

На правах рукописи



Ахмед Ахмед Рамадан Ахмед

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАНТОВОГО МОСТА**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель **Ермошин Николай Алексеевич**
доктор военных наук, профессор

Официальные оппоненты: **Белый Андрей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, технический директор, ООО «К2 Инжиниринг», г. Москва

Козак Николай Викторович
кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных систем и дорожно-мостового строительства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «24» апреля 2026 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.8.53 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «23» марта 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.8.53,
д.т.н., доцент



Баденко В.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В вантовых мостовых сооружениях повреждение или выход из строя основных конструктивных элементов, таких как ванты (кабели), вызванное экстремальными нагрузками, а также ненадлежащей организацией и выполнением мероприятий по эксплуатации вантовой системы, фреттинг-коррозией и др., могут привести к прогрессирующему разрушению, а затем и к обрушению всего моста. Нагрузка, переносимая вышедшим из строя кабелем, должна быть перераспределена на смежный кабель, который становится критическим кабелем. Анализ внезапных отказов кабельных систем в вантовых мостах чрезвычайно важен для предотвращения аварий и катастроф, а также предотвращения социально-экономических ущербов.

Степень разработанности темы. К настоящему моменту выполнено большое количество теоретических и экспериментальных исследований в области оценки безотказности работы вантовых мостов. Вместе с тем, остаются недостаточно исследованными вопросы оценки и обеспечения многопараметрической надежности кабельных систем вантовых мостов при их проектировании и эксплуатации, а также методы определения оптимального соотношения между стоимостью и надежностью вантовых мостовых конструкций, управления качеством проектирования, строительства и эксплуатации вантовых мостов.

Проблема прогрессирующего разрушения вантовых мостов изучалась в исследованиях Michel Ghosn, Feng Miao, Hoang Trong Khuyen, Eiji Iwasaki, С.М. Mozos, Ángel Carlos Aparicio, Paolo Lonetti, Arturo Pascuzzo, Wenliang Qiu, Meng Jiang, Cailiang Huang, Guangrun Wu, Mohammad Shoghijavan, Yukari Aoki, Передерия Г.П., Протасова К.Г., Дивавина В. М., Солохина В.Ф., Крыльцова В.И., Кадисова Г.М., Чернышова В.В., Смирнова В.Н., Ермошина Н. А., Белого А. А., Козак Н. В. и других авторов. В этих работах проанализированы ситуации, связанные с разрушением вантовых мостов, а также условия, приводящие к разрушению конструкции вант. По сравнению с ранее запроектированными мостами, расстояние между двумя соседними кабелями на современных мостах значительно меньше, поэтому существует высокая вероятность обрыва кабеля в случае дорожно-транспортного происшествия или взрыва на эксплуатирующемся мосту. Соответственно, многие исследователи, включая Ana Maria Ruiz-Terán, Yufen Zhou, Suren Chen, Jose M. Adam, Fulvio Parisi, Juan Sagaseta, Xinzheng Lu, Gianni Arioli, Filippo Gazzola, Проскуракова Л.Д., Овчинникова И.Г., Корнеева М.М., Барановского А. А., изучали этот вопрос. Однако, несмотря на выполненные исследования, по-прежнему недостаточно рассмотрены способы обеспечения многопараметрической надежности вантовых мостов при их проектировании и эксплуатации, не решены вопросы научного обоснования качества проектирования, строительства и эксплуатации вантовых мостов, не обоснован оптимальный баланс между стоимостью и надежностью этих уникальных транспортных сооружений.

Цель исследования состоит в разработке методов научного обоснования технических решений повышения эксплуатационных свойств несущих

конструктивных элементов вантовых автодорожных мостов и оптимизации издержек на выполнение работ по их строительству и обеспечению безопасной эксплуатации.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, пунктам:

2. Разработка и совершенствование теоретических и экспериментальных методов проектирования, строительства, реконструкции и эксплуатации транспортных сооружений.

14. Разработка новых и совершенствование существующих методов и средств математического и физического моделирования работы конструкций, технологических процессов, организации и оперативного управления строительным производством, режимов эксплуатации и оценки технических и экологических рисков при строительстве, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений, их элементов, объектов и производств.

21. Исследование аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации дорог и транспортных сооружений. Оценка степени риска возникновения аварийных ситуаций. Совершенствование методов профилактики и предотвращение возможных аварий и скорейшей ликвидации их последствий.

Объектом исследования является вантовая система мостовых сооружений на автомобильных дорогах.

Предмет исследования составляют методы, модели, методики, технические и технологические решения повышения эксплуатационных свойств конструктивных элементов вантовой системы мостовых сооружений на автомобильных дорогах.

Научная задача состоит в разработке методов научного обоснования технических решений повышения эксплуатационных свойств несущих конструктивных элементов вантовых автодорожных мостов и оценке критических нагрузок вантовой системы.

Задачи, которые необходимо было решить в ходе исследования:

1. Анализ технических решений конструктивных элементов вантовой системы мостовых сооружений на автомобильных дорогах.

2. Исследование методов обоснования конструкции и эксплуатационных свойств конструктивных элементов вантовой системы мостовых сооружений на автомобильных дорогах.

3. Обоснование и количественное эквивалентирование факторов повышения эксплуатационных свойств конструктивных элементов вантовой системы автодорожных мостов.

4. Разработка имитационной модели работы конструктивных элементов вантовой системы мостовых сооружений на автомобильных дорогах.

5. Разработка методики обоснования технических решений конструктивных элементов вантовой системы автодорожных мостов.

6. Экспериментальная проверка методов обоснования технических решений конструктивных элементов вантовой системы автодорожных мостов.

7. Разработка и технико-экономическая оценка технических решений

конструктивных элементов вантовой системы автодорожных мостов.

Научная новизна диссертации определяется разработкой методов обоснования технических решений конструктивных элементов вантовой системы автодорожных мостов, *учитывающих* стохастический характер интенсивности и состава транспортных потоков, условий строительства и эксплуатации вантовых автодорожных мостов, воздействие обрыва вант на увеличение силы реакции в смежных вантах; *отличающихся* применением принципов системного подхода, методов имитационного моделирования и математической теории надежности, планирования эксперимента, *позволивших* выявить закономерности влияния физико-механических характеристик материалов и конструктивных параметров элементов вантовой системы автодорожных мостов, вариации интенсивности и состава транспортного потока, природных и техногенных факторов на срок безотказной работы вант, анкерных и демпфирующих устройств, а также обосновать новые зависимости для определения коэффициента жесткости, индекса надежности и динамического отклика вантовой системы, изгибающих моментов и прогибов в балке, вертикального смещения узлов, аппроксимирующие функции растягивающих сил смежных кабелей при обрывах вант и на этой основе определить технические, технологические и организационно-экономические решения по повышению эксплуатационных свойств надежности.

Теоретическая значимость диссертации заключается в дальнейшем развитии существующих методов теоретических и экспериментальных исследования аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации транспортных сооружений, проектирования мероприятий и конструкций по инженерной защите вантовых мостов от воздействия опасных природных и природно-техногенных процессов (оползни, обвалы, сели, карст, подтопление, лавины, сейсмика, тектоника, абразия, дефляция, криогенные процессы и др.), а также в разработке новых методов и средств математического и физического моделирования работы несущих конструктивных элементов мостов вантовой схемы.

Практическая значимость диссертации состоит в том, что применение разработанных теоретических положений позволит обеспечить требуемую надежность конструктивных элементов вантовой системы мостов при их проектировании и строительстве, повысить безопасность эксплуатации вантовых мостов с учетом приемлемых значений технических и экологических рисков на основе выявления закономерностей расчета оптимального соотношения между надежностью и экономичностью принимаемых технических и технологических решений при проектировании и строительстве вантовых мостов.

Обоснованность методов научного обоснования технических решений конструктивных элементов вантовой системы автодорожных мостов, выводов и рекомендаций исследования подтверждается точностью и достоверностью исходных данных; корректным использованием апробированных методов имитационного моделирования надежности мостовых и дорожных конструкций по прочности при их проектировании, методов оценки безотказности конструктивных элементов вантовой системы мостовых сооружений на автомобильных дорогах по прочности при их эксплуатации с примерами расчетов; сходимостью

эмпирического распределения показателей надежности с теоретическими законами распределения; статистической значимостью коэффициентов вариации показателей эксплуатационных свойств конструктивных элементов вантовой системы; обоснованием результатов исследования на основе нормативных документов по техническому регулированию дорожной деятельности в РФ. Научные выводы и рекомендации диссертации основываются на результатах фундаментальных исследований по математической теории надежности и теории риска технических систем.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Методика обоснования технических решений конструктивных элементов вантовой системы автодорожных мостов.

