

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ПОВЕДЕНИЕ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВАНТОВЫХ МОСТОВ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ОБРЫВЕ КАБЕЛЯ

АХМЕД Рамадан Ахмед

аспирант

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9411-656X>

ЕРМОШИН Николай Алексеевич

доктор военных наук, профессор

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0367-5375>

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
г. Санкт-Петербург, Россия

В вантовых мостах повреждение или выход из строя основных конструктивных элементов, таких как пилоны, опоры или ванты, вызванные экстремальными нагрузками, может привести к обрушению всего моста. Для этого типа моста одним из наиболее тревожных режимов отказа является горизонтальное прогрессивное обрушение, известное как «застежка-молния», которое может быть вызвано внезапной потерей вантов.

Ключевые слова: вантовые мосты, разрушение, ванты, обрушение, обрушение типа застежка-молния, прогрессирующее обрушение, внезапная потеря.

Введение. Опоры вантовых мостов являются критическими структурными элементами, подверженными коррозии, абразии, воздействию ветра, столкновениям с транспортными средствами и злонамеренным действиям. Эти экстремальные нагрузочные сценарии могут привести к серьезным повреждениям и потере кабелей. Такие сценарии потери кабелей могут вызвать значительные импульсные динамические нагрузки на конструкцию, которые могут потенциально вызвать «застежку-молнию» прогрессивного обрушения всего моста, подобно мосту Такома-Нарроуз, хотя он был висячим мостом.

Следовательно, вантовые мосты должны быть спроектированы с учетом возможных сценариев потери кабелей, и вантовые мосты должны быть способны выдержать потерю любого кабеля без возникновения структурной нестабильности или прогрессивного обрушения.

Материалы и методы.

1. Прогрессивное обрушение в вантовых мостах из-за внезапной потери вантов.

Прогрессивное обрушение в основном изучается в зданиях. Существует немного стандартов, которые регламентируют прогрессивное обрушение и сценарии потери кабелей в мостах. Однако мосты более уязвимы для прогрессивного обрушения из-за своего необычного использования, низкой избыточности элементов и условий эксплуатации в сложных условиях. Например, коэффициент безопасности подвески составляет 3,0 во время эксплуатации и 1,8 во время замены подвесок. Не предусмотрены спецификации для внезапной потери подвесок [1].

В современных мостах расстояние между двумя смежными кабелями гораздо меньше, чем в старых мостах.

Эти исследования показывают, что DAF, равный двум, не является безопасным во всех случаях. В то время как недавние исследования доказывают, что предлагаемый DAF безопасен для проектирования кабелей, он не безопасен для проектирования пилонов, а также для балок с отрицательными моментами. DAF из-за отказа кабеля будет объяснен в следующем разделе.

Исследование разрыва ванта в вантовых мостах DAF зависит от нескольких факторов, таких как местоположение разрыва каната, структурное затухание и жесткость структурных элементов. Кроме того, DAF может превышать значение двух, особенно в элементах пилонов [2].

2. Динамический коэффициент усиления (DAF) из-за внезапной потери кабелей.

Выход из строя кабеля происходит за очень короткий промежуток времени и носит динамический характер. Использование нелинейного динамического анализа является наиболее точным методом исследования поведения конструкции в таких случаях. Однако это требует гораздо больше времени и усилий, чем статический анализ, что делает этот метод более дорогостоящим. Очевидно, что точная оценка DAF в случае использования линейного статического анализа очень важна.

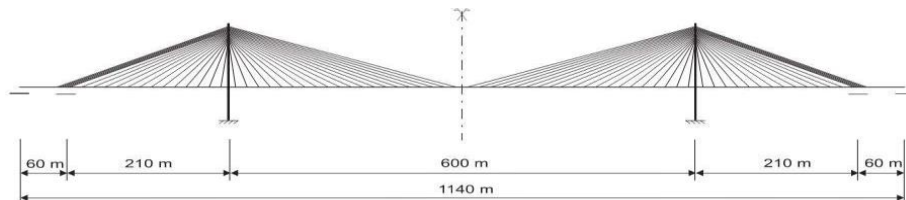
Помимо величины DAF, определение DAF в контексте кабельных конструкций несколько отличается от DAF, указанного в строительных нормах. DAF для вантового моста с потерей кабеля обычно определяется следующим образом [3]:

$$DAF = \frac{S_{dyn} - S_0}{S_{stc} - S_0} \quad (1)$$

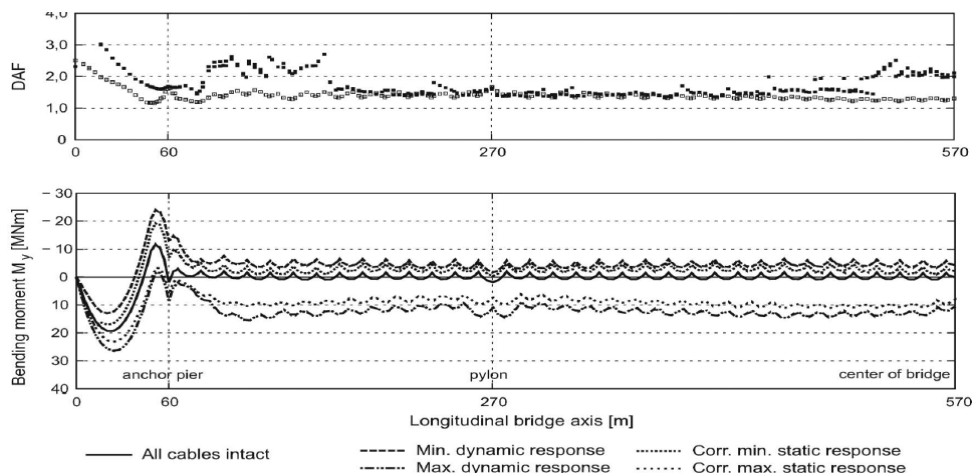
Где, S обозначает любую переменную состояния, S_{dyn} – динамический структурный отклик, S_{stc} – статический структурный отклик, а S_0 – структурный отклик в начальном состоянии до возникновения разрыва кабеля.

DAF – это безразмерный коэффициент, определенный в уравнении 1, на который следует умножить отклик конструкции, полученный в результате линейного статического анализа, чтобы получить фактический отклик конструкции при динамической нагрузке [4].

Изучение динамического поведения вантовых мостов и реалистичных значений DAF для различных элементов конструкции. Было показано, что DAF зависит от местоположения неисправного кабеля, а также от типа и местоположения соответствующей переменной состояния. Следовательно, уникальный DAF для всех элементов конструкции указать невозможно. Результаты показывают, что значение DAF для прогибов и изгибающих моментов балки жесткости варьируется в очень широком диапазоне. На рисунке 2 показан изгибающий момент на балке в различных сечениях и соответствующие значения DAF [5].



(a) Конфигурация моста



(b) DAF для определения изгибающего момента вдоль палубы

Рисунок 1. DAF для вантового моста при внезапной потере кабеля [5]

Оказывается, что для положительных изгибающих моментов балки DAF составляет от 1,3 до 1,6. Исследование отрицательных изгибающих моментов показало, что DAF варьируется от 1,4 до 2,7. Было обнаружено, что DAF изгибающих моментов на балке в местах, удаленных от вышедшего из строя кабеля, значительно превышает два. Однако, поскольку статические отклики в этих местах очень малы, большое значение DAF не имеет значения.

3. Структурная прочность длиннопролетных вантовых мостов, сегментированных застегками-молниями для предотвращения прогрессирующего обрушения.

Разрушение типа молнии происходит в конструктивных системах с параллельными несущими элементами и начинается с первоначального выхода из строя одного или нескольких несущих элементов. Нагрузка, которую несут эти элементы, должна быть перераспределена на соседние элементы, аналогичные по типу и функциям вышедшим из

строя элементам. Если эти элементы перегружены, они не выполняют свою функцию альтернативных путей загрузки, и отказ прогрессирует [6].

Повышение надежности структурной системы за счет сегментации является возможным подходом к предотвращению такого прогрессирующего разрушения. Во время сегментации структура делится на сегменты с использованием выделенных границ сегментов. Таким образом, сбой изолируется в пределах одного сегмента (или, в особых случаях, в пределах двух сегментов); таким образом, предотвращается непропорциональное распространение сбоя [7].

На рисунок 2 показан схематический вид упрощенной модели длиннопролетного моста на вантовой опоре, разделенного на сегменты застегками-молниями. Предполагается, что осевая жесткость застегки-молнии-стопора равна $K_1 = \delta_1 K$, где K – осевая жесткость других вантов, а δ_1 – выбранный коэффициент.

