

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5>

АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ АРОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ СТАТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Научная статья

Чуканов С.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0005-1191-5665;¹ Рудненский индустриальный университет, Лисаковск, Казахстан

* Корреспондирующий автор (chukanov.serg[at]gmail.com)

Аннотация

В статье выполнено численное исследование комбинированных арочных конструкций, сформированных из стальных и железобетонных сегментов с различным процентным соотношением. Целью работы является анализ перераспределения внутренних усилий, деформаций и характера работы арочной конструкции при изменении доли стали и железобетона в составе арки. Исследование проведено в программном комплексе ЛИРА-САПР методом конечных элементов с использованием плоской расчётной схемы. Рассмотрено 11 вариантов структуры арки с содержанием стали от 100% до 0% с шагом 10%. В расчёт включены нагрузки в соответствии с нормативными требованиями. Оценивались изменения продольных сил, изгибающих моментов, поперечных усилий, перемещений в коньке, а также необходимая площадь армирования железобетонных сегментов. Полученные данные позволяют проследить закономерности влияния соотношений стальной и железобетонной частей на напряжённо-деформированное состояние арочной конструкции.

Ключевые слова: комбинированные арочные конструкции, численное моделирование, арочные покрытия, железобетонно-стальные арки, статический расчет.

ANALYSIS OF COMBINED ARCH ROOFS USING THE STATIC CALCULATION METHOD

Research article

Chukanov S.^{1,*}¹ ORCID : 0009-0005-1191-5665;¹ Rudny Industrial Institute, Lisakovsk, Kazakhstan

* Corresponding author (chukanov.serg[at]gmail.com)

Abstract

The article presents a numerical study of combined arch constructions formed from steel and reinforced concrete segments with different percentage ratios. The aim of the work is to analyse the redistribution of internal forces, deformations and the nature of the arch construction when changing the proportion of steel and reinforced concrete in the arch. The study was carried out in the LIRA-CAD software package using the finite element method with a flat design scheme. Eleven variants of the arch structure with steel content ranging from 100% to 0% in 10% increments were examined. Loads in accordance with regulatory requirements were included in the calculation. Changes in longitudinal forces, bending moments, transverse forces, displacements at the ridge, as well as the required armouring area of reinforced concrete segments were evaluated. The obtained data allow to trace the patterns of influence of the ratio of steel and reinforced concrete parts on the stress-strain state of the arch construction.

Keywords: combined arch constructions, numerical modelling, arch roofs, reinforced concrete and steel arches, static calculation.

Введение

Арочные сооружения находят широкое применение в строительстве зданий и сооружений различного назначения — от спортивных комплексов, ангаров, транспортных терминалов, промышленных объектов до внушительных архитектурных форм. Популярность таких конструкций объясняется их способностью перекрывать значительные пролеты до 100 и более метров без промежуточных опор обеспечивая гибкость внутреннего пространства и снижение общей материалоемкости [1, С. 29–31].

Надежность арочных конструкций в условиях эксплуатации играет ключевую роль, поскольку их разрушение может привести к необратимым последствиям. В проектных решениях необходимо уделять большое внимание обеспечению прочности, устойчивости и долговечности сооружений, особенно в районах с повышенной снеговой или ветровой нагрузкой.

Большепролетные арочные покрытия, несмотря на их эффективность, имеют ряд инженерных проблем. Одной из ключевых проблем является высокая чувствительность конструкции к проектным ошибкам. Согласно исследованиям [2], [3], до 50% аварий арочных сооружений происходят по причине инженерных просчетов, что подтверждают инциденты на объектах Hartfort Coliseum (1978 год), Metrodome (1983 год) и велотреке в Милане (1985 год).

Выбор материала для арочного покрытия существенно влияет на прочность, стоимость, сроки монтажа и долговечность сооружения. Наиболее распространены конструкции из стали, железобетона, клееной древесины и композитов. Стальные арки обеспечивают высокую прочность и удобство монтажа, однако требуют антикоррозионной защиты [4]. Применение двухпоясных арок с профилированными листами и предварительным напряжением позволяет

повысить жёсткость и снизить расход стали [5, С. 152]. Железобетон обладает огнестойкостью и долговечностью, но требует тяжёлой техники при монтаже сооружений [6]. Клееная древесина отличается малым весом и используется в общественных зданиях за счёт выразительности и экологичности [7, С. 112–118]. Композитные материалы с высокой удельной прочностью пока ограниченно внедряются в крупные проекты [8, С. 45–53].