2. Имитационная модель работы конструктивных элементов вантовой системы мостовых сооружений на автомобильных дорогах.

Достоверность научных результатов диссертации, научных выводов и рекомендаций подтверждены за счет применения широко апробированных на практике методов исследований операций и процессов, оценки надежности технических систем и строительных конструкций; учетом воздействия транспортного потока, сейсмических воздействий и конструктивных особенностей вантовой системы на эксплуатационные свойства вантовых мостов; воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований и верификации аппроксимирующих функций растягивающих сил смежных кабелей при обрывах вант; проверкой адекватности разработанных теоретических положений.

Основные результаты исследования, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, с достаточной полнотой изложены в 7 статьях, 3-х опубликованных в журналах, включенных в перечень научных изданий ВАК РФ, и в 4-х статьях, индексируемых в базе данных Scopus.

Апробация результатов работы

Настоящая работа выполнена автором в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Экспериментальные исследования и лабораторные эксперименты по разработке и тестированию мостовых опор проведены на заводе «Ривер» (River factory for manufacturing bridge bearings), в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого и Каирском университете (мостостроительный инженерный факультет) в Египте. Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» при подготовке бакалавров и магистров. Материалы диссертационной работы представлены на конференциях: Ahmed, Ahmed Ramadan, and Nikolay Ermoshin. "Assessment of the Cable-Stayed and Cable Damping System Used in the Russky Bridge and Determination of the Force Acting on the Bridge's Cables" XV International Scientific Conference "Interagromash 2022". Lecture Notes in Networks and Systems, vol 575. Springer, Cham DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_304; Ахмед Р.А., Ермошин Н.А., Поведение и работоспособность вантовых мостов при внезапном обрыве кабеля, XXV International Scientific

Внедрение результатов исследования. Результаты исследования внедрены в производственной деятельности завода «Ривер» (River factory for manufacturing bridge bearings), что подтверждается актом внедрения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы (111 наименование) и 2 приложений. Работа изложена на 246 странице машинописного текста, включающего 40 таблицу, 61 рисунок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, определены объект и предмет исследования. Раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** обоснована универсальная формула для расчета коэффициента увеличения напряжения на критический вант (кабель) в результате повреждения смежного ванта (кабеля) в вантовой системе. Поскольку система является целостной (рисунок 1), то для оценки изгибающего момента в балке используется следующее соотношение:

$$\begin{cases} M(x) = P_5 x & , \quad 0 \leq x \leq L \\ M(x) = P_5 x + P_4(x - L_1) & , \quad L \leq x \leq 2L \\ M(x) = P_5 x + P_4(x - L_1) + P_3(x - 2L_1) & , \quad 2L \leq x \leq 3L \end{cases} \quad (1)$$

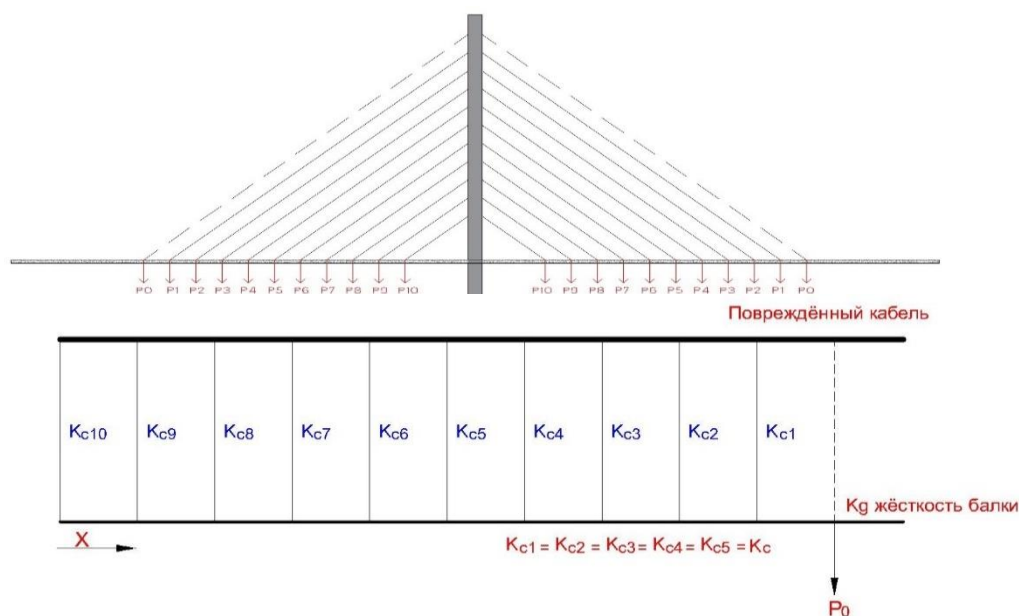


Рисунок 1 – Принципиальная схема вантовой системы моста

Проинтегрировав элементы соотношения (1) с учетом n- кабелей, получаем систему линейных уравнений (2). Решение полученной системы линейных уравнений дает значение осевой силы в каждом ванте (кабеле). Система линейных уравнений для вантовой схемы с произвольным количеством кабелей строится с учетом коэффициента жесткости системы β . Этот параметр характеризует

соотношение между способностью балки сопротивляться изгибу и способностью кабелей воспринимать вертикальные нагрузки (абсолютно жесткая балка ($\beta \rightarrow \infty$), очень гибкая балка ($\beta \rightarrow 0$), ($\beta = EI_c / k_c L_i^3$):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_n + P_{n-1} + P_{n-2} + \dots + P_1 = \frac{P_0}{2} \\ 6\beta P_n + 6\beta P_{n-1} + (12\beta - 1)P_n + 6P_{n-1} = 0 \\ 12\beta P_n + 6\beta P_{n-1} + 6\beta P_{n-2} + (12\beta - 1)P_{n-1} + 6P_{n-2} = 0 \\ 18\beta P_n + 12\beta P_{n-1} + 6\beta P_{n-2} + (12\beta - 1)P_{n-2} + 6P_{n-3} = 0 \\ 24\beta P_n + 18\beta P_{n-1} + 12\beta P_{n-2} + 6\beta P_{n-3} + (12\beta - 1)P_{n-3} + 6P_{n-4} = 0 \\ \vdots \\ 6(n-3)\beta P_n + 6(n-4)\beta P_{n-1} + \dots + 6\beta P_3 + (12\beta - 1)P_3 + 6P_2 = 0 \\ 6(n-2)\beta P_n + 6(n-3)\beta P_{n-1} + \dots + 6\beta P_2 + (12\beta - 1)P_2 + 6P_1 = 0 \\ 6(n-1)\beta P_n + 6(n-2)\beta P_{n-1} + 6(n-3)\beta P_{n-2} + \dots + 12\beta P_2 + (6\beta - 3)P_1 + 6P_2 = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

где P_0 - начальная нагрузка на повреждённый кабель до его разрыва, N . P_i - нагрузка в кабеле с номером i после перераспределения, N .

Максимальное усилие в кабеле и максимальный изгибающий момент балки после разрыва кабеля определяются как расчётные усилия P_i в вантах и расчётный изгибающий момент $M_{\text{балки}}$ в балке. Исходя из этого для расчета усилия P_1 предлагается применять полиномиальную функцию параметра β :

$$P_1 = P_0 \cdot \frac{216 + 4425\beta + 8820\beta^2 + 2160\beta^3}{1728 + 24336\beta + 59760\beta^2 + 17280\beta^3}. \quad (3)$$

В этой же главе на основе обработки результатов экспериментальных исследований получены формулы коэффициентов увеличения напряжения в кабеле (p_i/p_0) для систем с n кабелями, как функции β по формуле:

$$\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P_0} = \frac{a_0 + a_1\beta + a_2\beta^2 + a_3\beta^3 + a_i\beta + \dots + a_n\beta}{a_0' + a_1'\beta + a_2'\beta^2 + a_3'\beta^3 + a_i'\beta + \dots + a_n'\beta}. \quad (4)$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – параметры аппроксимирующей функции, определяемые по результатам регрессионного анализа.

На рисунке 2 показано изменение относительного усилия P_i/P_0 в кабеле в зависимости от параметра β для систем с различным числом вант: 5, 7, 9 и 11. Все кривые демонстрируют монотонное снижение усилия по мере изменения параметра β . Это отражает выявленную особенность вантовых систем: с ростом относительной гибкости балки (уменьшение β) доля нагрузки, воспринимаемая отдельным кабелем, уменьшается.