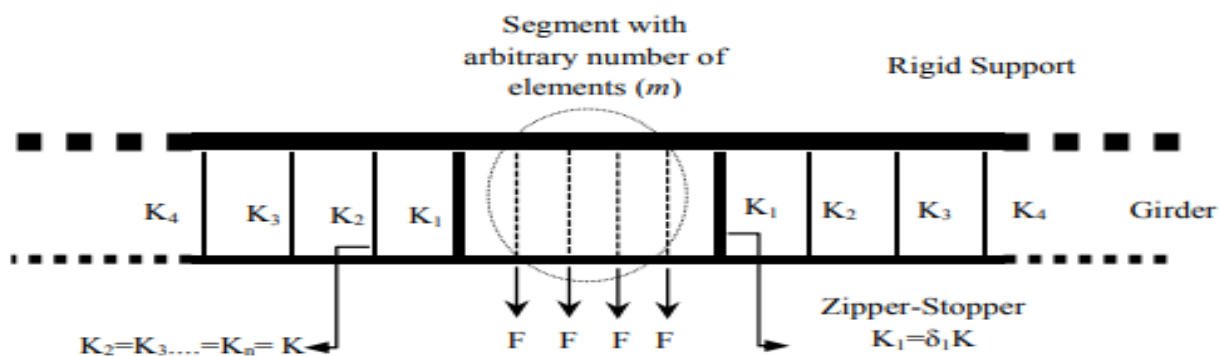


Рисунок 2. Параллельная несущая система, сегментированная застегками-молниями [8]

Выполнение аналитического решения приводит к следующей системе уравнений (уравнение 2). Эта система уравнений решается для различных значений δ_1 – (см. рисунок 3). Результаты показывают, что с увеличением значения δ_1 увеличивается коэффициент увеличения напряжения застегки-

молнии. Как уже упоминалось, δ_1 представляет собой осевую жесткость застегки-молнии. Отныне увеличение значения δ_1 приводит к увеличению осевой жесткости застегки-молнии; следовательно, застегка-молния поглощает большую долю перераспределяемой нагрузки [8].

$$\left\{ \begin{array}{l} F_n + F_{n-1} + F_{n-2} + \dots + F_1 = \frac{F}{2} \\ F_n(6 + 6\beta) + F_{n-1}(1 - 12\beta) + F_{n-2}(6\beta) = 0 \\ F_n(12) + F_{n-1}(6 + 6\beta) + F_{n-2}(1 - 12\beta) + F_{n-3}(6\beta) = 0 \\ F_n(18) + F_{n-1}(12) + F_{n-2}(6 + 6\beta) + F_{n-3}(1 - 12\beta) + F_{n-4}(6\beta) = 0 \\ F_n(24) + F_{n-1}(18) + F_{n-2}(12) + F_{n-3}(6 + 6\beta) + F_{n-4}(1 - 12\beta) + F_{n-5}(6\beta) = 0 \\ \vdots \\ F_n(6n - 12) + F_{n-1}(6(n - 1) - 12) + \dots + F_3(6 + 6\beta) + F_2(1 - 12\beta) + F_1\left(\frac{6\beta}{\delta_1}\right) = 0 \\ F_n(9n - 7) + F_{n-1}(9(n - 1) - 7) + \dots + F_2(11 + 6\beta) + F_1\left(3 - \frac{6\beta}{\delta_1}\right) = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

