оценивания характеристической прочности бетона, основанного на непараметрических (порядковых) статистиках эмпирических выборок данных.

Новый метод базируется на вычислении по выражениям (2), (5) вероятностей принадлежности квантили f_p уровня p непараметрическим интервалам, заданным порядковыми статистиками – членами вариационного ряда, построенного для выборки измерений прочности бетона. Аналогично (6) находим оценки $\hat{G}(f_p)$ функции распределения искомой квантили для нескольких порядковых статистик $f_{c(1)}, f_{c(2)}, f_{c(3)}, \dots$ в левой части вариационного ряда. Оценку $\hat{f}_{p,\gamma}$ квантили с заданной достоверностью γ находим, решая уравнение $\hat{G}(f_p) = 1 - \gamma$. Решение представим в виде нормированной линейной комбинации ($L3$ -оценки) трех младших порядковых статистик вариационного ряда эмпирических результатов, либо линейной комбинацией первой статистики и двух непараметрических интервалов:

$$\hat{f}_{p,\gamma} = af_{c(1)} + bf_{c(2)} + cf_{c(3)} = f_{c(1)} - \lambda_1(f_{c(2)} - f_{c(1)}) - \lambda_2(f_{c(3)} - f_{c(2)}), \quad (14)$$

где a, b и c – весовые коэффициенты линейной комбинации, нормированные условием $a + b + c = 1$;

$f_{c(1)}, f_{c(2)}$ и $f_{c(3)}$ – первая, вторая и третья порядковые статистики вариационного ряда результатов испытаний;

$\lambda_1 = a - 1, \lambda_2 = -c$ – тестовые коэффициенты.

Применительно к характеристической (в т.ч. *in-situ*) прочности бетона уровень $p = 0,05$ квантили фиксирован, поэтому оценку запишем в виде:

$$f_{ck, is} = \hat{f}_{0,05,\gamma} = f_{c \min} - \lambda_1(\gamma, n) \cdot \Delta_{2-1} - \lambda_2(\gamma, n) \cdot \Delta_{3-2}, \quad (15)$$

где $f_{c \min} = f_{c(1)}$ – наименьшее значение в группе из n последовательных единичных результатов f_{ci} испытаний;

$\Delta_{2-1} = f_{c(2)} - f_{c(1)}$ и $\Delta_{3-2} = f_{c(3)} - f_{c(2)}$ – положительные разности;

$\lambda_1 = \lambda_1(\gamma, n)$ и $\lambda_2 = \lambda_2(\gamma, n)$ – безразмерные тестовые коэффициенты, которые зависят от объема n выборки результатов испытаний и произвольно задаваемого уровня γ достоверности оценки.

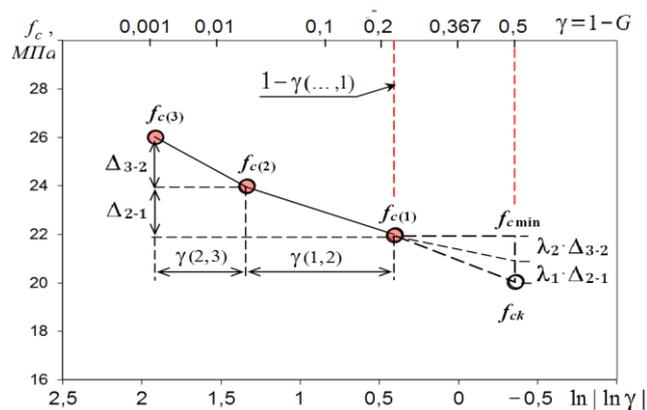


Рисунок 10 – Схема формирования оценки (15) медианы 0,05-квантили

Схема формирования оценки (15) иллюстрирована рисунком 10, где показаны простая и дважды логарифмическая шкалы для кумуляты $\gamma = 1 - \hat{G}(f_p)$ распределения квантили. Калибровку тестовых коэффициентов для оценки (15) выполняли путем подбора в процессе имитационного компьютерного моделирования с применением метода Монте-Карло и поиском линейной

регрессии с подходящим для этого нелинейным преобразованием шкале γ , как показано на рисунке 12 на примере дважды логарифмической шкалы.

Зависимость тестовых коэффициентов от уровня достоверности γ для нескольких значений $n = 3; 5; 7$ представлены на рисунке 11.

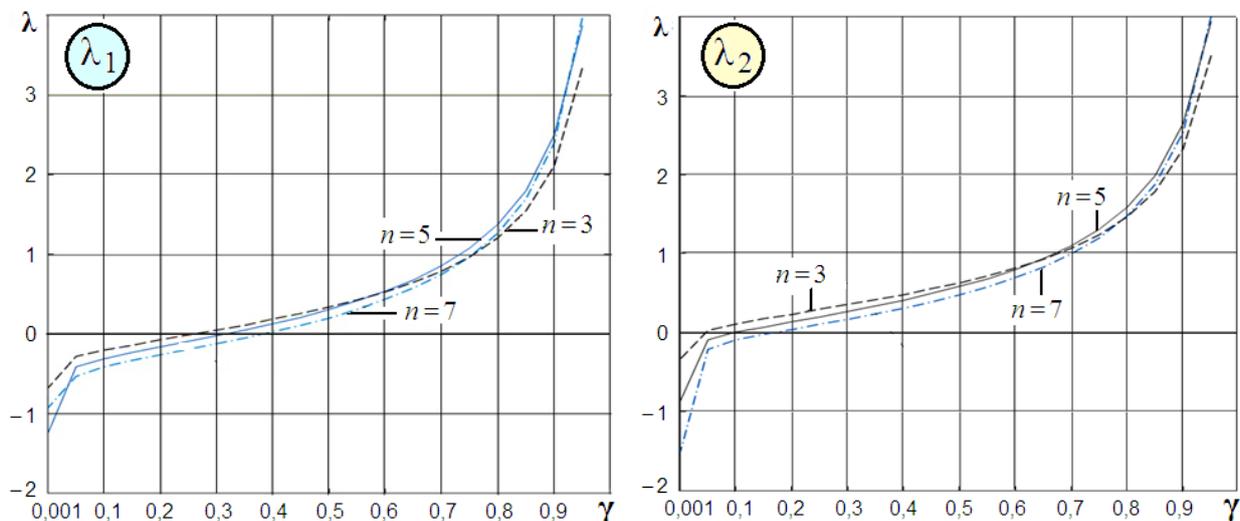


Рисунок 11 – Графики для определения значений тестовых коэффициентов в зависимости от достоверности оценки (15)

Новая оценка позволяет численным методом восстановить эмпирическое распределение вероятности $g(\hat{f}_{ck, is})$ оценки 0,05-квантили для каждой конкретной малой выборки результатов измерений прочности. Построение такого распределения в виде гистограммы с выбранной дискретностью параметра достоверности, например $\Delta\gamma = 0,05$ в диапазоне параметра $\gamma = 0,95 \dots 0,001$, а также примеры восстановленных гистограмм для двух выборок минимального объема $n = 3$, представлены на рисунке 12.

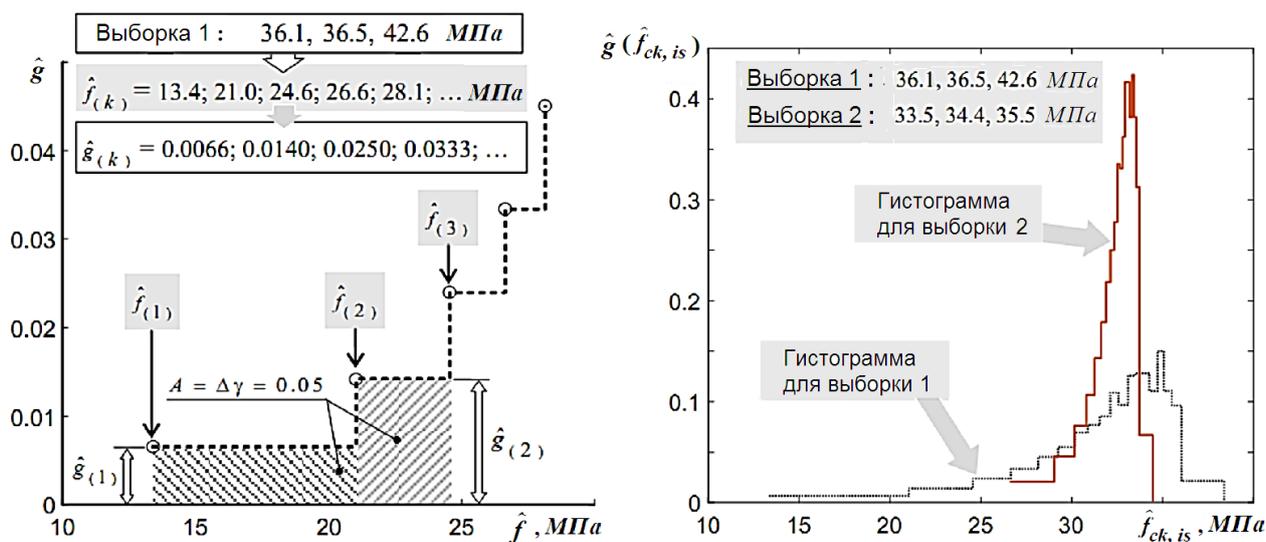


Рисунок 12 – Принцип построения и примеры гистограмм распределения квантили характеристической прочности бетона

Выполнен анализ влияния характеристической (*in-situ*) прочности бетона на надежность (вероятность отказа) существующей конструкции. На примере типовой железобетонной колонны установлено, что, в области малых вероятностей отказа, при изменении характеристической прочности нормированная функция состояния конструкции смещается без изменения своей формы, а зависимость вероятности отказа от характеристической прочности является логарифмически линейной, как показано на рисунке 13.