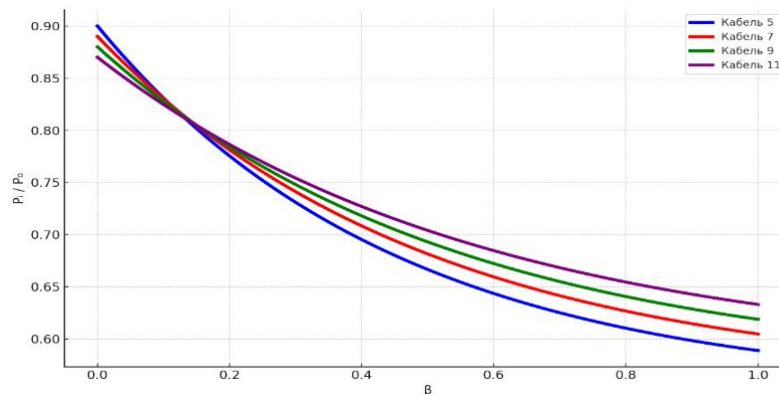


Рисунок 2 – Влияние β на относительное усилие в кабеле для систем с различным числом вант

Результаты расчётов β для систем с различным числом вант показаны на рисунке 3. Установлено, что при увеличении количества вант расстояние между ними уменьшается. Уменьшение шага L_t приводит к значительному увеличению коэффициента β . Это означает, что при большем числе вант: балка получает больше точек опирания; система становится более жёсткой; деформации под нагрузкой уменьшаются.

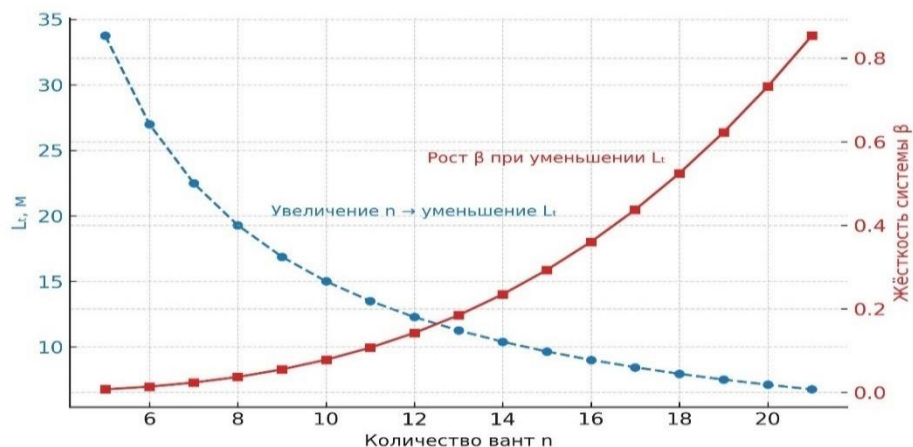


Рисунок 3 – Графическая зависимость жёсткости системы β и шагом L и числом вант n

График, показанный на рисунке 4, иллюстрирует совпадение распределения напряжений P_i/P_0 , полученных по аналитической модели, с результатами расчёта в SAP. Погрешность между аналитическими и численными значениями не превышает ± 0.003 , что подтверждает надёжность аппроксимации.

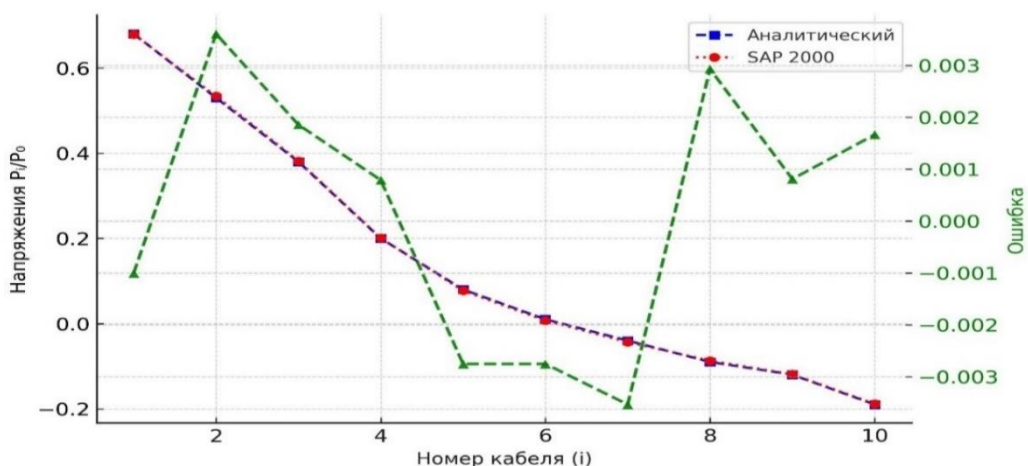


Рисунок 4 – Сравнение распределения напряжений P_i/P_0 , полученных аналитически и в SAP, и соответствующих ошибок

В этой же главе получена формула для определения максимального изгибающего момента балки при отказе ванта:

$$M_{max} = M_0 + \frac{P_0 \cdot L_t}{4} \times \left[1 + \frac{\beta}{2(1 + \beta)} \right]. \quad (5)$$

где: M_0 – момент до отказа.

Важно отметить, что коэффициент P_1/P_0 для любого кабеля может быть определен с учетом формулы (4). Однако, для системы с $2n$ кабелями необходимо найти $2n$ коэффициентов, что требует аппроксимации предыдущего уравнения (4) функцией, имеющей как можно меньше неизвестных коэффициентов. Установлено, что общая форма приближения такой функции будет иметь следующий вид:

$$P_1(\beta, n) = \frac{1}{2n} + \frac{1.5n - 1}{2n \cdot [1 + (a_2\beta)^{a_3}]} \quad (6)$$

Параметры a_2 и a_3 определяют форму переходной кривой между предельными состояниями и подлежат идентификации методами регрессионного анализа.

На рисунке 5 показаны графики выявленных в исследовании функций $a_i(n)$. Из анализа видно, что: зависимости отражают эволюцию параметров аппроксимирующей модели a_0, a_1, a_2, a_3 для систем с числом вант от 5 до 21. При увеличении числа вант n система становится более избыточной, а распределение усилий после повреждения одной ванты — менее локализованным.

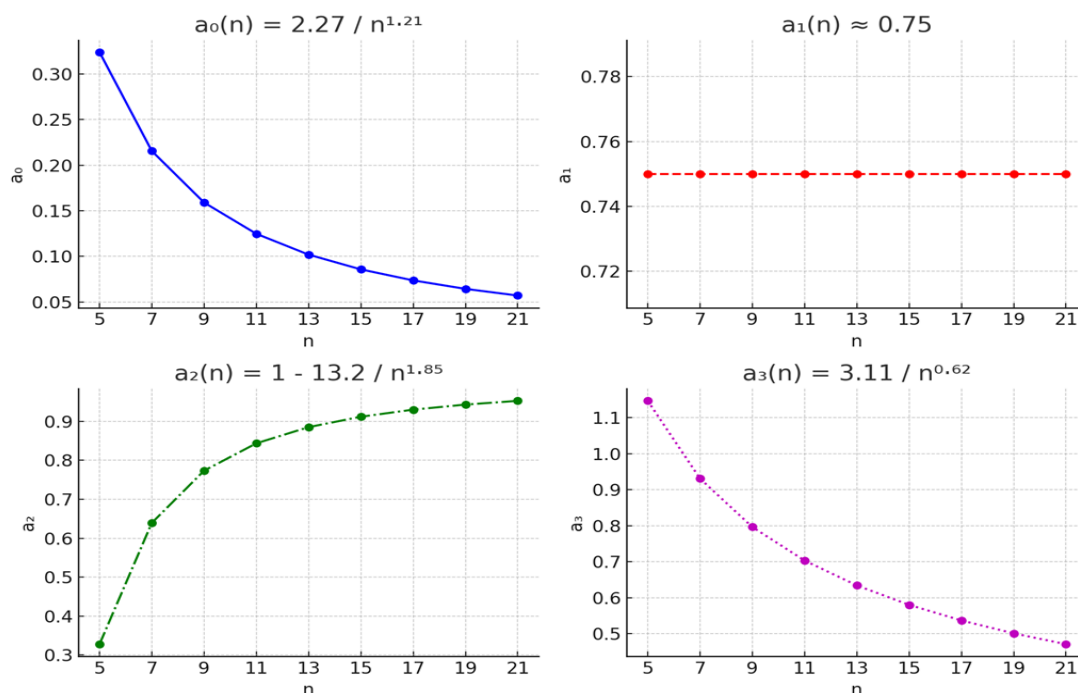


Рисунок 5 - Аппроксимирующие функции зависимости параметров $a_0(n), a_1(n), a_2(n), a_3(n)$ для вантовых систем с различными количествами вант n

Для определения коэффициента увеличения напряжения в критическом кабеле после повреждения нескольких кабелей предлагается пошаговый метод.