Комбинированные арочные конструкции находят широкое применение при создании большепролетных покрытий за счёт сочетания материалов с дополняющими характеристиками. Помимо традиционного сочетания стали и железобетона, например, в трубобетонных арках CFST [9, С. 70–78], активно применяются и другие схемы.

В комбинированных арках сопряжение стали и бетона сопровождается концентрацией напряжений, вызванной разностью модулей упругости и температурного расширения [10, С. 42–49].

Для создания надежных арочных сооружений важна конструкция узловых соединений. Отсутствие жесткости приводит к неравномерному распределению усилий снижая общую устойчивость конструкции.

Особенно чувствительны к распределению усилий бетонные элементы, в которых при недостаточной анкеровке или наличии изгибающих моментов могут возникать трещины [11]. Металлические компоненты узлов подвержены усталостному разрушению при действии повторяющихся или динамических нагрузок, особенно если имеется эксцентриситет или несоосность в местах крепления. Это делает критически важным точный расчёт и конструктивное решение таких соединений.

При проектировании устойчивых комбинированных арочных сооружений весьма важен точный расчет и обоснование конструктивного решения.

Цель работы: Анализ перераспределения внутренних усилий и деформаций арочной конструкции при изменении доли стали и железобетона в составе арки методом статического расчета.

Методы и принципы исследования

Объектом исследования послужила комбинированная арочная конструкция с чередующимися сегментами из стали и железобетона, предназначена для покрытий общественных и производственных зданий, одновременно обеспечивающая высокую несущую способность, устойчивость и простую технологию монтажа объекта.

Исследовано одиннадцать вариантов компоновки комбинированной арочной конструкции (таблица 1), различающихся по количественному соотношению сегментов из железобетона в нижней части и стали в верхней части. Сечение арки сквозное, решетчатое с высотой сечения до 660мм в свету между поясами. Для железобетона использовался бетон класса В30, армированный арматурой класса А500. В металлических сегментах конструкции использовалась прокатная сталь С345. Расчётная длина арки фиксирована 18м, высота в коньке 10.5 м. Данные размеры выбраны как базовый фрагмент, прототип, арочной системы и мы предполагаем, что поведение таких конструкций при разном соотношении материалов будет справедливо и для других значений пролетов. Соотношение между материалами определялось как процентное отношение длины параболы участка из железобетона к общей длине арочной конструкции по параболе.

Для расчетной схемы арочной конструкции был принят одношарнирный вариант с шарниром в коньке (замке), в опорах и в местах сопряжения железобетонной и металлических частей вариант закрепления жесткий. Такой тип соединения считается одним из классических и позволяет более точно учитывать перераспределение усилий между сегментами из разных материалов. Шарнир в вершине арки устраняет момент в коньке, что особенно важно при работе с разнородными материалами, имеющими различные модули упругости и температурные характеристики. Выбор обоснован также конструктивными и технологическими преимуществами: упрощается монтаж, снижается чувствительность к температурным деформациям и уменьшается вероятность трещинообразования в бетонных участках.

Таблица 1 - Варианты комбинированных арочных конструкций
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.1>

Вид материала	Варианты конструкции										
	Содержание материалов в структуре арки, %										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сталь 	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Железобетон 	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Расчетная модель арочной конструкции создана на основе геометрической информации, сформированной в среде Autodesk Revit. С помощью программы была построена трёхмерная модель арочной конструкции, включающая контурные элементы. Эта модель послужила базой для генерации расчетной схемы. В программном комплексе ЛИРА-САПР с применением метода конечных элементов (МКЭ) [12, С. 312] проведен численный анализ напряжённо-деформированного состояния арочной конструкции.

Модель всех вариантов арочной конструкции рассчитывается с учётом одинаковых климатических условий и нагрузок. Сравнение вариантов проводится по значениям прогибов, внутренних усилий и результатов предельных состояний [13, С. 47–54].

В ЛИРА-САПР предварительное назначение жёсткостей заключается в формальном присвоении каждому конечному элементу эквивалентных значений модуля упругости и моментов инерции, отражающих реальные свойства материалов и геометрию сечения. Для бетонных стержней задаётся эффективный модуль упругости. В итоге «назначение жёсткостей» в ЛИРА-САПР — это базовый этап, без которого дальнейшие расчёты (вычисление внутренних усилий, перемещений и подбор армирования) не дадут достоверных результатов. Именно эти параметры определяют, как модель поведёт себя под нагрузкой, насколько гибкой или жёсткой окажется арка, и в каком режиме будут работать стальные и железобетонные элементы.