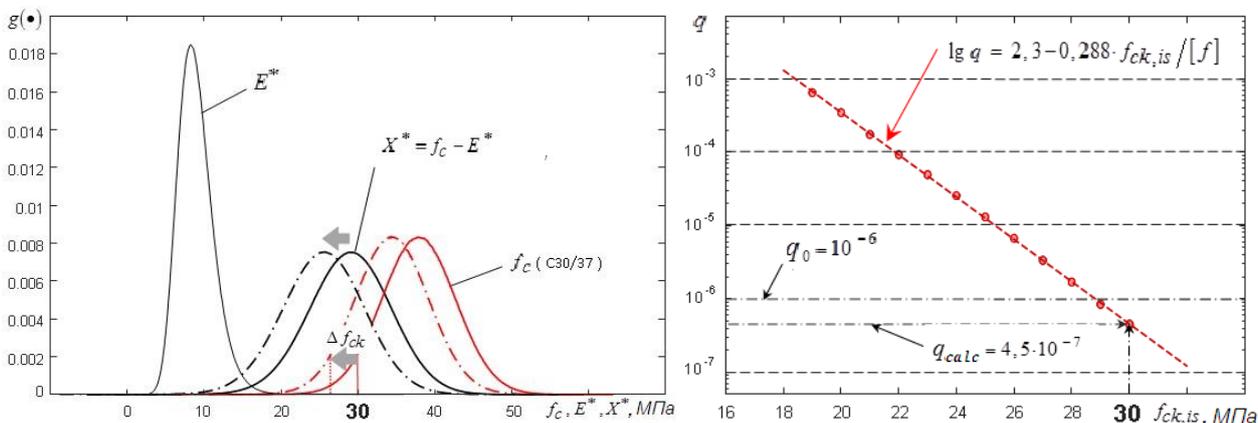


Рисунок 13 – Влияние характеристической прочности бетона на положение функции состояния и на вероятность отказа железобетонной колонны

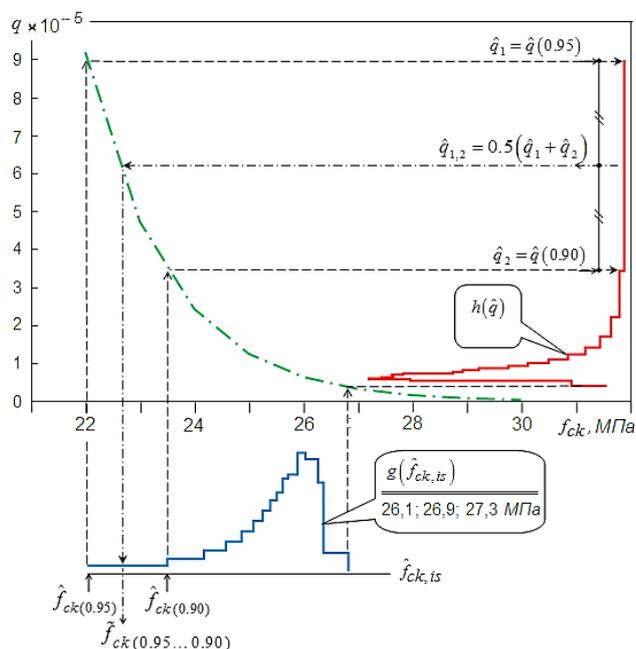


Рисунок 14 – Нелинейное преобразование распределения характеристической *in-situ* прочности бетона в функцию распределения вероятности отказа колонны

Нелинейная зависимость вероятности отказа от характеристической прочности однозначно связывает восстановленное распределение характеристической *in-situ* прочности с функцией распределения вероятности отказа как показано на рисунке 14. Усредненное значение вероятности отказа, определенное как «средний уровень конструкционной надежности», введено как новый показатель надежности. Такому же значению вероятности отказа соответствует значение эквивалентной характеристической прочности бетона при эквивалентном уровне достоверности оценки (обеспеченности) $\tilde{\gamma}$. Установлено, что величина эквивалентной обеспеченности оценки

зависит только от двух факторов: вариации параметра прочности бетона (оценивается разностью $\Delta = \Delta_{3-1} = \Delta_{3-2} + \Delta_{2-1}$) и соотношения $\chi = Q/(G + Q)$ переменной Q и постоянной G нагрузок на конструкцию.

Новая методика непараметрической оценки эквивалентной характеристической *in-situ* прочности бетона основана на формуле (16) и предусматривает: вычисление разности $\Delta = \Delta_{3-1} = \Delta_{3-2} + \Delta_{2-1}$; ее корректировку с учетом доли χ переменной нагрузки в общей нагрузке $\Delta^* = \Delta \cdot [1 + 0,257 \cdot (0,43 - \chi)]$; определение эквивалентной обеспеченности $\tilde{\gamma}$ оценки по таблице 2 и тестовых коэффициентов по таблице 3. Эквивалентная характеристическая *in-situ* прочность вычисляется затем по формуле (15).

Таблица 2 – Эквивалентная обеспеченность $\tilde{\gamma}$ оценки характеристической прочности бетона для различного объема n выборки

n	Значение разности Δ (скорректированной разности Δ^*), МПа										
	0,2 и менее	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0 и более
3	0,60	0,64	0,70	0,75	0,80	0,83	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91
4	0,61	0,65	0,72	0,78	0,82	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92
5		0,66									
6	0,60		0,65	0,71	0,77	0,81	0,85	0,87	0,89		
7		0,59								0,64	
8	0,58		0,63	0,70	0,76	0,81	0,84	0,86	0,88		
9		0,57								0,62	
10	0,56		0,63	0,70	0,76	0,81	0,84	0,86	0,88		
11		0,55								0,62	
12	0,54		0,62	0,69	0,75	0,80	0,84	0,86	0,88		
13		0,54								0,62	
14	0,54		0,62	0,69	0,75	0,80	0,84	0,86	0,88		0,90
15		0,54								0,62	
15	0,54		0,62	0,69	0,75	0,80	0,84	0,86	0,88		0,90

Таблица 3 – Значения тестовых коэффициентов λ_1 и λ_2 для расчета эквивалентной характеристической прочности бетона при различном объеме n выборки