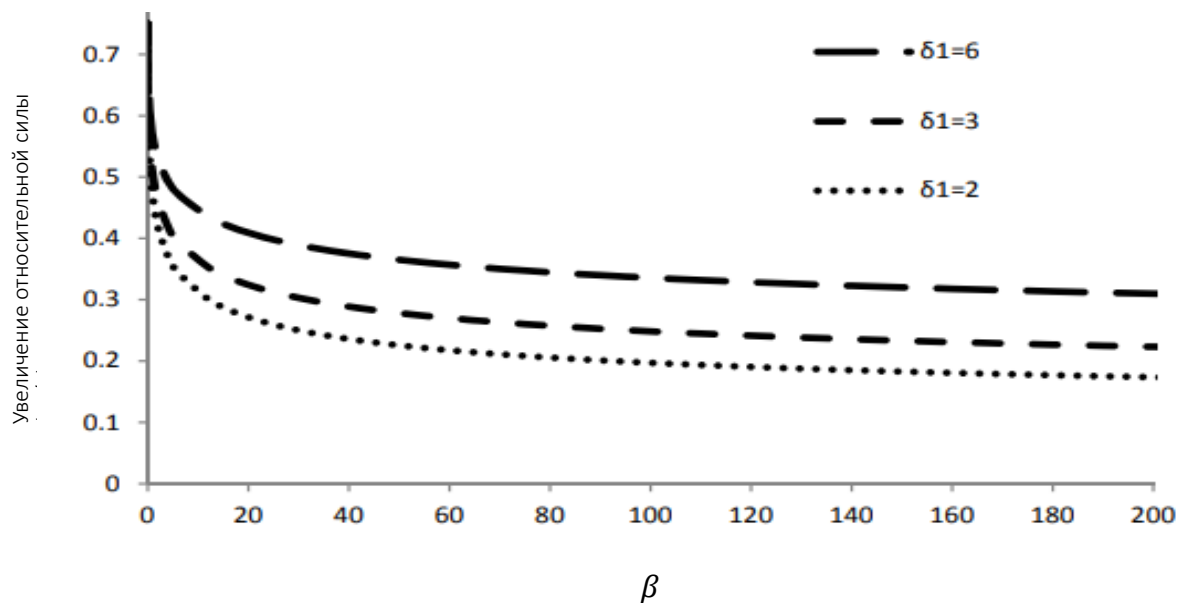


Рисунок 3. Коэффициент увеличения напряжения застёжки-молнии для различных значений δ_1

Ниже приведены результаты расчетов указанной системы уравнений для четырех- и шестикабельных систем.

Четырехкабельная система:

$$\frac{F_1}{F} = \frac{11 + 6\beta}{16 + 12\beta\left(1 + \frac{1}{\delta_1}\right)} \quad (3)$$

Шестикабельная система:

$$\frac{F_1}{F} = \frac{23 + 171\beta + 18\beta^2}{31 + \beta\left(288 + \frac{84}{\delta_1}\right) + \beta^2\left(36 + \frac{72}{\delta_1}\right)} \quad (4)$$

Параметр a обозначает минимальный коэффициент увеличения напряжения, который возникает, когда $\beta = \infty$, балка жесткая, и все тросы имеют одинаковые смещения.

Следовательно, параметр a можно было бы легко вычислить следующим образом[8]:

$$a = \frac{n\delta_n + (n-1)\delta_{n-1} + \dots + \delta_1}{2\sum_{i=1}^n \delta_i}, \quad i = 1 \text{ to } n \quad (5)$$

Результаты. Для оценки параметров s и d для текущей конфигурации исследуются различные системы с различными значениями δ_1 и вычисляются соответствующие аппроксимирующие функции. Результаты показывают, что параметр s имеет верхнее значение, равное δ_1 . Это означает, что жесткость других кабелей не влияет на параметр s . На рисунке 4 расчетные значения параметра s для двух систем со значениями δ_1 , равными единице и двум, представлены следующим образом.