На первом шаге предполагается, что вышел из строя только один кабель и вычисляется увеличение напряжения в критическом ванте (кабеле). На втором и третьем шагах рассматриваются более сложные сценарии — обрыв двух и трёх вант соответственно. Для каждого из этих случаев исследовано перераспределение усилий в системе, что позволило установить закономерности изменения критического коэффициента увеличения напряжения при возрастании числа повреждённых элементов. Упрощенная модель процесса изображена на рисунке 6.

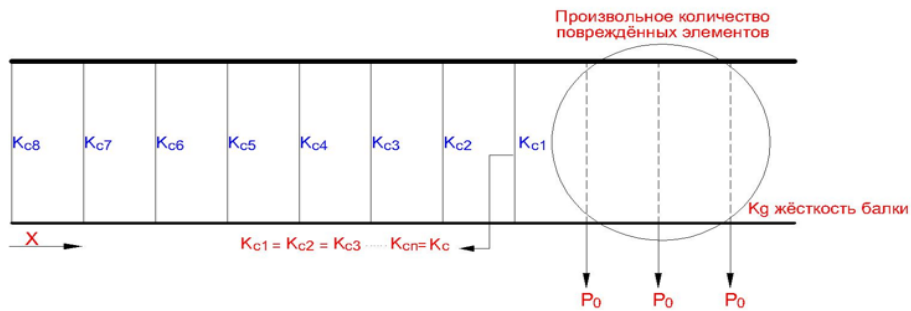


Рисунок 6 – Упрощенная модель повреждения нескольких кабелей

При одновременном или последовательном обрыве двух соседних кабелей (позиции $j = 0$ и $j = 1$) коэффициент увеличения нагрузки на критический кабель предлагается рассчитывать по формуле (для m оборванных кабелей)

$$\lambda_{c,m} = \frac{m}{2n - m} + \frac{0.105m^2 + 0.645m}{\left(1 + \frac{\beta}{a_{2m}}\right)^{0.35}} \quad (7)$$

Надежность системы при проектировании может быть рассчитана с учетом возможного обрыва соседних элементов по полученной формуле:

$$P_{c,design} = P_c^{(0)} \times \left[1 + 2 \times \frac{0.105m^2 + 0.645m}{\left(1 + \frac{\beta}{\gamma_{s1}}\right)^{0.35}} \right] \quad (8)$$

Обоснованность полученных формул подтверждается результатами численного моделирования и сравнения трёх подходов к определению параметра P_1 : аналитического решения, аппроксимирующей зависимости и результатов конечного-элементного моделирования (SAP) (рисунок 7). Сравнение выполнено для четырёх конфигураций вантовой системы, различающихся числом вант $2n$ и параметром β . Результаты подтверждают согласованность аналитической модели с численным моделированием (расхождение $< 1.3\%$).

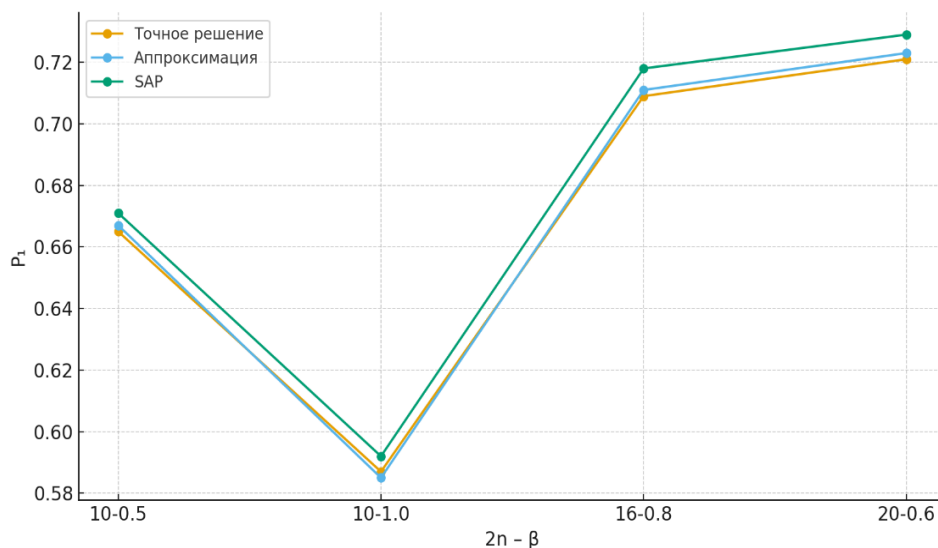


Рисунок 7 – Сравнение результатов аналитики, аппроксимации и (SAP) по параметру P_1

Для ситуации последовательного отказа двух соседних вант получена модифицированная формула расчета коэффициента увеличения напряжения:

$$P_1^{(2-failure)} = P_1^{(1-failure)} \cdot \left[1 + \frac{1}{2n-2} \cdot \frac{\beta}{1+\beta} \right]. \quad (9)$$

Для оценки динамического отклика вантовой системы на обрыв вант получена формула расчета коэффициента DAF:

$$DAF = 1 + \exp\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right). \quad (10)$$

где ζ – коэффициент демпфирования (для вантовых мостов $\zeta = 0.02-0.04$).

При $\zeta = 0.03$: $DAF = 1.91 \approx 2.0$

Таблица 1 отражает ключевые параметры динамического отклика вантовых систем при внезапном отказе одного ванта. С увеличением числа вант эквивалентная жёсткость K_{eq} возрастает, а эквивалентная масса m_{eq} и период первой формы колебаний T_1 последовательно уменьшаются. Это указывает на повышение общей динамической устойчивости конструкции.

Таблица 1 – Параметры динамического отклика вантовой системы при внезапном отказе элемента

Система	K_{eq} , кН/м	m_{eq} , кг	T_1 , с	D_{amp}	$F_1^{dynamic}$
$2n = 6$	12400	8500	0.52	1.42	0.954
$2n = 8$	18200	7200	0.44	1.38	0.963
$2n = 10$	23800	6300	0.36	1.35	0.793
$2n = 12$	29100	5600	0.31	1.33	0.959
$2n = 16$	38900	4500	0.24	1.30	0.975
$2n = 20$	48200	3800	0.20	1.28	0.960

Во **второй** главе разработаны Методика обоснования технических решений конструктивных элементов вантовой системы мостов, включающая самостоятельные методы, а также имитационная модель работы конструктивных элементов. Предложен способ оценки индекса надежности для вантовых мостов. Установлено, что безотказность каждого отдельного элемента не гарантирует безотказность всей конструкции. Для определения индекса надежности структурной системы и связанных с ним эксплуатационных свойств предложено несколько подходов. Надежность определяется как нечувствительность к локальным отказам, причем "нечувствительность" и "локальный отказ" оцениваются в соответствии с целями безопасной эксплуатации и снижения рисков обрушения, включенными в критерии проектирования.

Для расчета индекса надежности предложена следующая формула:

$$RI_r = 1 - \max_{i,m} \left\{ \frac{P_i^{(0)} + \Delta P_{i,m}}{P_{i,ultimate}} \right\}. \quad (11)$$

где P_i - начальная нагрузка элемента i , Н; $\Delta P_{i, m}$ - нагрузка, поглощенная элементом i в результате отказа элемента j , Н; $P_{i, ult}$ - максимальная нагрузка элемента i , Н. RI_r - показатель (индекс) надежности. Для учета коэффициента жесткости и усилий индекс надежности рассчитывается по полученной формуле

$$RI_r = 1 - \frac{P_c^{initial} + \sum_{i=1}^m P_0^{(i)} \times P_1(\beta) \times DAF}{\frac{\sigma_{ult}}{\gamma_s} \times A_c} \quad (12)$$

Положительные значения RI_r указывают на наличие запаса прочности, отрицательные — на разрушение системы.

Уравнение 12 представляет собой формулу расчета индекса надежности для параллельно соединенных элементов конструкции. Предлагаемый показатель надежности учитывает число неисправных кабелей, как один из ее факторов. Таким образом, имитируя различные сценарии потери кабеля и первоначальный уровень повреждения, можно оценить устойчивость конструкции.

В этой главе рассмотрен способ повышения надежности с использованием стопоров-молний. На рисунке 8 изображена упрощенная модель вантового моста, разделенная на сегменты с помощью молний. Осевая жесткость стопора-молнии считается равной $K_{c1} = \gamma_s K_c$, где K_c представляет собой осевую жесткость других кабелей, а γ_s — коэффициент запаса прочности.