n	Величина эквивалентной обеспеченности $\tilde{\gamma}$ оценки														
	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,91	0,92
3							<u>0,53</u> 0,82	<u>0,65</u> 0,93	<u>0,79</u> 1,07	<u>0,97</u> 1,24	<u>1,21</u> 1,47	<u>1,55</u> 1,79	<u>2,11</u> 2,13	<u>2,28</u> 2,50	<u>2,50</u> 2,70
4							<u>0,57</u> 0,84	<u>0,70</u> 0,97	<u>0,87</u> 1,13	<u>1,09</u> 1,32	<u>1,36</u> 1,59	<u>1,76</u> 1,97	<u>2,43</u> 2,59	<u>2,64</u> 2,78	<u>2,88</u> 3,02
5							<u>0,54</u> 0,80	<u>0,68</u> 0,94	<u>0,86</u> 1,10	<u>1,08</u> 1,31	<u>1,38</u> 1,59	<u>1,80</u> 1,99	<u>2,50</u> 2,65	<u>2,72</u> 2,86	<u>2,98</u> 3,10
6							<u>0,49</u> 0,75	<u>0,63</u> 0,89	<u>0,81</u> 1,06	<u>1,04</u> 1,26	<u>1,33</u> 1,55	<u>1,76</u> 1,95	<u>2,48</u> 2,61	<u>2,70</u> 2,82	<u>2,97</u> 3,07
7							<u>0,44</u> 0,70	<u>0,58</u> 0,83	<u>0,75</u> 1,00	<u>0,97</u> 1,20	<u>1,27</u> 1,48	<u>1,70</u> 1,88	<u>2,40</u> 2,54	<u>2,62</u> 2,75	<u>2,88</u> 3,00
8							<u>0,37</u> 0,64	<u>0,51</u> 0,77	<u>0,69</u> 0,93	<u>0,90</u> 1,14	<u>1,19</u> 1,41	<u>1,61</u> 1,80	<u>2,31</u> 2,45	<u>2,53</u> 2,66	<u>2,79</u> 2,90
9						<u>0,29</u> 0,55	<u>0,31</u> 0,58	<u>0,45</u> 0,71	<u>0,62</u> 0,86	<u>0,83</u> 1,07	<u>1,12</u> 1,33	<u>1,52</u> 1,72	<u>2,21</u> 2,36	<u>2,43</u> 2,56	<u>2,68</u> 2,79
12			0,02 0,35	0,06 0,37	0,09 0,38	<u>0,11</u> 0,40	<u>0,14</u> 0,42	<u>0,27</u> 0,54	<u>0,42</u> 0,69	<u>0,62</u> 0,87	<u>0,88</u> 1,12	<u>1,26</u> 1,47	<u>1,89</u> 2,05	<u>2,09</u> 2,23	<u>2,32</u> 2,45

Продолжение таблицы 3

n	Величина эквивалентной обеспеченности $\tilde{\gamma}$ оценки														
	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,91	0,92
13		$\frac{-0,01}{0,28}$	$\frac{0,01}{0,30}$	$\frac{0,03}{0,32}$	$\frac{0,05}{0,34}$	$\frac{0,07}{0,36}$	$\frac{0,09}{0,38}$	$\frac{0,21}{0,49}$	$\frac{0,36}{0,63}$	$\frac{0,55}{0,81}$	$\frac{0,81}{1,04}$	$\frac{1,17}{1,39}$	$\frac{1,79}{1,96}$	$\frac{1,98}{2,14}$	$\frac{2,21}{2,35}$
14	$\frac{-0,05}{0,17}$	$\frac{-0,04}{0,20}$	$\frac{-0,03}{0,23}$	$\frac{-0,01}{0,26}$	$\frac{0,0}{0,28}$	$\frac{0,02}{0,31}$	$\frac{0,04}{0,33}$	$\frac{0,16}{0,44}$	$\frac{0,31}{0,57}$	$\frac{0,49}{0,75}$	$\frac{0,74}{0,98}$	$\frac{1,10}{1,31}$	$\frac{1,70}{1,88}$	$\frac{1,88}{2,05}$	$\frac{2,10}{2,26}$
15	$\frac{-0,11}{0,13}$	$\frac{-0,09}{0,16}$	$\frac{-0,07}{0,18}$	$\frac{-0,06}{0,21}$	$\frac{-0,04}{0,23}$	$\frac{-0,02}{0,26}$	$\frac{0,0}{0,28}$	$\frac{0,11}{0,40}$	$\frac{0,25}{0,53}$	$\frac{0,43}{0,69}$	$\frac{0,67}{0,92}$	$\frac{1,02}{1,24}$	$\frac{1,58}{1,77}$	$\frac{1,75}{1,93}$	$\frac{1,97}{2,14}$

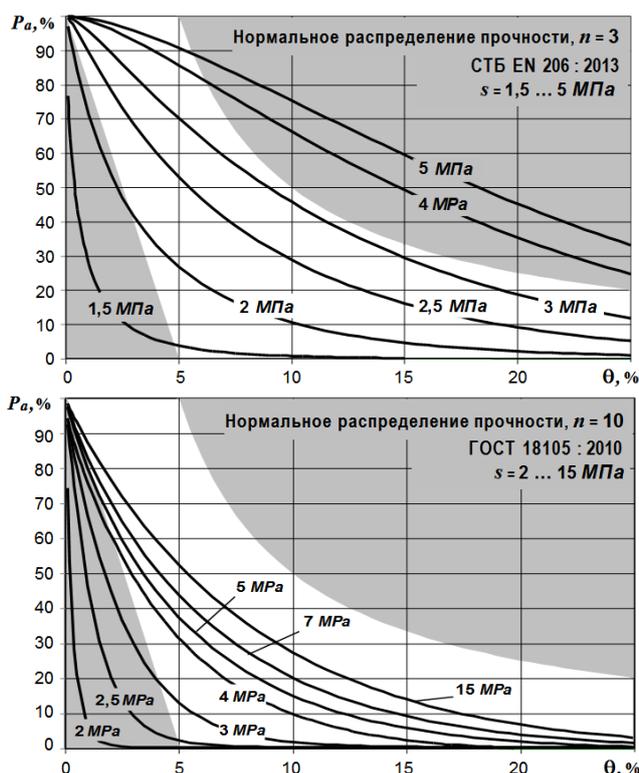
Примечание – В числителе приведены коэффициенты λ_1 , в знаменателе – коэффициенты λ_2

Линейная непараметрическая оценка (15) применима не только к натурным эмпирическим данным, но также к результатам вычислительных экспериментов, например, в задачах нелинейного анализа проектируемых конструкций. После соответствующей калибровки тестовых коэффициентов выполняли оценку квантили уровня $p=0,01$ для $n=35$ результатов нелинейных вычислений с достоверностью в диапазоне от 0,1 до 0,9.

В пятой главе новая концепция непараметрического оценивания характеристической прочности бетона на сжатие была реализована в задаче оценивания соответствия прочности для производимого бетона. В концепции полувероятностного метода частных коэффициентов для случайной величины прочности бетона, взамен вероятностной функции, вводят единственный параметр характеристической прочности, как 0,05-квантили распределения.

В процедурах статического управления качеством используют функции, определяющие, в испытательном плане, вероятность того, что выполняются критерии соответствия в зависимости от принятого уровня качества (англ. *Quality Limit – QL*) контролируемой партии изделия. Они связывают долю дефектов θ в партии бетона с вероятностью ее приемки P_a , и имеют вид операционно-характеристических кривых (англ. *Operating Characteristic Curve*), называемых обычно операционными кривыми (*OC*). Эффективность разрабатываемых критериев соответствия определяется положением кривой *OC* в рабочей (нейтральной) области, т.е. между границами неэкономической и небезопасной областей, определяемых, соответственно, условиями $\theta/(1-P_a)=0,5$ и $\theta \cdot P_a=0,5$.

С использованием кривых *OC* выполнен анализ известных (согласно стандартам СТБ EN 206 : 2013, ГОСТ 18105–2010) критериев соответствия прочности производимого бетона. Показано, что для условий начального производства с малым объемом эмпирических выборок испытаний прочности эти критерии являются нерациональными, нелогичными и неоправданным по экономическим затратам, которые ложатся на производителя (в особенности, при малой вариации прочности). Вместе с тем, вероятность приемки партий бетона со сниженным качеством остается достаточно высокой. Результат оценивания зависит от объема выборки, типа функции распределения прочности, величины стандартного отклонения прочности, и даже от класса бетона по прочности. Некоторые примеры результатов моделирования кривых *OC* для критериев СТБ EN 206 и ГОСТ 18105 приведены на рисунке 15.