Назначенные жесткости для расчетной модели приведены на рисунке 2, где обозначены под номерами:

- 1 – профиль замкнутый сварной гнутый квадратный по ГОСТ 30245-94, сечением 50мм x 4мм;
- 2 – профиль замкнутый сварной гнутый квадратный по ГОСТ 30245-94, сечением 80мм x 4мм;
- 4 – железобетонный элемент, двутавр, сечением 8см x 75см;
- 5 – железобетонный элемент, двутавр, сечением 8см x 90см, изображен на рисунке 1.

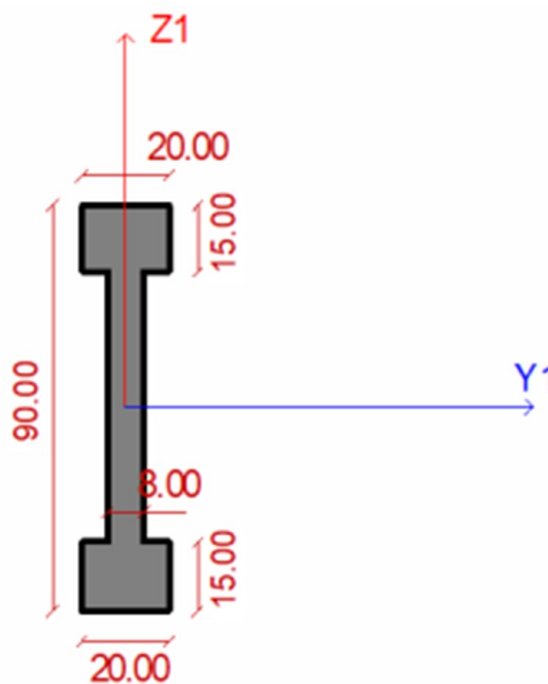


Рисунок 1 - Жесткость 5 «двутавр 8 x 90 см»

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.2>

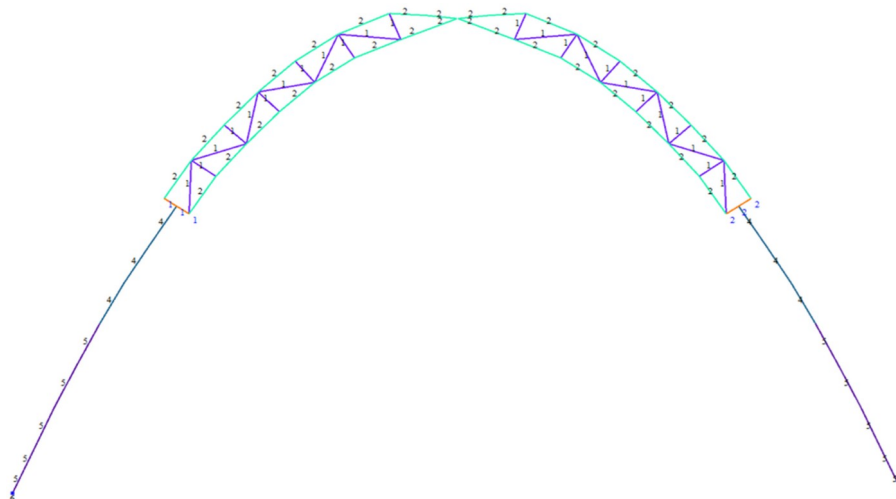


Рисунок 2 - Назначенные жесткости арочной конструкции:

1 – профиль замкнутый сварной гнутый квадратный по ГОСТ 30245-94, сечением 50мм x 4мм; 2 – профиль замкнутый сварной гнутый квадратный по ГОСТ 30245-94, сечением 80мм x 4мм; 4 – железобетонный элемент, двутавр, сечением 8см x 75см; 5 – железобетонный элемент, двутавр, сечением 8см x 90см

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.3>

На рисунке 3 представлены нагрузочные эпюры, на которых отражены все виды внешних воздействий, учитываемых при статическом анализе арки. Каждый из рисунков демонстрирует пространственное распределение нагрузок, которые приведены далее, на элементы модели и служит исходным для формирования расчётных сочетаний усилий:

Климатические условия района строительства:

- снеговой район — III (нормативная нагрузка 150 кг/м^2); в данной конфигурации арочной конструкции снеговая нагрузка в расчётах не учтена по причине большого угла уклона покрытия конструкции, предполагается что при таком скате снег не будет задерживаться на покрытии.