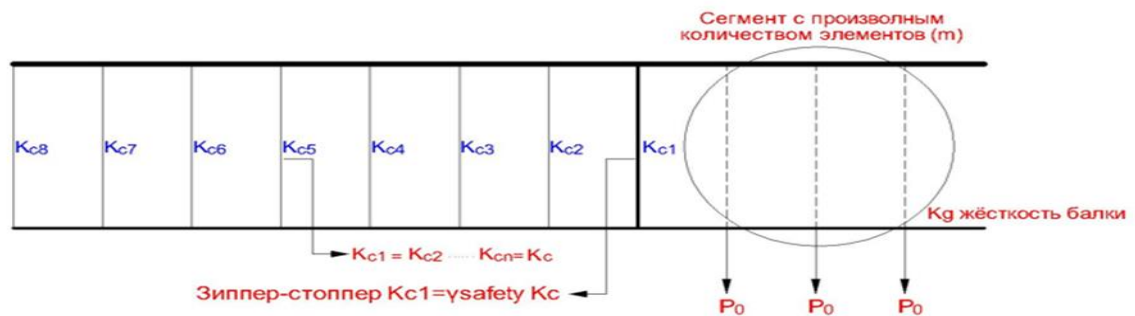


Рисунок 8 – Параллельная несущая система, сегментированная стопорами-молниями

Разработана универсальная система уравнений для системы из $2n$ кабелей (рассматриваем n кабелей на половине симметричной конструкции). Общая система линейных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i = \frac{P_0}{2} \\ 6(1 + \beta)P_n + 6(1 + 2\beta)P_{n-1} + 12\beta P_{n-2} + \dots = 0 \\ \vdots \\ [9(n-1) + 7]\beta P_n + [9(n-1) - 7]\beta P_{n-1} + \dots - 3P_1 + \frac{6P_2}{\gamma_s} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Коэффициенты в системе уравнений подчиняются рекуррентным соотношениям:

- при большом количестве кабелей ($n \rightarrow \infty$) коэффициент концентрации

напряжений стремится к предельному значению:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha(\beta) = \frac{1 + 2\beta}{8 + 16\beta}. \quad (14)$$

Форма аппроксимирующей функции и форма уравнений коэффициента усиления потенциала остаются идентичными.

- для 7-кабельной системы

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{84 + 3240\beta + 1620\beta^2}{648 + \beta(9720 + \frac{4860}{\gamma_{s1}}) + \beta^2(2592 + \frac{5184}{\gamma_{s1}})}. \quad (15)$$

- для больших систем с m обрывами вант ($n \gg m$):

$$\lambda_{c,m} \approx \frac{m}{2n} + \frac{0.105m^2 + 0.645m}{\left(1 + \frac{\beta}{\gamma_{s1}}\right)^{0.35}}. \quad (16)$$

Получена аппроксимирующая функция усилий для больших систем ($2n=100$ вант) с параметрами $a_2 = 0.985$ и $a_3 = 0.46$:

$$P_1(\beta) = \frac{1}{2n} + \frac{0.75}{1 + \left(\frac{\beta}{a_2}\right)^{a_3}}. \quad (17)$$

Приведённые выражения описывают зависимость усилия в критическом ванте P_1 от параметра жёсткости β , а также учитывают влияние коэффициента усиления γ_s , который определяет осевую жёсткость сегментного ограничителя-«молнии», что позволяет учитывать сегментацию конструкции и влияние усиленных элементов на перераспределение нагрузок.

Анализ показывает, что увеличение γ_s приводит к росту коэффициента натяжения застёжки-молнии. Это полностью согласуется с физическим смыслом параметра: чем выше γ_s , тем больше осевая жёсткость ограничителя, и тем выше его способность воспринимать перераспределяемую нагрузку после локального отказа. Усиление ограничителей непосредственно способствует повышению общей устойчивости конструкции и снижает вероятность прогрессирующего разрушения. Обоснован критерий предотвращения прогрессирующего обрушения:

$$P_{c,design} < \frac{P_{c,ultimate}}{\gamma_s}. \quad (18)$$

где γ_s — коэффициент запаса прочности (обычно $\gamma_{safety} = 2.5 - 3.0$ для кабелей).

В таблице 2 показаны результаты расчетов рекомендуемых коэффициентов запаса для обеспечения надежности вантовых систем с учётом возможного отказа одного ванта.

Таблица 2 – Рекомендуемые коэффициенты безопасности для вантовых систем с учётом отказа элемента

Конфигурация	β	P_1 при отказе	Коэф. запаса	Резерв, %
$2n = 5$	0.5	0.615	2.20	55
$2n = 7$	0.5	0.672	2.00	48
$2n = 9$	0.8	0.698	1.95	46
$2n = 11$	0.8	0.587	1.85	43
$2n \geq 12$	0.5–1.0	0.72–0.75	1.80	40

При разработке имитационной модели принято, что каждый кабель в мосту на вантовой опоре имеет осевую жесткость в зависимости от его длины. Поэтому при имитации предполагалось, что осевая жесткость каждого кабеля различна, чтобы модель была адекватной. Схематическое изображение рассматриваемой модели представлено на рисунке 9. В имитационной модели осевая жесткость i -го кабеля определяется как: $K_{ci} = \gamma_{si} K_c$, где K_c — эталонная жесткость, а γ_{si} — коэффициент, характеризующий относительную жесткость конкретного ванта.

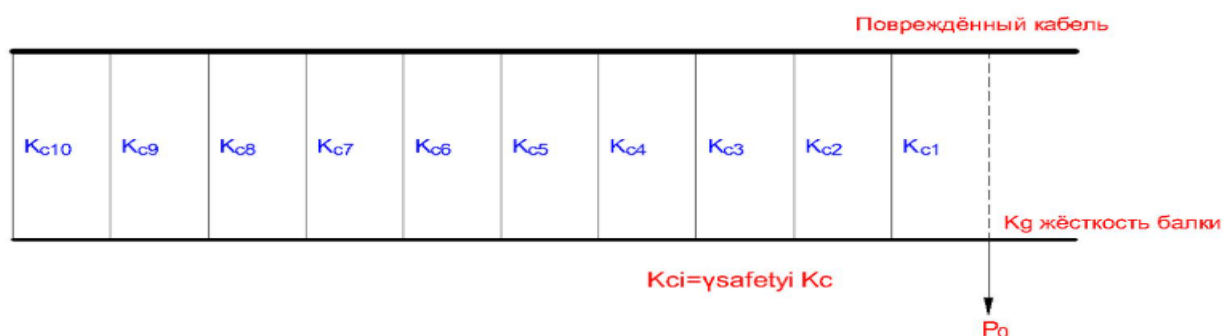


Рисунок 9 – Схема имитационной модели вантовой системы с вариативной осевой жёсткостью

Для решения задачи обеспечения надежности по модели, в которой жесткость кабелей неодинакова, получено уравнение (19).

$$P_1 + P_1 + \frac{P + P_0}{2}$$

$$P_1(6 + \gamma_s \beta - 12\beta) = \frac{P_0}{4} \quad (19)$$

$$P_1(7 + 5\gamma_s \beta - 12\beta) = \frac{P_0}{\gamma_s}$$

$$P_1(8 + 4\gamma_s \beta - 12\beta) = \frac{P_0}{\gamma_s}$$

Процесс расчёта по модели включает три последовательных этапа:

1. Этап унифицированной жёсткости. Предполагается, что все тросы имеют одинаковую жёсткость: $\gamma_{s1} = \gamma_{s2} = \dots = \gamma_{sn} = 1$. На этом этапе определяются базовые коэффициенты аппроксимирующей функции для различных конфигураций системы.

2. Этап локального изменения жёсткости. Осевая жёсткость критического кабеля задаётся отличной от остальных: $\gamma_{s2} = \gamma_{s3} = \dots = \gamma_{sn} = 1$, $\gamma_{s1} \neq 1$. Этот этап

позволяет установить влияние критической жёсткости на форму аппроксимирующей функции.

3. Этап вариативной жёсткости. Жёсткость каждого кабеля изменяется индивидуально: $\gamma_{si} \neq i$, $\gamma_{sj} \neq j$. Это создаёт наиболее реалистичную модель, отражающую неоднородность тросовой системы.

Из определений параметров аппроксимирующей функции и результатов предыдущих шагов можно сделать следующие выводы:

1. Параметр a_0 , характеризует минимальный коэффициент увеличения напряжения при: $\beta \rightarrow \infty$, когда балка становится абсолютно жёсткой, а перемещения всех тросов равны. Параметр a_0 выражается аналитически:

$$a_0 = \gamma_{s1} \frac{K_{c1}}{2 \sum_{i=1}^n K_{ci}}. \quad (20)$$

2. Параметр a_1 , определяет максимальный коэффициент увеличения напряжения, возникающий при: $\beta=0$. Это состояние отражает полную гибкость балки, и величина a_1 зависит только от количества вышедших из строя кабелей. Для случая отказа одной ванты установлено: $a_1=0.75$. Данный параметр не зависит от жёсткости ограничителей, то есть γ_{s1} не влияет на его значение.