фоном выделены: небезопасная (справа
вверху) и неэкономичная (слева)

Рисунок 15 – Фильтрационные кривые OC для критериев СТБ EN 206 и ГОСТ 18105 при различной вариации (стандартном отклонении) параметра прочности бетона

Основной причиной недостатков и принципиальных ограничений известных критериев является использование параметрических статистик при априори неизвестном вероятностном распределении оцениваемого параметра. Новый непараметрический метод оценивания прочности бетона в виде (15) универсален в применении и пригоден для контроля соответствия прочности производимого бетона. Оценка (15) квантили уровня $p = 0,05$, полученная с достоверностью γ , позволяет также установить, с той же достоверностью, соответствие бетона заданному классу. Для этого оценку квантили необходимо сравнить с нормированной для этого класса характеристической прочностью f_{ck} , тогда проверяемое условие (неравенство) $\hat{f}_{0,05,\gamma} \geq f_{ck}$ фактически является критерием соответствия, записанным в следующем виде:

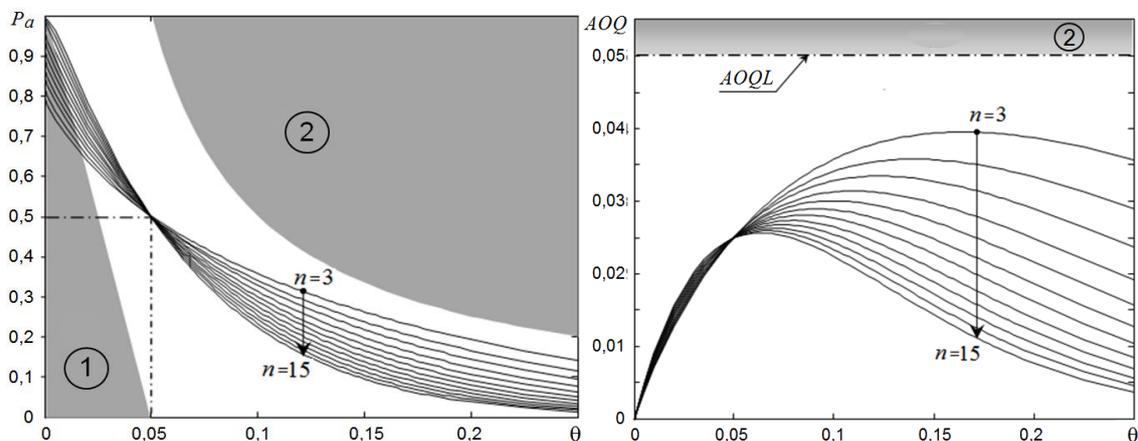
$$f_{c \min} \geq f_{ck} + \lambda_1 \Delta_{2-1} + \lambda_2 \Delta_{3-2}. \quad (16)$$

Здесь безразмерные тестовые коэффициенты λ_1 и λ_2 калиброваны для нескольких фиксированных уровней достоверности оценки $\gamma = 1 - P_a^*$, где $P_a^* = P_a(\theta = 0,05)$ – вероятность приемки партии произведенного бетона, имеющего нормативную дефектность $\theta = 5\%$, и приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения тестовых коэффициентов критерия соответствия (16) для фиксированных уровней достоверности оценки по выборке из n результатов

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Достоверность $\gamma = 0,50$ (соответствует вероятности приемки бетона $P_a^* = 0,5$)													
λ_1	0,38	0,38	0,34	0,28	0,23	0,17	0,11	0,05	0,0	-0,05	-0,10	-0,14	-0,19
λ_2	0,68	0,66	0,62	0,56	0,50	0,44	0,39	0,34	0,29	0,24	0,20	0,15	0,12
Достоверность $\gamma = 0,75$ (соответствует вероятности приемки бетона $P_a^* = 0,25$)													
λ_1	1,06	1,16	1,15	1,10	1,03	0,96	0,88	0,805	0,73	0,66	0,59	0,52	0,46
λ_2	1,32	1,39	1,37	1,32	1,26	1,18	1,11	1,04	0,97	0,90	0,84	0,78	0,72
Достоверность $\gamma = 0,90$ (соответствует вероятности приемки бетона $P_a^* = 0,1$)													
λ_1	2,27	2,57	2,63	2,60	2,52	2,42	2,31	2,21	2,09	1,98	1,88	1,77	1,67
λ_2	2,48	2,73	2,77	2,73	2,65	2,56	2,45	2,35	2,24	2,14	2,04	1,94	1,85

Был выполнен анализ эффективности нового критерия с точки зрения его фильтрационной способности, а также среднего уровня выходного качества $AOQ = \theta \cdot P_a(\theta)$ (AOQ – англ. *Average Outgoing Quality*) по отношению к его предельному значению $AOQL$ (англ. *Average Outgoing Quality Limit*). На рисунке 16 приведены кривые OC и AOQ нового критерия для фиксированного уровня достоверности 0,5.



«1» – неэкономичная область, «2» – небезопасная область

Рисунок 16 – Фильтрационные кривые OC и кривые AOQ нового критерия

При достижении $n = 15$ кривая OC практически точно совпадает с кривой OC критерия СТБ EN 206 для стадии непрерывного производства. Кроме того, с учетом калибровки коэффициентов, критерий (16) применим и для большего объема выборки (например, до $n = 35$), что позволяет реализовать единый методологический подход к оцениванию соответствия прочности бетона без деления на стадии начального и непрерывного производства.

В целях экономичного оценивания для повышения среднего уровня выходного качества, была выполнена оптимизация тестовых коэффициентов критерия (16), исходя из условия $AOQ_{\max} \rightarrow AOQL = 5\%$, что соответствует переменному уровню достоверности γ искомой квантили. В данном случае критерий содержит один тестовый коэффициент, и имеет следующий вид:

$$f_{c \min} \geq f_{ck} - 0,3\Delta_{2-1} + \lambda\Delta_{3-1}. \quad (17)$$

Значения тестового коэффициента λ приведены в таблице 5, кривые OC и AOQ для критерия (17) представлены на рисунке 17. При увеличении объема выборки свыше $n = 15$ экономичное оценивание–выполняют, используя критерий в общей форме (16) с двумя тестовыми коэффициентами, значения которых представлены в таблице 6.

Таблица 5 – Значения тестового коэффициента критерия (17) соответствия прочности бетона для экономичного оценивания с выборками объема n от 3 до 15

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
λ	0,60	0,50	0,38	0,26	0,16	0,07	-0,01	-0,08	-0,14	-0,20	-0,25	-0,30	-0,34

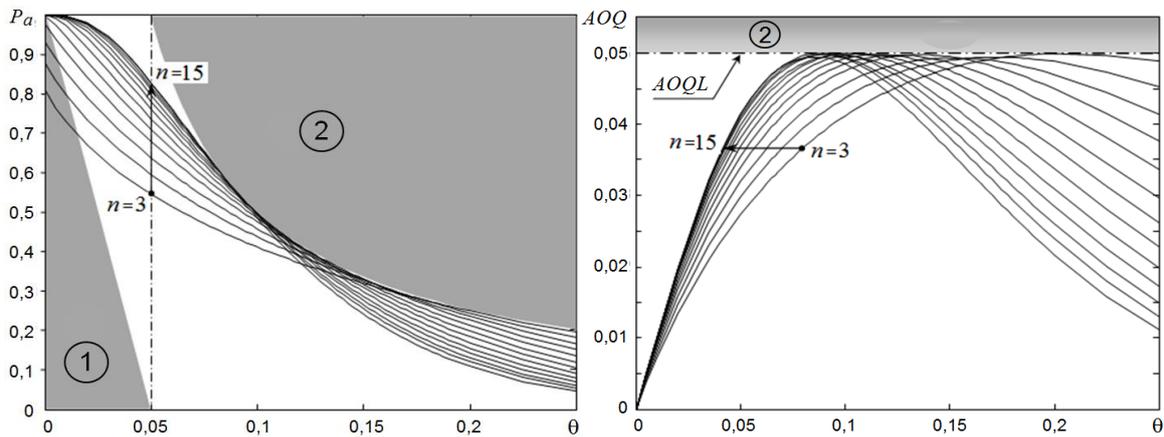


Рисунок 17 – Фильтрационные кривые OC и кривые $AOQL$ для экономического варианта непараметрического критерия

Таблица 6 – Значения тестовых коэффициентов критерия (16) для экономического оценивания соответствия прочности бетона с выборками большого объема

n	15	20	25	30	35
λ_1	-0,68	-0,89	-1,06	-1,22	-1,35
λ_2	-0,36	-0,55	-0,70	-0,85	-0,97

При подборе состава бетона с заданной характеристической прочностью f_{ck} рассчитывают среднюю прочность бетона f_{cm} для подлежащей производству партии:

$$f_{cm} = f_{ck} + k \cdot s, \quad (18)$$

где s – стандартное отклонение параметра прочности (обычно 5 или 4,8 МПа); $k = \Phi^{-1}(p - 1/2) \approx 1,645$ – коэффициент, определяемый как обратная функция Лапласа для условия назначения характеристической прочности по квантили уровня $p = 0,05$ вероятностного распределения.