- ветровой район — IV (нормативная нагрузка 38 кг/м^2);

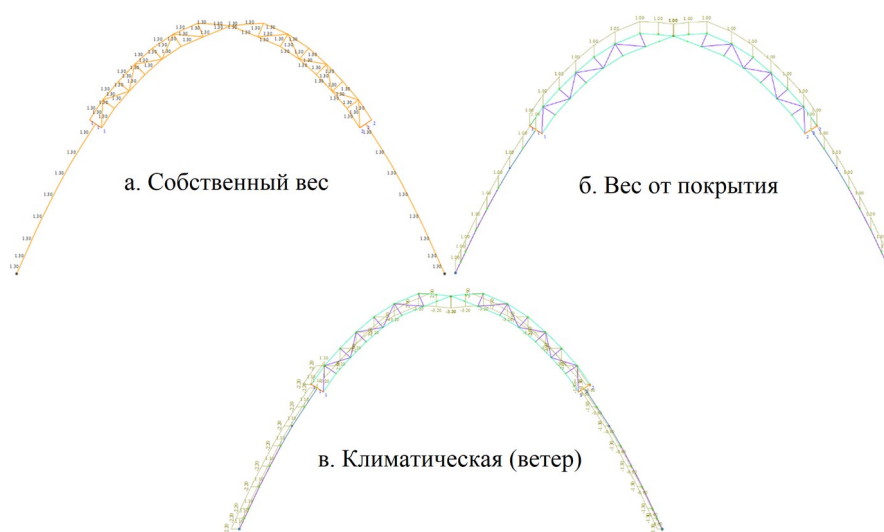
Постоянные:

- собственный вес несущих конструкций задан с использованием средств программного комплекса в соответствии с назначенными жесткостями и учетом коэффициента надежности по нагрузке, $\gamma_f=1.1$,

- вес от покрытия, нормативная нагрузка — $24,5 \text{ кг/м}^2$ при γ_f (коэффициент надежности по нагрузке) = 1,2, расчетная нагрузка равна $29,4 \text{ кг/м}^2$

Кратковременные:

- климатическая (учтена только, ветровая). нормативная нагрузка — 38 кг/м^2 при $\gamma_f = 1,4$, расчетная нагрузка равна $53,2 \text{ кг/м}^2$

Рисунок 3 - Схема приложенных нагрузок
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.4>

Расчет в программном комплексе ЛИРА-САПР выполнен с помощью модуля «СТЕРЖЕНЬ», он предназначен для расчета сечений стержневых элементов при косом внецентренном нагружении с кручением и выполняет следующие функции:

Виды усилий, возникающие отдельно в железобетонных и металлических частях конструкции: продольная сила N (сжимающая и растягивающая), изгибающие моменты M_u в одной плоскости, поперечные силы Q_z , усилия в опоре по R_z , R_x и R_{uy} , перемещения в коньке в осях Z и X ;

Для обеспечения армирования железобетонных частей в комбинированной арочной конструкции использовались встроенные в ЛИРА-САПР модули подбора арматуры.

Таким образом, модуль учитывает все компоненты напряжённого состояния для проверки несущей способности сечений по предельным состояниям [14, С. 23–29].

На рисунках 4 приведены визуализации ключевых промежуточных вариантов одношарнирной комбинированной арочной конструкции при изменении процентного содержания стальной части сечения от 0% до 100%. Далее выполнен поэлементный анализ изменений каждого параметра при варьировании доли стали, что позволяет проследить закономерности перераспределения усилий, оценить влияние распределение разнородных частей на несущую способность и деформативность конструкции, а также выявить оптимальные диапазоны сочетаний материалов.