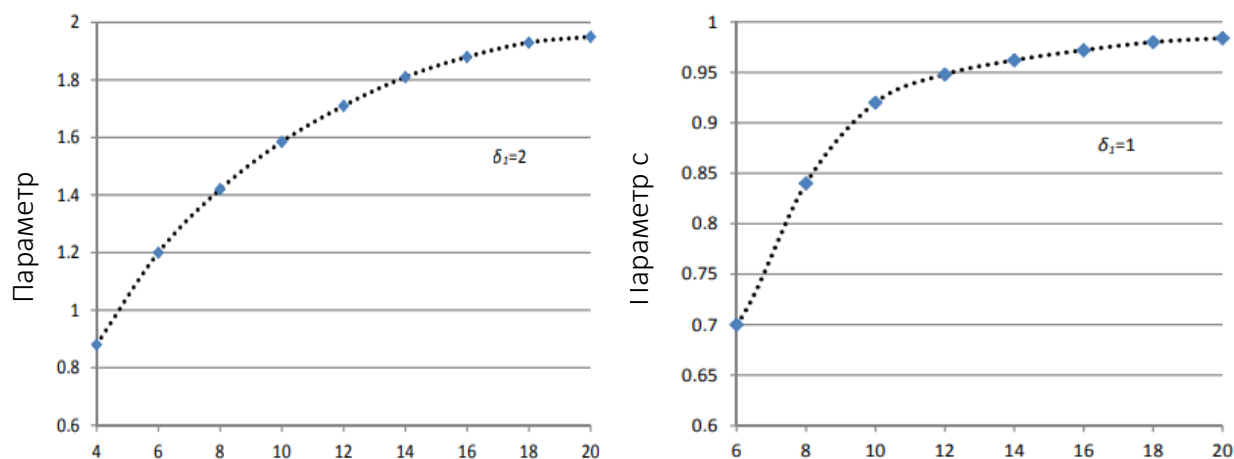
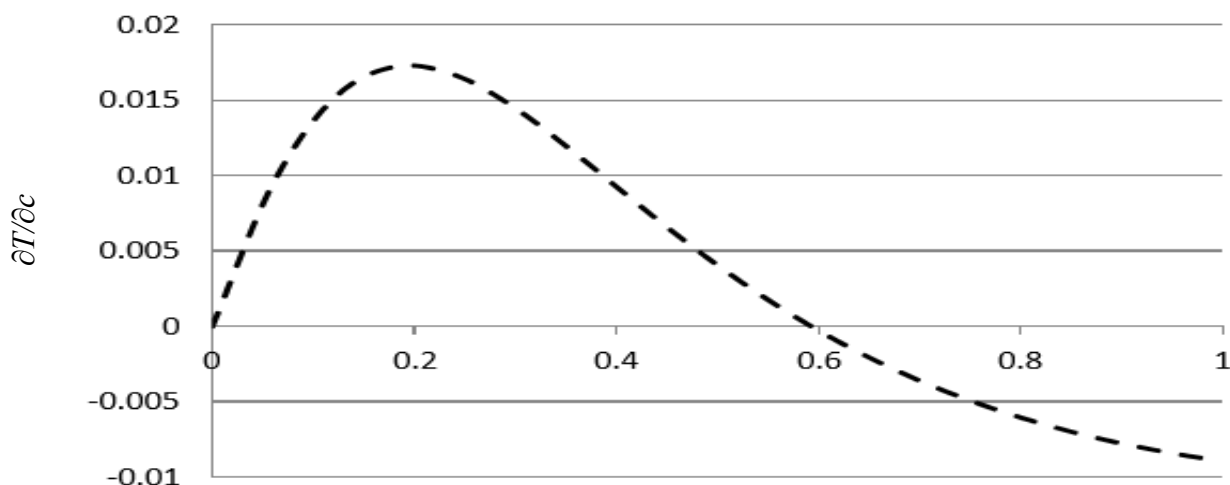


Рисунок 4. Расчет параметра c для двух систем с разным значением δ_1

На рисунке 5 параметр d рассчитан для 10-кабельной системы методом LSM.



10-Cable System($\delta l=3$)

Рисунок 5. Расчет параметра d для 10-кабельной системы ($\delta l=3$)

Сравнение рисунка 4 и рисунка 5 показывает, что изменение жесткости критического ванта оказывает минимальное влияние на параметр d и, следовательно, на конечные результаты. Фактически на параметр d в основном влияет количество вантов, а также их жесткость. Однако влияние жесткости кабеля весьма незначительно. Кроме того, основная цель данного исследования – представить практичную и простую функцию аппроксимации. Следовательно, чтобы сделать функцию аппроксимации максимально простой, влияние жесткости кабеля на значение параметра d игнорируется.

Закключение. Исследование осевого усилия кабелей показало, что DAF критического кабеля составляет от 1,35 до 2. Это показывает, что использование DAF, равного двум, безопасно для конструкции кабелей. А также, что DAF изгибающий момент в опорах значительно больше, чем в двух. Следовательно, в данном случае использование статического анализа с помощью DAF вообще небезопасно, и настоятельно рекомендуется динамический анализ временной истории.

Внезапная потеря кабелей:

Одним из наиболее критичных сценариев нагружения вантового моста является вне-

запная потеря ванта, которая может привести к прогрессирующему обрушению типа «молнии», из чего можно сделать следующие выводы:

1. Динамические характеристики моста после внезапной потери кабелей сильно зависят от местоположения потерянного кабеля.

2. Динамические коэффициенты усиления DAF могут превышать 2 при приложении резких нагрузок к конструкциям с несколькими степенями свободы, таким как вантовые мосты. Следовательно, конструкция моста такого типа, основанная на $DAF=2$, не

всегда консервативна, и это может привести к недооценке коэффициентов нагрузки в критических сечениях.