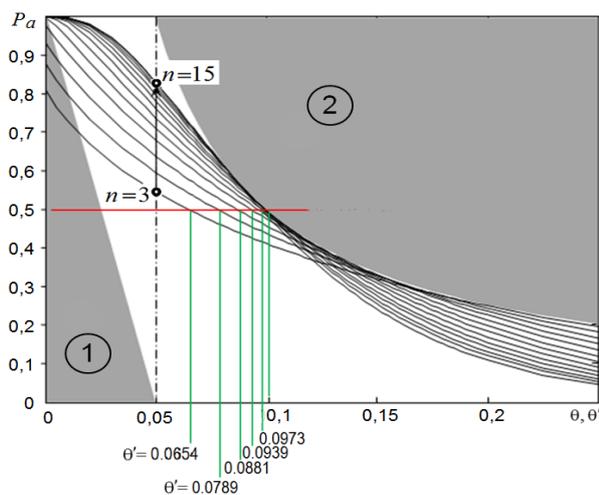


Рисунок 18– Определение рациональной дефектности при экономической оценке (18) соответствия прочности бетона с вероятностью приемки $P_a = 0,5$

Экономичная оценка (17) соответствия прочности бетона позволяет скорректировать (в сторону снижения) нормативное значение $k = 1,645$, применяемое для расчета средней прочности согласно (18). На рисунке 18 показано, что вероятности 0,5 приемки соответствует определенная, зависящая от объема выборки n , рациональная дефектность партии θ' . Рациональные, для производителя, значения коэффициента k' определены согласно рисунку 20 и приведены в таблице 7 для анализа величины снижения средней расчетной прочности.

Таблица 7 – Оценка снижения средней расчетной прочности при подборе состава бетона с применением экономичного варианта оценивания соответствия

n	Рациональная дефектность θ' , %	Рациональный коэффициент k'	$\Delta k = k' - 1,645$	Изменение средней расчетной прочности $\Delta k \times 5$, МПа
3	6,54	1,511	- 0,134	- 0,67
4	7,89	1,413	- 0,232	- 1,16
5	8,81	1,353	- 0,292	- 1,46
6	9,39	1,317	- 0,328	- 1,64
7	9,73	1,297	- 0,348	- 1,74
8...10	10,0	1,282	- 0,363	- 1,82
35	9,64	1,302	- 0,343	- 1,71
Существующий вариант расчета:				
3...35	5,0	1,645	-	-

Вследствие снижения средней расчетной прочности при подборе состава бетона уменьшается расход цемента: примерно на 8 кг в расчете на 1 МПа прочности для 1 м³ бетона. Принимая, по данным таблицы 7, усредненное снижение расчетной прочности 1,5 МПа, получаем, для годового объема производства в Республике Беларусь 1 750 тыс. м³ товарного бетона, потенциальную годовую экономию цемента на уровне 21 000 т, или более 5,1 млн руб. в денежном эквиваленте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложена методология статистического непараметрического оценивания эмпирических функций распределений базисных переменных, входящих в функцию состояния при проверках предельных состояний конструкций из бетона. На основе интервального оценивания вероятности принадлежности квантилей распределения непараметрическим интервалам вариационного ряда эмпирической выборки, вычисляют либо достоверность оценки для заданного уровня квантили, либо уровень квантили для заданной достоверности в точках на границах интервалов. Выполняя нелинейное преобразование шкалы достоверности оценки либо шкалы уровня квантили, находят линейную регрессию порядковых статистик с последующей интерполяцией или экстраполяцией для получения оценки квантилей с известной достоверностью в произвольных точках внутри интервалов или за пределами крайних интервалов [1, 5, 17–22, 24, 39–42, 46].

2. Разработана комплексная непараметрическая методика оценивания характеристических значений климатических нагрузок, в частности веса снегового покрова на поверхности земли, основанная на анализе правой хвостовой части эмпирических распределений. Методика включает установление принадлежности хвостовой части эмпирического распределения одному из типов распределений экстремальных значений (Гумбеля, Фреше, Вейбулла), либо прямой поиск положения квантили без выявления типа распределения

с применением линейной или нелинейной регрессии старших порядковых статистик с последующей интерполяцией для уровня квантили, соответствующего заданному периоду повторяемости (уровня 0,98 для 50-летнего периода отнесения). Выявление типа распределения основано на варьировании количества используемых старших порядковых статистик с поиском наилучшей регрессии (по коэффициенту детерминации), при этом выполняют проверку гипотезы о принадлежности наибольшей статистики к категории особых воздействий. Прямое оценивание распределения квантили основано на поиске линейной регрессии для пяти старших статистик в различных вариантах нелинейного преобразования шкалы вероятности (в частности, одно-, двух- или трехкратное логарифмирование). Получены характеристические значения нагрузки от снега и выполнено районирование территории Республики Беларусь по характеристическим значениям снеговой нагрузки с периодом повторяемости 50 лет, в том числе, впервые – по типам распределений экстремальных значений снеговой нагрузки, внедренные в практику проектирования [2, 4, 7, 23, 27, 28, 30–32, 34].

3. Выполнен анализ структурно-топологических свойств цементного материала, как композитной системы, с применением компьютерного моделирования упаковок дисперсных частиц различного гранулометрического состава. Показано, что полная макроскопическая однородность упаковок сферических полидисперсных частиц практически недостижима, при этом граничные эффекты заметно снижают как однородность, так и коэффициент (плотность) упаковки. Результаты исследования порога перколяции и координационного числа в многочастичных структурах позволяют заключить, что изменчивость свойств цементных композитов, в частности прочности бетона, не может быть сведена только лишь к внешним (рецептурным, технологическим) источникам, а обусловлена также внутренними – структурными и топологическими факторами [1, 6, 8, 9, 11, 12, 25, 26, 29, 33, 35, 43, 44].

4. Разработан и внедрен в практику проектирования концептуально новый метод непараметрического оценивания *in-situ* характеристической прочности бетона по выборкам результатов испытаний, ограниченного объема (начиная с 3-х результатов). Метод сформулирован в виде линейной непараметрической оценки характеристической прочности как 0,05-квантили вероятностного распределения прочности, вычисляемой по трем младшим порядковым статистикам. Тестовые коэффициенты оценки, которые соответствуют любой заданной достоверности из диапазона от 0,01 до 0,95, были получены компьютерным имитационным моделированием. Это позволило реализовать впервые разработанную методику численного восстановления эмпирического распределения квантили, соответствующей характеристической *in-situ* прочности бетона в существующей конструкции. Восстановленное распределение и функция состояния для существующей конструкции (в конкретных условиях ее нагружения) однозначно определяют функцию распределения вероятности ее отказа. Усредненная вероятность отказа, как средний уровень конструкционной надежности (*ALSR*), была предложена в качестве нового показателя надежности существующих конструкций.

Этому показателю соответствует эквивалентный уровень статистической достоверности, на котором оценивают характеристическую *in-situ* прочность бетона. Новый непараметрический метод оценивания прочности бетона универсален и применим также к выборкам результатов косвенных измерений или вычислительных экспериментов, например, в нелинейных задачах проектирования, в том числе для оценивания квантилей другого уровня [1, 3, 5, 10, 11, 13–21, 30, 36–40, 45, 46].

5. Разработан и внедрен в практику производства новый непараметрический критерий оценивания соответствия прочности бетона для условий начального производства с группами менее 35 результатов испытаний прочности. Критерий сформулирован в двух вариантах с соответствующими системами тестовых коэффициентов. Первый вариант предполагает фиксированную достоверность оценки 0,05-квантили прочности, уровень которой определяет желаемое соотношение рисков потребителя и производителя бетона (ошибок первого и второго рода). Второй вариант критерия предусматривает оценку квантили прочности с переменной достоверностью, и реализует экономичную (для производителя) схему оценивания, гарантирующую нормативный уровень выходного качества бетона (не более 5 % дефектности). Применение экономичной схемы оценивания позволяет снизить расчетную среднюю прочность проектируемого бетона и снизить расход цемента при коррекции начального состава бетона [1, 3, 9–13, 45].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Непараметрическая методика оценивания климатических нагрузок с анализом правой хвостовой части эмпирических распределений реализована при нормировании нагрузок и районировании территории Республики Беларусь. Результаты внедрены в ряд Технических кодексов установившейся практики:

– Национальное приложение к ТКП EN 1991-1-3-2009 «Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки» (карты районирования нагрузки для периода повторяемости 50 лет, в том числе с типами экстремальных распределений, таблица для пересчета на другие периоды повторяемости);

– Национальное приложение к ТКП EN 1991-1-4-2009 «Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия» (значения базовой скорости ветра для карты ветровых районов);

– Национальное приложение к ТКП EN 1991-1-5-2009 «Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-5. Общие воздействия. Температурные воздействия» (годовые минимальные и максимальные температуры наружного воздуха с годовой вероятностью превышения 0,02 для карт изолиний).