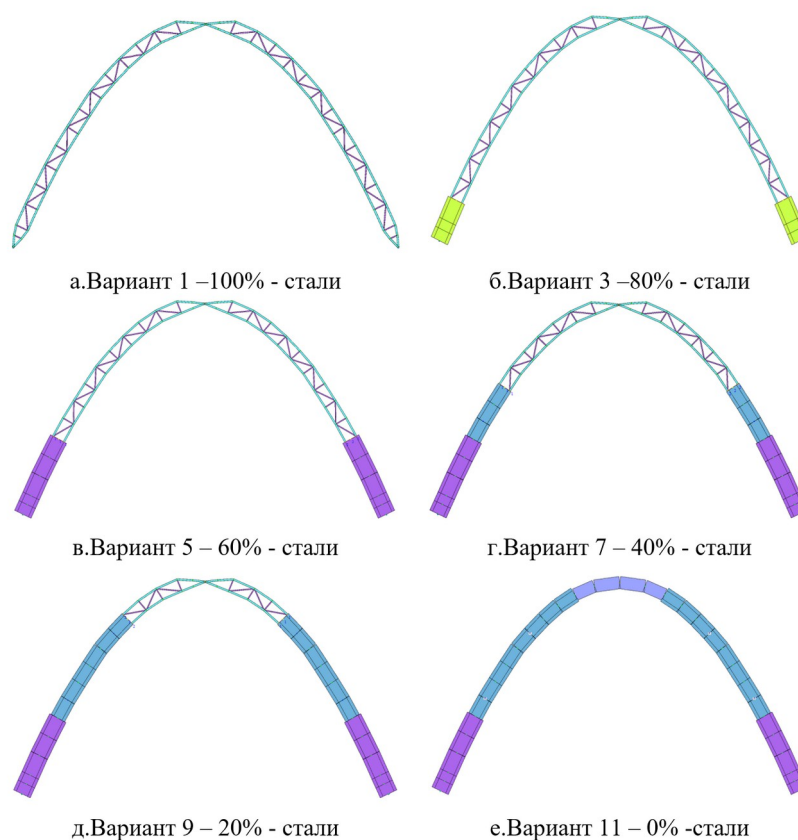


Рисунок 4 - Визуализация распределения материалов
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.5>

Основные результаты

Продольная сила N (Рисунок 5) - анализ продольных усилий показал тенденцию перераспределения нагрузок между стальной и железобетонной составляющими при изменении процентного содержания стали. В стальной части максимальная растягивающая сила наблюдается при варианте 100% стали ($N^+ = 8,91$ т), после чего она постепенно снижается и практически исчезает при переходе к железобетонному варианту 0% стали. Аналогично сжимающая сила достигает 7,64 т при 100% стали, но быстро уменьшается при увеличении доли железобетона. В железобетоне, напротив, растягивающие усилия возрастают от 0,52 т при 90% стали до 1,16 т при 40% стали, после чего стабилизируются, а сжимающие усилия достигают максимума при варианте 0% стали ($N^- = 8,20$ т). Таким образом, при увеличении доли железобетона его элементы берут на себя всё большую часть продольных сил, что закономерно повышает требования к армированию и подтверждает эффективность комбинированных схем [15, С. 58–65].

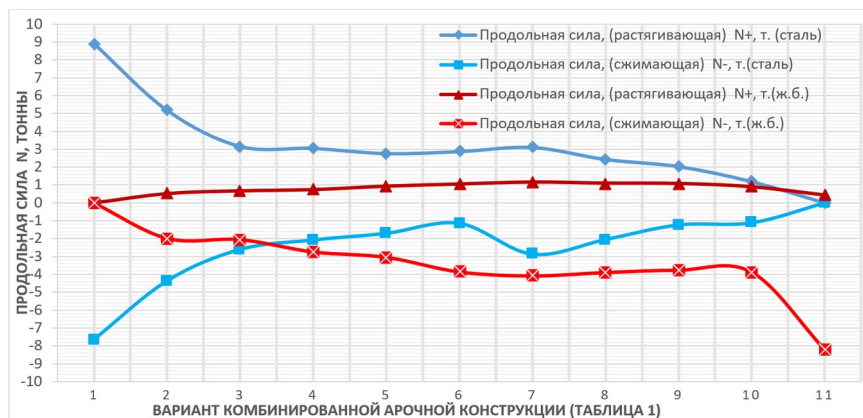


Рисунок 5 - График зависимостей продольной силы N от соотношения частей конструкции
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.6>

Изгибающий момент M_y (Рисунок 6) — анализ изгибающих моментов выявил, что стальная часть конструкции воспринимает лишь незначительные значения M_y , не превышающие 0,07 т·м, что подтверждает её вспомогательную роль в восприятии изгиба. Основная нагрузка по изгибающим моментам приходится на железобетонную составляющую. Положительный момент в железобетонных элементах изменяется в пределах от 1,98 до 3,14 т·м, демонстрируя снижение при увеличении доли жёсткой стальной части и стабилизацию в диапазоне 50% стали. Отрицательные моменты имеют значительно большие значения и достигают максимума $|M_y| = 8,33$ т·м при соотношении 40% стали, после чего наблюдается постепенное снижение. Таким образом, наибольшие изгибающие воздействия сосредоточены в железобетонных элементах, причём критической зоной является область 50–60% стали, что требует повышенного внимания к расчёту арматуры на изгиб и обеспечению трещиностойкости конструкции.