3. Параметр a_2 , показывает влияние критической осевой жёсткости кабеля и растёт пропорционально величине γ_{s1} : $a_2 = p(\gamma_{s1})$, $a_2 \sim \gamma_{s1}$.

4. Параметр a_3 , Этот коэффициент определяется преимущественно: числом тросов в системе, характером их взаимодействия. Хотя жёсткость кабелей также влияет на значение a_3 , её вклад оказывается незначительным.

При разработке имитационной модели учтены три системы вантовых мостов с различной длиной вант:

Система А: $L_c = 30$ м, $L_{span} = 750$ м, $n = 50$, $L_t = 15$ м (короткие ванты)

Система В: $L_c = 60$ м, $L_{span} = 750$ м, $n = 50$, $L_t = 15$ м (средние ванты)

Система С: $L_c = 90$ м, $L_{span} = 750$ м, $n = 50$, $L_t = 15$ м (длинные ванты)

Результаты оптимизации для исследуемых систем по модели показаны в Таблице 3. Следующие уравнения иллюстрируют стоимость изготовления балки и вантовой системы:

$$C_{балки} = W_{балки} \cdot c_{изготовление} = \rho_{steel} \cdot A_{deck} \cdot L_{span} \cdot k_{stiffening} \cdot 4500 \text{ \$/тонна}. \quad (21)$$

$$C_{каб} = \left(\frac{L_{span}}{L_t} \times 2 \right) \times [C_0(L_c) + k(L_c) \times A_c \times 1.04]. \quad (22)$$

$$A_c = \frac{S \times \gamma_s}{\sigma_{ult}} = \frac{[P_c^{initial} + m \times P_0 \times F_1(\beta) \times DAF] \times \gamma_s}{\sigma_{ult}}. \quad (23)$$

где $\rho_{steel} = 7850$ кг/м³ – плотность стали; A_{deck} – площадь поперечного сечения балки (м²); $k_{stiffening} = 1.8$ – коэффициент, учитывающий дополнительные элементы.

Таблица 3 – Результаты расчета для системы А ($L_c = 30$ м, $n = 50$)

L_t , м	Нкаб	m	β	P_1	A_c , мм ²	Скаб, \$/м	Сбалки, \$/м	Собщ, \$/м	RI
30	50	1	70.0	0.106	8,420	185	425	610	0.08
20	75	1	46.7	0.118	8,850	195	398	593	0.06
15	100	1	35.0	0.128	9,180	203	378	581	0.04
10	150	1	23.3	0.145	9,720	218	351	569	0.03
7.5	200	2	17.5	0.156	13,450	387	468	855	0.02
5.0	300	2	11.7	0.172	14,280	411	445	856	0.01
4.0	375	3	9.3	0.184	18,920	676	587	1,263	0.005
3.0	500	4	7.0	0.198	24,350	1,089	742	1,831	0.002
2.5	600	4	5.8	0.208	25,680	1,198	798	1,996	0.001

Анализ результатов данных таблицы 3, полученных в ходе имитационного моделирования, позволил установить:

1. Оптимальное расстояние: $L_t^{opt} = 10$ м при минимальной общей стоимости 569 \$/м.

2. Критическая граница: При $L_t < 10$ м необходимо учитывать отказ двух вантов, что приводит к резкому увеличению стоимости на 50%.

3. Соотношение стоимостей: При оптимальном расстоянии доля стоимости вантов составляет 38%, балки – 62%.

4. Индекс надежности: Все рассмотренные варианты обеспечивают $RI > 0$, что гарантирует отсутствие прогрессирующего обрушения.

Общая стоимость строительства может быть представлена в виде суммы двух компонент, зависящих от β :

$$C_{total}(\beta) = C_{deck}(\beta) + C_{cables}(\beta). \quad (24)$$

Оптимальное значение β определяется из условия:

$$\frac{dC_{total}}{d\beta} = 0 \Rightarrow \beta_{opt} = \left(\frac{0.4c_1}{0.3c_3} \right)^{1/0.7}. \quad (25)$$

Для системы В ($L_c = 60$ м): $\beta_{opt} \approx 90-110$, что соответствует $L_t \approx 10-15$ м.

Влияние длины ванта на экономичность системы показано в Таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение оптимальных решений для систем различной длины вант

Параметр	Система А (30м)	Система В (60м)	Система С (90м)	Отношение С/А
L_t^{opt} , м	10	10	20	2.0
β_{opt}	23.3	46.7	139.8	6.0
P_{1opt}	0.145	0.118	0.084	0.58
$A_{c\ opt}$, мм ²	9,720	9,280	7,980	0.82
Скаб, \$/м	218	318	364	1.67

Параметр	Система А (30м)	Система В (60м)	Система С (90м)	Отношение С/А
Сбалки, \$/м	351	332	358	1.02
Собщ, \$/м	569	650	722	1.27
Скаб/Собщ, %	38	49	50	—

Анализ результатов данных таблицы 4, полученных в ходе имитационного моделирования, показал:

1. Нелинейная зависимость стоимости от длины: При трехкратном увеличении длины вантов общая стоимость возросла лишь на 27%

2. Эффект жесткости: Более длинные ванты (большой β) обеспечивают меньшее перераспределение нагрузки (меньший P_1), что частично компенсирует увеличение их длины

3. Оптимальное расстояние: Удваивается при переходе от системы В к системе С, что связано с изменением характера перераспределения нагрузки

4. Доля стоимости вант: Возрастает с 38% до 50% при увеличении длины, что указывает на рост значимости вантовой системы в общей структуре затрат.

В **третьей главе** обоснованы практические рекомендации по повышению надежности работы вантовых мостов. Выполнена экспериментальная проверка результатов теоретических исследований, которая позволяет рекомендовать их к применению для оценки работоспособности и безопасности вантовых систем, особенно в сейсмоопасных зонах. Валидация имитационной модели выполнена при условии использования комбинации пассивных и полуактивных систем контроля для повышения сейсмической устойчивости. Для ее обеспечения принимается неразрезная конструкция моста с тремя пролетами, включающая предложенные в диссертации демпфирующие устройства с высокой степенью демпфирования (HDRB) и магнитореологические демпферы (MR-демпферы). В MR-демпферах реализованы алгоритмы управления, такие как циклический контроль энергии (СЕС) и управляемое вязкостное демпфирование (СVD). Резиновая опорная часть с высоким демпфированием сам выполняет функцию изоляции и не требует настройки других устройств, поэтому затраты на обслуживание и управление невелики (рисунок 10).

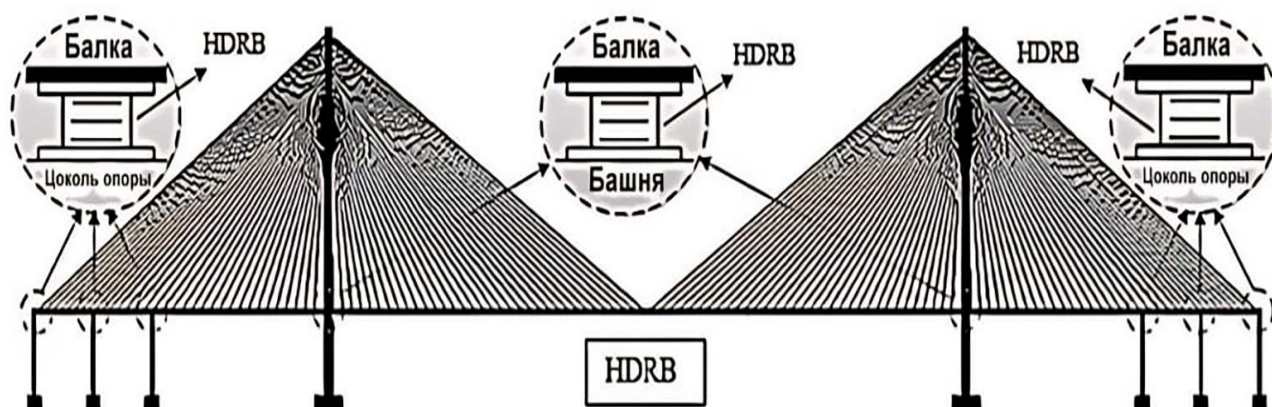


Рисунок 10 – Конфигурации различных мостовых систем HDRB

Для проведения испытаний были разработаны принципиальная схема и физическая модель образца (рисунок 11). Целью испытаний являлось изучение эффективности резиновых опорных частей с высоким демпфированием (HDRB) для снижения усилий в вантовой системе моста.