Непараметрическая методика интервального оценивания климатических нагрузок с линейным выравниванием по пяти старшим порядковым статистикам реализована при нормировании нагрузок и районировании территории для разработки ряда Строительных норм Республики Беларусь:

– СН 2.01.04-2019 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Снеговые нагрузки» (карта районирования нагрузки для периода повторяемости 50 лет с таблицей зависимости от высоты над уровнем моря);

– СН 2.01.05-2019 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Ветровые воздействия» (значения базовой скорости ветра для карты ветровых районов);

– СН 2.01.06-2019 «Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Температурные воздействия» (годовые минимальные и максимальные температуры наружного воздуха, с годовой вероятностью превышения 0,02).

Непараметрический метод оценивания прочности бетона с малыми выборками результатов испытаний внедрен в Стандарт Республики Беларусь СТБ 2264-2012 «Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности».

Новый критерий оценивания соответствия прочности бетона в условиях начального производства внедрен в Национальное приложение к СТБ EN 206-2016 «Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие».

Метод оценивания *in-situ* эквивалентной характеристической прочности бетона и критерий экономичного оценивания соответствия прочности для условий начального производства бетона включены в проект Стандарта Республики Беларусь «Бетоны конструкционные. Общие технические требования».

Обоснование принятия и нормирование конкретных мер надежности, в рамках общей концепции надежности строительных конструкций для Республики Беларусь, реализовано при разработке Строительных норм СН 2.01.01-2022 «Основы проектирования строительных конструкций».

Практическое использование результатов исследования подтверждено РУП «Стройтехнорм».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монография

1. Дереченник, С. С. Оценивание соответствия прочности бетона: теория и практика : моногр. / С. С. Дереченник, В. В. Тур. – Брест : Брест. гос. техн. ун-т, 2023. – 208 с.

Разделы монографий

2. Ground Snow Loads in Belarusian Code / V. Tur, V. Valuev, S. Derechennik, O. Meshik // Environmental Effects on Building, Structures, Materials and People / ed.: A. Flaga, T. Lipecki. – Lublin : Alf-Graf, 2007. – P. 131–138.

3. Tur, V. V. An Innovative Conformity Criterion for Assessment of the Concrete Strength Under Uncertainty Conditions / V. V. Tur, S. S. Derechennik // High Tech Concrete : Where Technology and Engineering Meet : proc. of the 2017 *fib* Symp., held in Maastricht, The Netherlands, 12–14 June 2017 / ed.: D. A. Hordijk, M. Luković. – Springer Intern. Publ. AG, 2018. – P. 1628–1635.

4. Климатические воздействия на конструкции зданий и сооружений / В. В. Тур, С. С. Дереченник, О. П. Мешик, А. В. Черноиван // Природообустройство Полесья : моногр. : в 4 кн. / под общ. науч. ред. Ю. А. Мажайского [и др.]. – Рязань : Мещер. фил. ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2017–2019. – Кн. 1 : Белорусское Полесье, Т. 1 : Природно-ресурсный потенциал. – 2018. – Разд. 3.9. – С. 235–246.

5. Tur, V. V. Checking of Structural System Robustness based on Pseudo-static Full Probabilistic Approach / V. V. Tur, A. V. Tur, S. S. Derechennik // Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures : proc. of the 2019 *fib* Symp., held in Kraków, Poland, 27–29 May 2019 / Wit Derkowski [et al.] (eds.). – Springer Intern. Publ. AG, 2019. – P. 2126–2133.

Статьи в рецензируемых научных журналах и в сборниках

6. Дереченник, С. С. Закономерности топологической неупорядоченности в плоских сечениях и объемах дисперсных систем / С. С. Дереченник, В. С. Разумейчик, В. В. Тур // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2005. – № 2 (32). – С. 18–25.

7. Нормирование снеговых нагрузок для территории Республики Беларусь / В. В. Тур, В. Е. Валуев, С. С. Дереченник, О. П. Мешик, И. С. Воскобойников // Строительная наука и техника. – 2008. – № 2 (17). – С. 27–45.

8. Разумейчик, В. С. Влияние микронаполнителя на процессы формирования микроструктуры цементного камня / В. С. Разумейчик, С. С. Дереченник // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2012. – № 1 (73). – С. 46–50.

9. Тур, В. В. Критерии оценки соответствия прочности бетона в подходах европейских и американских стандартов / В. В. Тур, С. С. Дереченник // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2012. – № 1 (73). – С. 173–178.

10. Тур, В. В. О применении критериев соответствия по EN206–1 : 2000 при оценивании прочности бетона в условиях предприятий с малыми объемами производства / В. В. Тур, С. С. Дереченник // Вісник ОДАБА : зб. наук. пр. / Одес. держ. акад. буд-ва та архітектури ; редкол.: В.С.Дорофеев (голов. ред.) [та ін.]. – Одеса : Зовнішрекламсервіс, 2012. – Вип. № 47. – С. 328–343.

11. Тур, В. В. О применении критериев соответствия прочности бетона согласно СТБ-EN 206-1 : 2000 / В. В. Тур, С. С. Дереченник, А. С. Дереченник // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: М. Ф. Марковский (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2012. – Вып. 4. – С. 152–176.

12. Статистический контроль прочности бетона на сжатие в соответствии с требованиями СТБ EN 206-1 : 2000 и ГОСТ 18105-2010 (EN 206-1 : 2000; NEQ) / В. В. Тур, С. С. Дереченник, Э. Щигельска, А. С. Дереченник // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2014. – № 1 (85). – С. 113–136.

13. Тур, В. В. Новый критерий для оценивания соответствия прочности бетона в условиях ограниченной выборки результатов испытаний / В. В. Тур, С. С. Дереченник // Стр-во и реконструкция. – 2016. – № 6 (68). – С. 71–84.

14. Тур, В. В. Новый подход к оцениванию прочности бетона на сжатие в существующих конструкциях // В. В. Тур, С. С. Дереченник, В. В. Колевчук // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 455–475.

15. Tur, V. V. Assessment of the Concrete Compressive Strength in Existing Structures Based on Core Test Results / V. V. Tur, S. S. Derechennik // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 272. – P. 238–243.

16. Дереченник, С. С. Новый подход к оцениванию *in-situ* характеристической прочности бетона в существующих железобетонных конструкциях при ограниченном количестве результатов полевых испытаний / С. С. Дереченник, В. В. Тур // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2018. – № 1 (109). – С. 109–115.

17. Derechennik, S. S. Adaptive Estimation of the *In Situ* Characteristic Concrete Strength / S. S. Derechennik, V. V. Tur // Solid State Phenomena. – 2019. – Vol. 292. – P. 257–263.

18. Tur, V. V. Non-Parametric Evaluation of the Characteristic *In-Situ* Concrete Compressive Strength / V. V. Tur, S. S. Derechennik // J. of Building Engineering. – 2020. – Vol. 27. – P. 1–11.

19. Тур, В. В. О назначении требуемых мер надежности при разработке национальных нормативных документов по проектированию строительных конструкций / В. В. Тур, А. В. Тур, С. С. Дереченник // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Стр-во и архитектура. – 2020. – № 1 (119). – С. 2–15.

20. Tur, V. V. Safety Formats for Non-Linear Analysis: Are the Current Structural Codes Applicable for Practice? / V. V. Tur, S. S. Derechennik, A. V. Tur // Solid State Phenomena. – 2020. – Vol. 309. – P. 193–200.

21. Tur, A. An Innovative Approach to a safety Format for the Estimation of Structural Robustness / A. Tur, V. Tur, S. Derechennik, A. Lizahub // Budownictwo i Architektura. – 2020. – Vol. 19, № 4. – P. 67–79.

22. Дереченник, С. С. Решение задачи анализа функции состояния на основе приближения хвостовых частей распределений случайных величин нагрузки и сопротивления / С. С. Дереченник, Н. Н. Мешечек // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2023. – № 1 (130). – С. 7–9.

23. Дереченник, С. С. Непараметрическое интервальное оценивание квантилей эмпирических распределений в задаче прогнозирования характеристических значений снеговых нагрузок / С. С. Дереченник // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2024. – № 1 (133). – С. 58–66.

24. Дереченник, С. С. Численное решение задачи оценивания эмпирической функции распределения для малых выборок с заданной достоверностью / С. С. Дереченник, Н. Н. Мешечек // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2024. – № 1 (133). – С. 67–71.