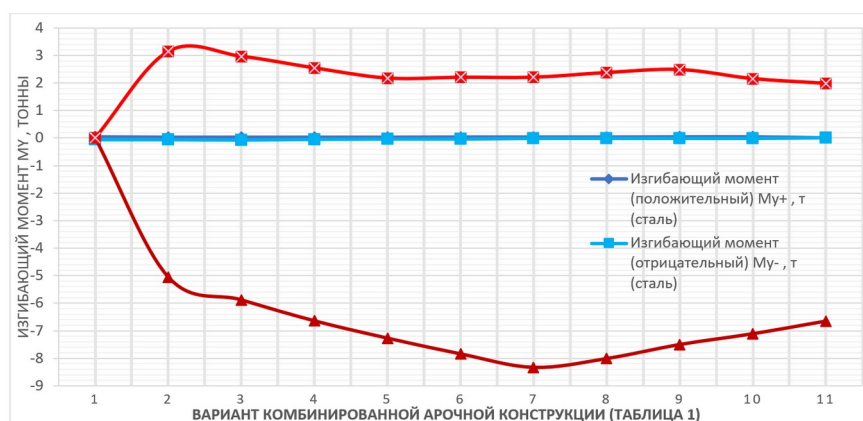


Рисунок 6 - График зависимостей изгибающего момента M_y от соотношения частей конструкции
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.7>

Перемещения в коньке X (Рисунок 7) демонстрируют разные закономерности в зависимости. В варианте 100%, где арка выполнена полностью из стали и имеет жесткое закрепление в опоре, горизонтальное перемещение X достигает 16,63 мм. Для такой схемы это значение является допустимым и конструкция сохраняет свою работоспособность. При добавлении железобетонной составляющей перемещения резко уменьшаются и стабилизируются в диапазоне 1,5–2,1 мм, что свидетельствует о росте жёсткости системы. Вертикальные перемещения Z остаются незначительными для всех комбинаций, с максимумом около 1,18 мм при соотношении 30% стали и минимумом 0,10 мм при 80%. В целом прослеживается тенденция: увеличение доли железобетона снижает горизонтальные смещения и несколько увеличивает вертикальные, при этом перемещения остаются в пределах допустимых значений.

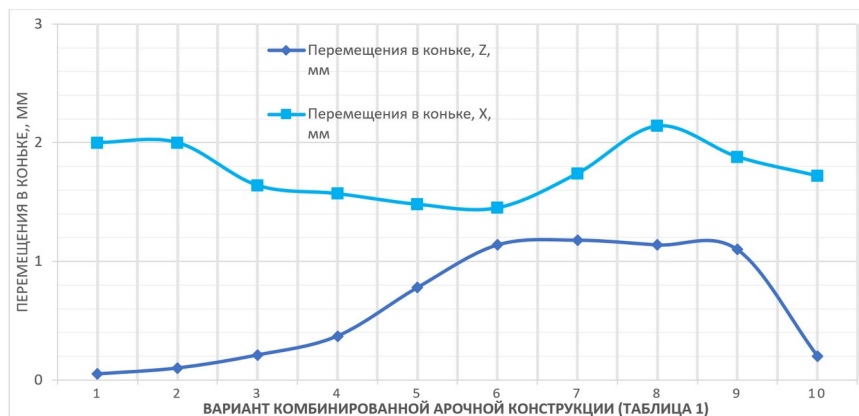


Рисунок 7 - График зависимостей перемещений в коньке от соотношения частей конструкции

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.8>

Площадь армирования растёт по мере увеличения доли железобетона: от минимальных 3,35 см² при 90% стали до 8,21 см² при 50%, с резким скачком до 21,60 см² в варианте 0% стали. Это естественная тенденция, отражающая необходимость компенсировать снижение доли стали за счёт арматуры в ж/б элементах.