Испытания на сжатие и горизонтальный сдвиг (сдвиговый модуль и сдвиговую связь) выполнены для резиновых опорных частей HDRB с высоким демпфированием размером (350 x 450 x 105 мм). В таблице 5 и на рисунке (11) показана конфигурация HDRB, которая была разработана для экспериментальной проверки.

Таблица 5 – Нумерация опорных частей, размеры, количество и толщина слоев

Размер опорной части	a	b	H	n_r	t_i	n_s	t_s
350 × 450 × 105	350	450	105	6	12	7	4

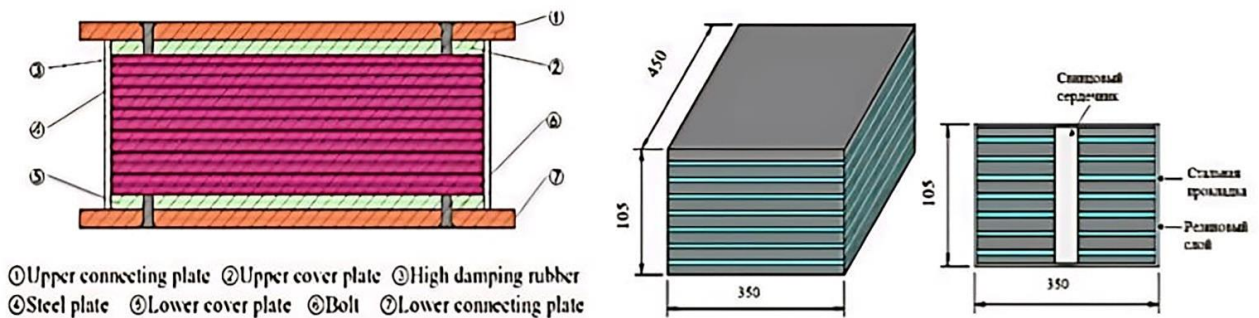


Рисунок 11 – Схематический вид HDRB (размеры указаны в миллиметрах)

Как вертикальное укорочение, так и горизонтальное смещение определяли с помощью LVDT с точностью 1/100 мм и диапазоном 150 мм. LVDTs были зафиксированы горизонтально и вертикально, как показано на рисунке 12, чтобы определить их соответствующие смещения.

Вертикальные смещения измерялись с помощью 4 LVDTs по углам нагрузочных пластин, а горизонтальные смещения измерялись с помощью 2 LVDTs, как показано на рисунке 12.



Рисунок 12 – Приборы для измерения вертикального и горизонтального смещения

Первоначально выполнялось испытание на сжатие (В3). В этом эксперименте применен метод определения модуля сжатия цельных эластомерных опорных частей и производственные испытания характеристик сжатия. Испытание заключалось в измерении сжатия эластомерной опорной части при воздействии возрастающих сжимающих нагрузок. На основании этих измерений рассчитан модуль поперечного сжатия E и проверена поверхность опорной части при полной нагрузке на наличие дефектов (рисунок 13). Образец для испытаний располагался в центре испытательной пластины с точностью не менее 1/50 наименьшего размера образца в плане.

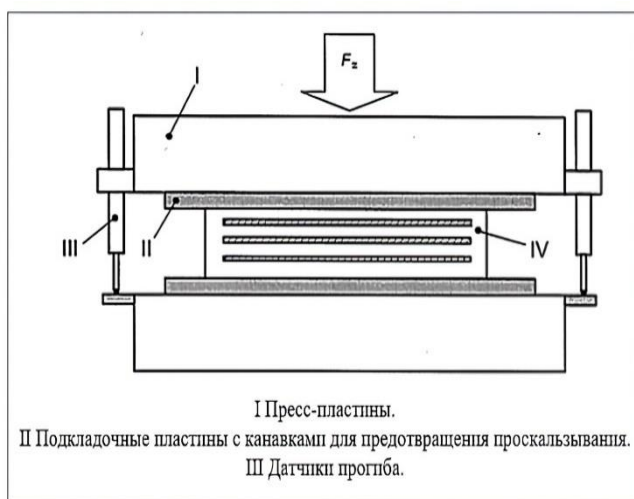


Рисунок 13 – Установка испытания на сжатие. Образец во время испытаний

На рисунке 14 показана зависимость между нагрузкой и вертикальной деформацией, а также между нагрузкой и средней вертикальной деформацией для образца В3 во время третьего цикла нагружения. Деформация представлена как прямыми значениями, полученными с использованием 4 LVDT, так и средним значением, рассчитанным путем усреднения этих показаний.

По результатам визуального осмотра не были зарегистрированы поверхностные дефекты или неровные гофры поверхности, которые свидетельствуют о неправильном расположении пластин, или неправильные выпуклости, которые указывают на нарушение сцепления на поверхности.

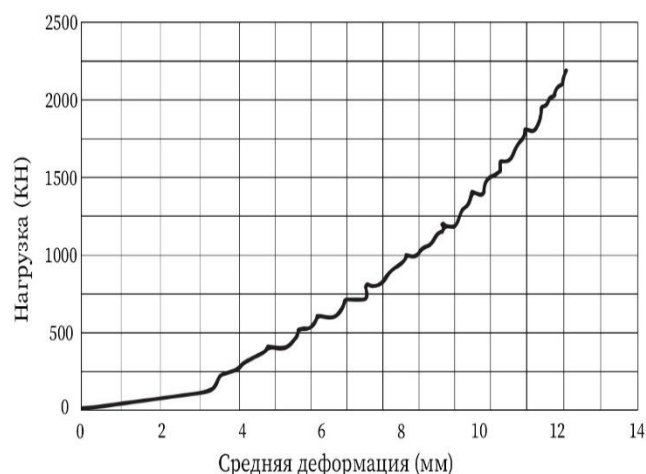
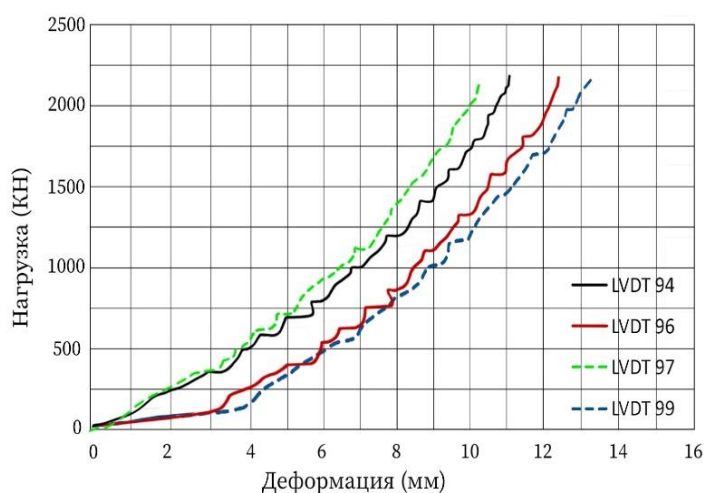


Рисунок 14 – Результаты испытаний на сжатие

В этой же главе дается описание испытаний предложенного технического решения на сдвиговый модуль. Испытание заключалось в измерении деформации сдвига пары идентичных эластомерных опорных частей при возрастающих сдвиговых нагрузках. Испытания выполнены для образцов (B1 и B2), как показано на рисунке 15.



Рисунок 15 – Установка для определения модуля сдвига

Результаты испытаний проиллюстрированы на рисунке 16. Установлена взаимосвязь между нагрузкой и горизонтальной деформацией во время второго цикла нагружения с учетом нагрузок, соответствующих значениям деформации ($0,27tq$ и $0,58tq$), которые используются для определения Модуля сдвига (G).