3. Для каждой секции, а также для каждого компонента реакции (например, прогиб, внутренние усилия и т. д.) должны быть указаны различные DAF, также влияние действия и тип конструкции должны быть отражены в правильно определенном DAF.

4. В вантовых мостах на DAF влияет расположение стоек, сочетание нагрузок, жесткость настила, а также коэффициент демпфирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аоки Ю. Анализ работоспособности вантовых мостов в экстремальных условиях: докторская диссертация, 2014.
2. Вольф М. и Старосек У. Анализ потерь в кабелях и поведение при обрушении мостов с кабельными опорами: Доклад 5-й Международной конференции по техническому обслуживанию, безопасности и управлению мостами (IABMAS), Taylor & Francis Group, Абингдон, Великобритания, 2010.
3. Нгуа Н.Т., Самек В. Вантовые мосты // Исследование разрыва кабеля: Журнал гражданского строительства и архитектуры. – 2016. – № 10. – С. 270-279.
4. Старосек У. и Хаберланд М. Непропорциональный коллапс // Терминология и процедуры: Журнал эксплуатационных характеристик построенных объектов. – 2010. – № 24. – С. 519-528.
5. Фатоллахзаде А., Нагипур М. и Абдоллахзаде Г. Анализ прогрессирующего обрушения вантовых мостов из-за обрыва кабеля во время землетрясения // Международный журнал мостостроения (IJBE). – 2016. – № 4. – С. 63-72.
6. Хаберланд М. Невероятный коллапс и надежность фон Трагверкена: докторская диссертация, Гамбургский технологический университет, Гамбург, Германия, 2012.
7. Хуен Х.Т., Ивасаки Э. Приближенный метод динамического коэффициента усиления для альтернативной траектории нагрузки при резервировании и линейном статическом анализе постепенного разрушения стальных ферменных мостов // Тематические исследования в области проектирования конструкций. – 2016. – № 6. – С. 53-62.
8. Шогиджаван М. Прогессирующее обрушение длиннопролетных мостов на вантовых опорах. Гамбургский технический университет, 2020.

BEHAVIOR AND PERFORMANCE OF CABLE BRIDGES DURING SUDDEN CABLE BREAKAGE

AHMED Ramadan Ahmed

Postgraduate Student

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-9411-656X>

YERMOSHIN Nikolay Alekseevich

Doctor of Science in Military, Professor

ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0367-5375>

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

St. Petersburg, Russia

In cable-stayed bridges, damage or failure of primary structural components such as tower, piers or cables, caused by extreme loadings can lead to the collapse of the entire bridge. For this type of bridge, zipper-type collapse defined as a horizontal progressive collapse is one of the most concerning failure modes that can be caused by the sudden loss of cables.

Keywords: cable-stayed bridges, failure, cables, collapse, zipper-type collapse, progressive collapse, sudden loss.

СЕБЕСТОИМОСТЬ РЕКОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ТЕРРИТОРИИ ХМАО-ЮГРЫ

ЗОЛЬНИКОВ Макар Александрович

студент бакалавриата

ИЗАНЬЯРОВА Алина Эдуардовна

студент бакалавриата

Научный руководитель:

КОРОБОЧКИН Дмитрий Викторович

преподаватель

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»

г. Ханты-Мансийск, Россия

В статье рассматривается проблема, связанная с необходимостью реконструкции существующих зданий, ветхостью и устаревшими системами, а также необходимостью их обновления и модернизации. Целью данной статьи является анализ и оценка факторов, влияющих на себестоимость реконструкции объектов капитального строительства на территории ХМАО-Югры.

Ключевые слова: реконструкция зданий, капитальный ремонт, себестоимость, финансовая эффективность реконструкции.

Процесс реконструкции объектов является одним из ключевых направлений развития Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО-Югры).

Разработка мероприятий по укреплению восстановлению конструкций связана с определенными трудностями, что позволило нам сформулировать цель данного исследования,

которая заключается в выявлении особенностей реконструкции жилых объектов с заменой и укреплением фундаментов и стен.

На первом этапе фактическое состояние объектов ремонта и реконструкции определяется путем проведения обследования.

На втором этапе предлагается система проектных решений, которые позволят уси-