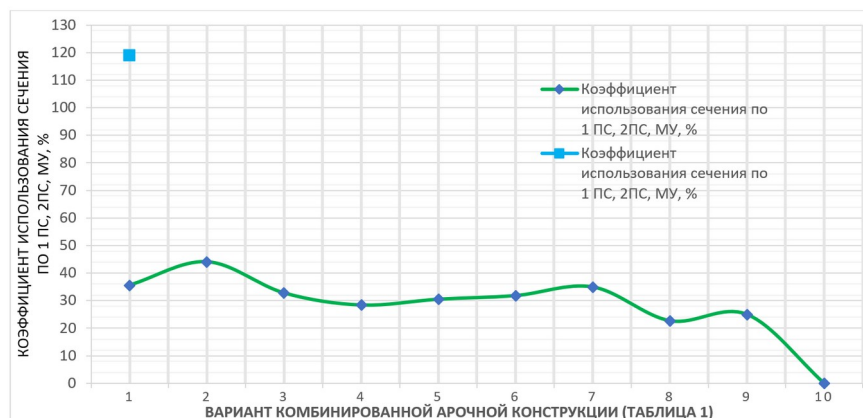


Рисунок 8 - График зависимостей коэффициента использования сечения по 1 ПС, 2 ПС, МУ

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.67.5.9>

Коэффициент использования сечения наглядно демонстрирует рисунок 8, эффективность работы арки при разных сочетаниях стали и железобетона. В варианте 100 стали его значение составляет 119%, что превышает допустимый уровень и указывает на перегрузку конструкции по первой группе предельных состояний. Это подтверждает, что чисто стальная схема в заданных условиях не обеспечивает требуемой надёжности. При добавлении железобетонной составляющей показатели резко снижаются и далее изменяются в относительно узком диапазоне: от 28 до 45% для комбинаций 80–30%. В этих вариантах коэффициент использования находится на оптимальном уровне, обеспечивая достаточный запас прочности без избыточного перерасхода материалов. Минимальные значения зафиксированы при соотношениях 10% стали (около 23–25%), что свидетельствует о наиболее «разгруженной» схеме, хотя чрезмерное снижение коэффициента также указывает на недоиспользование несущего потенциала материала. Таким образом, полученные результаты показывают, что рациональными являются промежуточные варианты, где баланс стали и бетона позволяет снизить эксплуатационные усилия и обеспечить оптимальную работу конструкции.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при увеличении доли железобетона арка становится более устойчивой, происходит постепенное перераспределение восприятия усилий от стальных элементов к железобетонным — уменьшаются горизонтальные перемещения в коньке, возрастает запас по коэффициенту использования конструкции в целом. Стальная часть конструкции на начальных вариантах берет на себя значительную часть растягивающих усилий, в то время как добавление железобетона приводит к росту общей надёжности комбинированной арочной конструкции.

Также анализ показал, что все варианты комбинированных арок обладают устойчивыми характеристиками и демонстрируют закономерное перераспределение усилий между стальной и железобетонной частью. Несмотря на различия в величинах продольных сил, моментов, поперечных сил, реакций, перемещений и площади армирования, изменения носят плавный характер и остаются в пределах, обеспечивающих надёжную работу конструкции. Это позволяет сделать общий вывод: комбинированные арки в целом являются эффективным решением и могут успешно применяться в практике проектирования. При этом выбор конкретного соотношения стали и железобетона следует