Статьи в других изданиях

25. Разумейчик, В. С. Анализ пористости композиционных материалов на основе процедуры изометрического покрытия поровых сегментов цифрового изображения / В. С. Разумейчик, А. С. Дереченник, С. С. Дереченник // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Физика, математика, информатика. – 2006. – № 5 (41). – С. 8–14.

26. Дереченник, С. С. Кардинальная размерность как фрактальная мера структурного потенциала дисперсных фаз / С. С. Дереченник // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2007. – № 3. – С. 27–32.

27. Картографирование основных характеристик снегового покрова по результатам комплексной статистической обработки данных метеорологических наблюдений / В. В. Тур, В. Е. Валуев, С. С. Дереченник, О. П. Мешик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во и теплоэнергетика. – 2008. – № 2 (50). – С. 2–10.

28. Опыт районирования территории Беларуси по снеговым нагрузкам / В. В. Тур, В. Е. Валуев, С. С. Дереченник, О. П. Мешик // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во и теплоэнергетика. – 2008. – № 2 (50). – С. 10–15.

29. Дереченник, С. С. Особенности перколяции в нерегулярных дисперсных структурах / С. С. Дереченник, А. С. Дереченник // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Физика, математика, информатика – 2008. – № 5 (53). – С. 95–98.

30. Дереченник, С. С. Интегральная оценка качества регрессионных моделей / С. С. Дереченник, А. В. Дмитриева, С. С. Дереченник (мл.) // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Физика, математика, информатика. – 2009. – № 5 (59). – С. 77–80.

31. О разработке национальных приложений к частям ЕН 1991-1-3, ЕН 1991-1-4 Еврокода 1 «Общие воздействия», устанавливающим требования к нормированию значений климатических воздействий / В. В. Тур, Е. Жураньски, С. С. Дереченник, А. В. Черноиван // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр.: в 2 ч. / Ин-т БелНИИС; редкол.: М. Ф. Марковский (гл. ред.) [и др.]. – Ч. I: Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск, 2009. – С. 424–457.

32. Дереченник, С. С. Автоматизация картографирования в задачах долгосрочного климатического прогнозирования / С. С. Дереченник, А. В. Дмитриева // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Физика, математика, информатика. – 2010. – № 5 (65). – С. 44–48.

33. Дивинец, А. А. Выбор вероятностного закона распределения для модельного описания дисперсности заполнителя бетонного композита / А. А. Дивинец, В. С. Разумейчик, С. С. Дереченник // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Физика, математика, информатика. – 2015. – № 5 (95). – С. 54–57.

34. Тур, В. В. Опыт разработки ГИС для назначения климатических воздействий на строительные конструкции зданий и сооружений / В. В. Тур, О. П. Мешик, С. С. Дереченник, А. В. Черноиван, А. А. Маркина // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Сер. Водохоз. стр-во, теплоэнергетика и геоэкология. – 2019. – № 2 (115) – С. 84–90.

Статьи в сборниках материалов конференций

35. Разработка теоретических основ, методов и средств моделирования неупорядоченных микро- и мезоструктур в композитных системах на базе цементных материалов / С. С. Дереченник, В. С. Разумейчик, А. С. Дереченник, Е. Г. Волков, В. В. Буслюк, Б. Н. Склипус // Современ. строит. технологии и материалы. Импортзамещающие приборы для диагностики и контроля качества в стр-ве : сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. семинара по реализации задач ГПОФИ «Стр-во и архитектура» (II Workshop C&A 2007), Минск, 19–21 сент. 2007 г. : в 3 т. / НАН Беларуси ; М-во стр-ва и архитектуры Респ. Беларусь ; М-во образования Респ. Беларусь ; Белорус. нац. техн. ун-т ; ред.: Б. М. Хрусталева, С. Н. Леонович. – Минск, 2008. – Т. 2. – С.135–148.

36. Тур, В. В. Подходы к построению градуировочных зависимостей для оценивания прочности бетона на сжатие, принятые в СТБ EN 13791 и отечественных стандартах / В. В. Тур, С. С. Дереченник, В. В. Колевчук // Безопасность строит. фонда России. Проблемы и решения : материалы междунар. академ. чтений, Курск, 24–25 нояб. 2016 г. / Курский гос. техн. ун-т ; редкол.: С. И. Меркулов (отв. ред.) [и др.]. – Курск, 2016. – С. 143–152.

37. Tur, V. Assessment of the Concrete Compressive Strength in Existing Structures based on Core Test Results / V. Tur, S. Derechennik // 24. Betonářské dny 2017 (24th Czech Concrete Days) : sb. příspěv. konf., Litomyšl, Česká republika, 22. a 23. list. 2017 / Praha : Česká betonářská společnost. ČSSI ; ed.: Tereza Viltová [et al.]. – Praha, 2017. – P. 1–6.

38. Дереченник, С. С. Новый метод оценивания *in-situ* характеристической прочности бетона с учетом надежности существующих железобетонных конструкций / С. С. Дереченник, В. В. Тур // Перспективные направления инновац. развития стр-ва и подгот. инженерных кадров : сб. науч. ст. XXI Междунар. науч.-метод. семинара, Брест, 25–26 окт. 2018 г. : в 2 ч. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест, 2018. – Ч. II. – С. 23–38.

39. Derechennik, S. Adaptive Estimation of the *in-situ* Characteristic Compressive Strength / S. Derechennik, V. Tur // 25. Betonářské dny 2018 (25th Czech Concrete Days) : sb. příspěv. konf., Praha, Česká republika, 21. a 22. list. 2018 / Česká betonářská společnost. ČSSI ; ed.: Tereza Viltová [et al.]. – Praha, 2018. – P. 1–7.

40. Tur, V. Safety Formats for Non-Linear Analysis: Are the Current Structural Codes Applicable for Practice ? / V. Tur, S. Derechennik, A. Tur // 26. Betonářské dny 2019 (26th Czech Concrete Days) : sb. příspěv. konf., Hradec Kralove, Česká republika, 20. a 21. list. 2019 / Česká betonářská společnost. ČSSI ; ed.: Tereza Viltová [et al.]. – Praha, 2019. – P. 1–7.

41. Дереченник, С. С. Возможности применения порядковых статистик в задачах обеспечения надежности технических объектов / С. С. Дереченник // Цифровая среда : технологии и перспективы : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Брест, 31 окт. 2022 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест, 2022. – С. 7–13.

42. Дереченник, С. С. Анализ вероятности отказа конструкции на основе приближения хвостовых частей распределений случайных величин сопротивления и нагрузки / С. С. Дереченник, Н. Н. Мешечек // Цифровая среда : технологии и перспективы : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Брест, 31 окт. 2022 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: Н. Н. Шалобыта [и др.]. – Брест, 2022. – С. 57–60.

Тезисы докладов научных конференций

43. Statistical reconstruction and stochastic modeling of non-ordered structures in cement composite systems / S. S. Derechennik, V. S. Razumeichik, A. S. Derechennik, E. G. Volkov, V. V. Busliuk, B. N. Sklipus // Construction and Architecture : proc. of Intern. Conf. (2 Workshop C&A 2007), Minsk, 19–21 Sept. 2007 : in 3 vol. / Nat. Acad. of Science of Belarus ; Belarusian Nat. Techn. Univ. ; ed.: V. Khroustaliev, S. Leonovich. – Minsk, 2008. – Vol. 3. – P. 43–44.

44. Дереченник, А. С. Случайная перколяция в неупорядоченной дисперсной структуре типичного композиционного материала / А. С. Дереченник, С. С. Дереченник // Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 45-летию МРТИ-БГУИР : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19 марта 2009 г. / М-во образования Респ. Беларусь ; М-во пром-сти Респ. Беларусь ; Гос. ком. по науке и технологиям Респ. Беларусь ; Белорус. респ. фонд фундам. исслед. ; Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники ; Междунар. Алферовский фонд поддержки образования и науки. – Минск : БГУИР, 2009. – С. 167.

45. Tur, V. V. An Innovation Conformity Criterion for Assessment of the Concrete Strength Under Uncertainty Conditions / V. V. Tur, S. S. Derechennik // High Tech Concrete : Where Technology and Engineering Meet : Book of Abstr. for 2017 *fib* Symp., MECC Maastricht, The Netherlands, 12–14 June 2017 / Fédération Intern. du Béton (*fib*) ; ed.: D. A. Hordijk, M. Luković. – Lausanne, Switzerland, 2017. – P. 128.