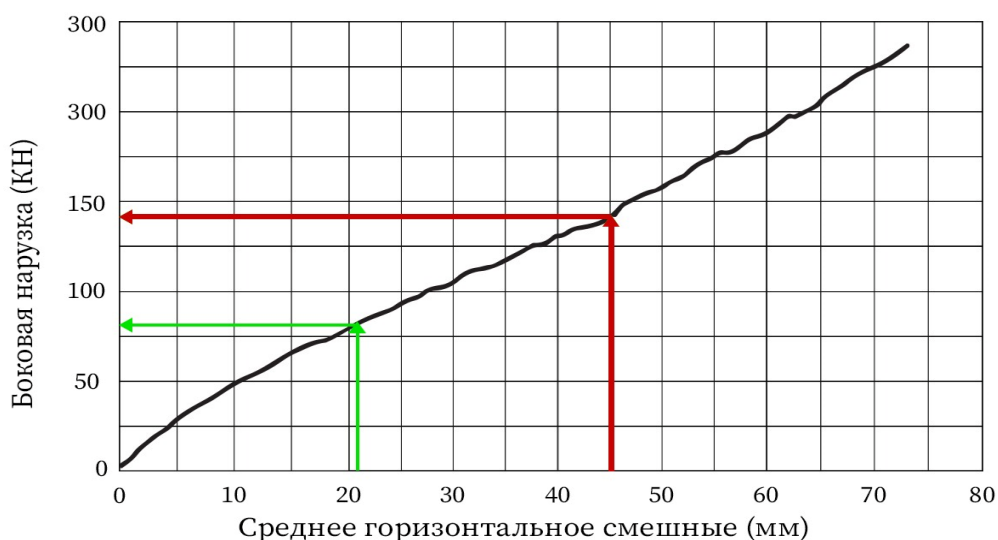


Рисунок 16 – График нагрузки и горизонтальной деформации для определения модуля сдвига (G) (средний модуль сдвига G)

При испытаниях на сдвиговую связь применялся метод проверки прочности связи на сдвиг между резиновыми и стальными пластинами в цельных эластомерных опорных частях. Испытание проводили для образцов (B1 и B2), как показано на рисунке 17, аналогично, как и для модуля сдвига, за исключением того, что сжимающее напряжение было больше.



Рисунок 17 – Испытание образца на сдвиг и деформированная форма

Результаты испытаний (рисунок 18) показали взаимосвязь между боковой нагрузкой и средним горизонтальным смещением (учитывается среднее значение 2-х показаний LVDT)

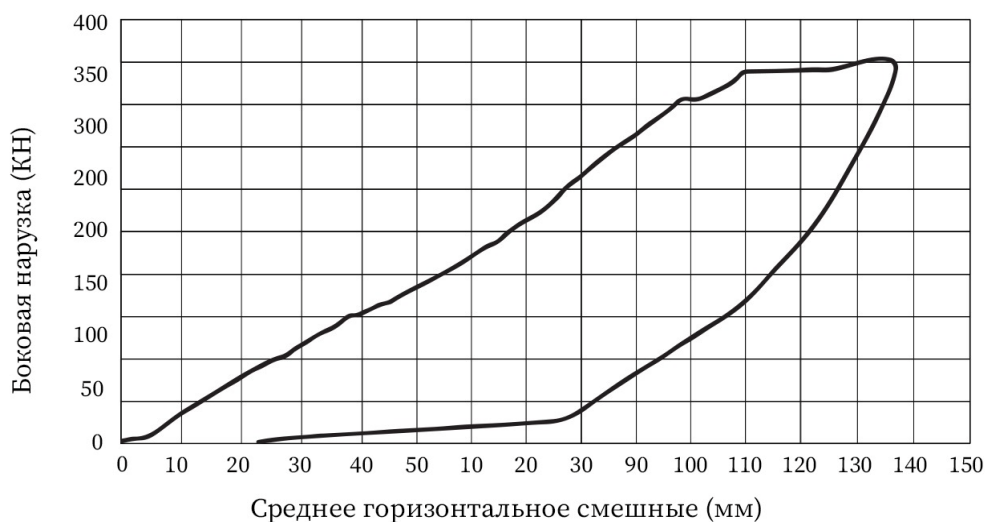


Рисунок 18 – График динамики нагрузки и горизонтальной деформации для определения среднего значения сдвиговой связи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертации решена научная задача, имеющая значение для соответствующей отрасли знаний и заключающаяся в разработке методов научного обоснования технических решений повышения эксплуатационных свойств несущих конструктивных элементов вантовых автодорожных мостов и оценки критических нагрузок вантовой системы.

2. Разработана имитационная модель работы конструктивных элементов вантовой системы с применением методов имитации и аналитического подхода. Упрощенная модель, используемая при имитации, состоит из балки, поддерживаемой натяжными элементами. Для определения коэффициента

увеличения напряжения в критическом кабеле из-за отказа смежного кабеля был использован аналитический подход с использованием граничных условий и принципа суперпозиции. Учен отказ нескольких кабелей. Научная новизна модели заключается в том, что разработан аналитический подход, основанный на решении системы дифференциальных уравнений, а также обоснована аппроксимирующая функция для вычисления коэффициента увеличения напряжения на критический кабель на основе имитации процессно-событийных процедур обрыва вант.

3. Разработана методика обоснования технических решений конструктивных элементов вантовой системы автодорожных мостов. Научная новизна методики определяется тем, что в ней, по сравнению с имеющимися, предложен способ оценки индекса многопараметрической надежности конструктивных элементов вантовой системы, установлена аппроксимирующая функция для вычисления коэффициента увеличения нагрузки на критический кабель в случае обрыва смежного кабеля, выявлено, что увеличение значения осевой жесткости кабеля уменьшает коэффициент увеличения напряжения в нем. Исходя из этого обосновано, что длиннопролетные мосты на вантовых опорах необходимо разделять на зоны, соответствующие различным значениям жесткости. В результате применения предложенного способа может быть снижена стоимость возведения вантовой системы моста и риск ее разрушения.

4. Разработан способ повышения надежности мостов вантовой системы при их эксплуатации в сейсмоопасных районах. С использованием полученной аппроксимирующей функции надежности рассчитана нагрузка, поглощаемая критическим кабелем вследствие повреждения смежного кабеля. Обоснован алгоритм оценки индекса надежности вантовых мостов. Следует отметить, что в предлагаемый индекс надежности включено значение DAF, равное 2, для учета динамического характера повреждения кабеля. Предлагаемый показатель надежности включает в себя число неисправных кабелей как один из ее факторов. Это позволяет, используя различные сценарии потери кабеля и первоначальный уровень повреждения, оценить устойчивость всей конструкции вантового моста.

5. Выполнена экспериментальная проверка результатов исследования. Установлено, что надежность вантовой системы и безопасность эксплуатации вантовых мостов могут быть обеспечены не только увеличением жесткости и количества кабелей. Значительно влияет на предотвращение обрыва кабелей устройство демпфирующих элементов. Продолжены технические решения по устройству демпфирующих элементов вантовых мостов и выполнены их натурные испытания на сжатие, сдвиговую устойчивость и сдвиговые связи. Испытания показали надежность предлагаемых технических решений, что подтверждается их внедрением в производственную деятельность завода RIVER по производству мостовых опор.

6. Цель диссертации, состоящая в разработке методов научного обоснования технических решений повышения эксплуатационных свойств несущих конструктивных элементов вантовых автодорожных мостов и оптимизации издержек на выполнение работ по их строительству и обеспечению безопасной эксплуатации, достигнута.

СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ahmed, Ahmed Ramadan, and Nikolay Ermoshin. "Method for investigating the reliability of structural elements of cable-stayed supports' anchorage: a case study of the Russky Bridge." *Transportation Research Procedia* 63 (2022): 2887-2897. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.336>.

2. Ahmed, Ahmed Ramadan, and N. A. Yermoshin. "Optimum design of cable-stayed bridges considering cable loss scenarios." *Asian Journal of Civil Engineering* 25.3 (2024): 2801-2809. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00946-1>.

3. Ahmed, Ahmed Ramadan, N. A. Yermoshin, and Feras AR Temimi. "An Experimental Study of High-Damping Rubber Bearings (HIDRB) and Their Implications for the Seismic Performance of Cable-Stayed Bridges." *Power System Technology* 48.1 (2024): 1609-1624. DOI: <https://doi.org/10.52783/pst.431>

4. Ahmed, Ahmed Ramadan, Feras AR Temimi, and N. A. Yermoshin. "Experimental verification of the compressive stiffness of high-damping rubber bearings (HDRB) according to STN EN 1337-3 and their effectiveness in seismic isolation for cable-stayed bridges." *Asian Journal of Civil Engineering* (2024): 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01216-4>

5. Ahmed Ramadan Ahmed Ahmed, Ermoshin N. A. Static analysis of stay cables under the varying chord strength of the cable failure inspection in cable-stayed bridges. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(3): 100-118. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-3-100-118>.

6. Ahmed R. Ahmed, Q.A.A. Qais, Nikolay A. Yermoshin. "Development of Analytical Method for Cable-stayed Bridges Considering Local Damages Caused by Failure of Supporting Cables." *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings* 2024. 20(5). 419–433. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-5-418-432

7. Ahmed, A.R.; Temimi, F.A.A.; Obaidi, A.H.F.; Yermoshin, N.A. Vibration Characteristics of 3D Curved Cellular Bridges via Panel Element Method 2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 116 Article No 11601. Doi: 10.4123/CUBS.116.1.