46. Tur, V. V. Checking of Structural System Robustness based on Pseudo-static Full Probabilistic Approach / V. V. Tur, A. V. Tur, S. S. Derechennik // Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures : Book of Abstr. for 2019 *fib* Symp., Kraków, Poland, 27–29 May 2019 / Fédération Intern. du Béton (*fib*) ; ed.: Wit Derkowski [et al.]. – Kraków, Poland, 2019. – P. 597–598.

РЭЗІЮМЭ

Дзерачэннік Станіслаў Станіслававіч

Прагназаванне надзейнасці будаўнічых збудаванняў з бетону пры абмежаваным аб'ёме эмпірычных дадзеных

Ключавыя словы: верагоднасць адмовы, эмпірычнае размеркаванне верагоднасці, квантыль размеркавання, кліматычная нагрузка, трываласць бетону на сціск, дакладнасць ацэнкі.

Мэта працы: Канцэптуальнае развіццё навукова абгрунтаваных падыходаў да вырашэння актуальнай навукова-тэхнічнай праблемы забеспячэння надзейнасці будаўнічых збудаванняў з бетону пры іх праектаванні, узвядзенні і эксплуатацыі, ва ўмовах абмежаванага аб'ёму эмпірычнай інфармацыі аб трываласных уласцівасцях бетону і вырабаў з яго, а таксама аб кліматычных нагрузках і ўздзеяннях на будаўнічыя збудаванні.

Метады даследавання: збор эмпірычных дадзеных, кампутарнае імітацыйнае мадэляванне, імавернасна-тэарэтычны аналіз, непараметрычны статыстычны аналіз, рэгрэсійны аналіз, прагназаванне.

Асноўныя вынікі. Прапанавана метадалогія статыстычнага непараметрычнага ацэньвання, з вядомай дакладнасцю, кванты эмпірычных функцый размеркаванняў базісных зменных, якія ўваходзяць у функцыю стану. Распрацавана комплексная непараметрычная метадыка ацэньвання характарыстычных значэнняў кліматычных нагрузкаў, у прыватнасці вагі снегавага покрыва на паверхні зямлі, з выяўленнем або без выяўлення экстрэмальнага тыпу размеркавання нагрузкаў, з лінейнай або нелінейнай рэгрэсіяй старэйшых парадкавых статыстык. З ужываннем кампутарнага мадэлявання упакоўак дысперсных часціц устаноўлены ўнутраныя, структурна-тапалагічныя фактары зменлівасць ўласцівасці трываласці бетону як цэментавага кампазіта. Распрацаваны і ўкаранёны ў практыку праектавання канцэптуальна новы метады непараметрычнага ацэньвання характарыстычнай трываласці бетону па выбарках вынікаў выпрабаванняў абмежаванага аб'ёму, пачынаючы з 3-х вынікаў. Лінейная непараметрычная ацэнка характарыстычнай трываласці, як 0,05-кванцілі эмпірычнага размеркавання трываласці, вылічаецца па трох малодшых парадкавых статыстыках. Упершыню распрацавана метадыка колькаснага аднаўлення эмпірычнага размеркавання квантылі. Прапанаваны новы паказчык надзейнасці існуючых канструкцый – сярэдні ўзровень канструкцыйнай надзейнасці, а таксама метадыка вызначэння эквівалентнай яму характарыстычнай трываласці бетону. Распрацаваны і ўкаранёны ў практыку вытворчасці новы непараметрычны крытэрыі для ацэньвання адпаведнасці трываласці бетону ва ўмовах пачатковай вытворчасці – з фіксаваным або пераменным, па эканамічнай для вытворцы схеме, узроўнем дакладнасці ацэнкі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі ўкаранёны ў шэраг Стандартаў і Тэхнічных кодэксаў Рэспублікі Беларусь.

Вобласць ужывання: праектаванне будаўнічых збудаванняў, нарміраванне кліматычных уздзеянняў, вытворчы кантроль бетону.

РЕЗЮМЕ

Дереченник Станислав Станиславович

Прогнозирование надежности строительных сооружений из бетона при ограниченном объеме эмпирических данных

Ключевые слова: вероятность отказа, эмпирическое распределение вероятности, квантиль распределения, климатическая нагрузка, прочность бетона на сжатие, достоверность оценки.

Цель работы: Концептуальное развитие научно обоснованных подходов к решению актуальной научно-технической проблемы обеспечения надежности строительных сооружений из бетона при их проектировании, возведении и эксплуатации, в условиях ограниченного объема эмпирической информации о прочностных свойствах бетона и изделий из него, а также о климатических нагрузках и воздействиях на строительные сооружения.

Методы исследования: сбор эмпирических данных, компьютерное имитационное моделирование, вероятностно-теоретический анализ, непараметрический статистический анализ, регрессионный анализ, прогнозирование.

Основные результаты. Предложена методология статистического непараметрического оценивания, с известной достоверностью, квантилей эмпирических функций распределений базисных переменных, входящих в функцию состояния. Разработана комплексная непараметрическая методика оценивания характеристических значений климатических нагрузок, в частности веса снегового покрова на поверхности земли, с выявлением либо без выявления экстремального типа распределения нагрузки, с линейной или нелинейной регрессией старших порядковых статистик. С применением компьютерного моделирования упаковок дисперсных частиц установлены внутренние, структурно-топологические факторы изменчивости свойства прочности бетона как цементного композита. Разработан и внедрен в практику проектирования концептуально новый метод непараметрического оценивания характеристической прочности бетона по выборкам результатов испытаний ограниченного объема, начиная с 3-х результатов. Линейная непараметрическая оценка характеристической прочности, как 0,05-квантили эмпирического распределения прочности, вычисляется по трем младшим порядковым статистикам. Впервые разработана методика численного восстановления эмпирического распределения квантили. Предложен новый показатель надежности существующих конструкций – средний уровень конструкционной надежности, а также методика определения эквивалентной ему характеристической прочности бетона. Разработан и внедрен в практику производства новый непараметрический критерий для оценивания соответствия прочности бетона в условиях начального производства – с фиксированным или переменным, по экономической для производителя схеме, уровнем достоверности оценки.

Рекомендации по использованию: результаты внедрены в ряд Стандартов и Технических кодексов Республики Беларусь.

Область применения: проектирование строительных сооружений, нормирование климатических воздействий, производственный контроль бетона.

SUMMARY

Stanislav S. Derechennik

Predicting the reliability of concrete structures based on limited empirical data

Keywords: failure probability, empirical probability distribution, quantile of distribution, climatic load, compressive strength of concrete, estimation confidence level.

The objective of work: conceptual development of scientifically based approaches to solving the current scientific and technical problem of ensuring the reliability of concrete building structures during their design, construction and operation, in conditions of a limited empirical information on the strength properties of concrete and products made from it, as well as on climatic loads and impacts on building structures.

Methods: collection of empirical data, computer simulation modeling, probability-theoretical analysis, nonparametric statistical analysis, regression analysis, predicting.

Main results. A methodology for statistical non-parametric estimation, with known confidence level, of quantiles of empirical distribution functions of basic variables included in the state function is proposed. A comprehensive non-parametric technique for estimating characteristic values of climatic loads, in particular the weight of snow covers on the earth's surface, with or without identifying an extreme type of load distribution with linear or nonlinear regression of senior order statistics has been developed. Using computer modeling of dispersed particle packing's, internal, structural and topological factors of variability of the strength properties of concrete as a cement composite were established. A conceptually new method of non-parametric evaluation of characteristic strength of concrete based on samples of limited volume test results, starting with 3 results, was developed and implemented in design practice. Linear non-parametric evaluation of characteristic strength as 0.05-quantiles of empirical strength distribution is calculated using three junior order statistics. For the first time, a method for numerical reconstruction of the empirical distribution of quantiles has been developed. A new indicator of the reliability of existing structures has been proposed – the average level of structural reliability, as well as a method for determining the characteristic strength of concrete equivalent to it. A new non-parametric criterion for assessing the compliance of concrete strength under initial production conditions has been developed and implemented in production practice – with a fixed or variable, according to a scheme that is economical for the manufacturer, estimation confidence level.

Implementation consideration: the results have been implemented in a number of Standards and Technical Codes of the Republic of Belarus.

Scope: design of building structures, standardization of climatic impacts, production control of concrete.



Научное издание

ДЕРЕЧЕННИК
Станислав Станиславович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ
СООРУЖЕНИЙ ИЗ БЕТОНА ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ
ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

по специальности

05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения

Подписано в печать 08.05.2025. Формат 60×84 1/16. Бумага «Performer».

Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 80 экз. Заказ 419.

Печать цифровая. Изготовлено и отпечатано в типографии учреждения
образования «Брестский государственный технический университет»
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1569 от 16.10.2017 г.