осуществлять исходя из функционального назначения будущего здания — для промышленных объектов может быть оправдана большая доля стали, для общественных и долговечных сооружений — усиление железобетонной составляющей. Такой подход делает комбинированные арочные системы универсальным инструментом для решения разнообразных инженерных задач.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Артебякина Г.И. Обзор конструктивных решений арочных покрытий для общественных зданий / Г.И. Артебякина, В.А. Щербина // Молодой ученый. — 2017. — № 6(140). — С. 29–31.
2. Gammell B. Almost a Tragedy: The Collapse of the Hartford Civic Center / B. Gammell // ConnecticutHistory.org. — URL: <https://connecticuthistory.org/almost-a-tragedy-the-collapse-of-the-hartford-civic-center/> (accessed: 10.27.2025).
3. Velodrome of dreams: the history of Milan's Vigorelli track // Pirelli. — 2024. — URL: <https://www.pirelli.com/global/en-ww/road/bicycles/brief-history-of-the-vigorelli-velodrome-142173/> (accessed: 25.10.2024).
4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. — Москва: Минстрой России, 2016.
5. Марышев А.Ю. Двухпоясное преднапряжённое арочное покрытие с поясами из стальных профилированных листов: дис. ... канд. техн. наук / А.Ю. Марышев. — Москва, 2001. — 152 с.
6. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. — Москва: Минстрой России, 2018.
7. Курбатов А.В. Эффективность применения клеёных деревянных арочных конструкций в современном строительстве / А.В. Курбатов // Современные проблемы науки и образования. — 2017. — № 4. — С. 112–118.
8. Власенко В.В. Арочные мостовые конструкции из полимерных композиционных материалов: опыт и перспективы применения / В.В. Власенко // Вестник ВИАМ. — 2020. — № 10. — С. 45–53.
9. Chen B. Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China / B. Chen, T. Wang // Practice Periodical on Structural Design and Construction. — 2009. — Vol. 14, Iss. 2. — P. 70–78. — DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0680(2009)14:2(70).
10. Левин В.А. Влияние температурных и упругих деформаций на работу стально-бетонных композитных элементов / В.А. Левин, А.А. Журавлёв // Известия вузов. Строительство. — 2018. — № 9. — С. 42–49.
11. Nussbaumer A. Fatigue of bridge joints using welded tubes or cast steel node solutions / A. Nussbaumer, S.C. Haldimann-Sturm, A. Schumacher. — 2006. — URL: https://www.researchgate.net/publication/46178705_Fatigue_of_bridge_joints_using_welded_tubes_or_cast_steel_node_solution (accessed: 25.10.2024).
12. Калугин А.Ю. Моделирование и расчёт строительных конструкций в SCAD, ЛИРА-САПР и Revit / А.Ю. Калугин. — Москва: АСВ, 2022. — 312 с.
13. Малыгин В.А. Численное моделирование комбинированных стально-железобетонных конструкций в программном комплексе ЛИРА-САПР / В.А. Малыгин, П.С. Платонов // Известия вузов. Строительство. — 2021. — № 3. — С. 47–54.
14. Скрыбин А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния большепролётных арочных покрытий смешанного типа / А.А. Скрыбин, К.Ю. Токарев // Промышленное и гражданское строительство. — 2022. — № 8. — С. 23–29.
15. Широков Р.П. Перераспределение внутренних усилий в сталежелезобетонных арках по результатам численного моделирования / Р.П. Широков, В.Ю. Аксенов // Современные проблемы науки и образования. — 2024. — № 2. — С. 58–65.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Artebyakina G.I. Obzor konstruktivnykh resheniy arochnykh pokrytiy dlya obshchestvennykh zdaniy [Review of design solutions for arch coverings of public buildings] / G.I. Artebyakina, V.A. Shcherbina // Molodoy uchenyy [Young Scientist]. — 2017. — № 6(140). — P. 29–31. [in Russian]
2. Gammell B. Almost a Tragedy: The Collapse of the Hartford Civic Center / B. Gammell // ConnecticutHistory.org. — URL: <https://connecticuthistory.org/almost-a-tragedy-the-collapse-of-the-hartford-civic-center/> (accessed: 10.27.2025).
3. Velodrome of dreams: the history of Milan's Vigorelli track // Pirelli. — 2024. — URL: <https://www.pirelli.com/global/en-ww/road/bicycles/brief-history-of-the-vigorelli-velodrome-142173/> (accessed: 25.10.2024).
4. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and Actions] / Minstroy Rossii. — Moscow, 2016. [in Russian]
5. Maryshev A.Yu. Dvukhpoyasnoye predanapryazhyonnoye arochnoye pokrytiye s poiyasami iz stalykh profilirovannykh listov: dis. ... kand. tekhn. nauk [Double-belt prestressed arch covering with belts made of steel profiled sheets: PhD (Engineering) Thesis] / A.Yu. Maryshev. — Moscow, 2001. — 152 p. [in Russian]

6. SP 63.13330.2018. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii. Osnovnyye polozheniya [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions] / Ministry of Construction of Russia. — Moscow, 2018. [in Russian]
7. Kurbatov A.V. Effektivnost' primeneniya kleyonykh derevyannykh arochnykh konstruksiy v sovremennom stroitel'stve [Efficiency of using glued laminated timber arch structures in modern construction] / A.V. Kurbatov // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]. — 2017. — № 4. — P. 112–118. [in Russian]
8. Vlasenko V.V. Arochnyye mostovyye konstruksii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov: opyt i perspektivy primeneniya [Arch bridge structures made of polymer composite materials: experience and application prospects] / V.V. Vlasenko // Vestnik VIAM [VIAM Bulletin]. — 2020. — № 10. — P. 45–53. [in Russian]
9. Chen B. Overview of Concrete Filled Steel Tube Arch Bridges in China / B. Chen, T. Wang // Practice Periodical on Structural Design and Construction. — 2009. — Vol. 14, Iss. 2. — P. 70–78. — DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0680(2009)14:2(70).
10. Levin V.A. Vliyaniye temperaturnykh i uprugikh deformatsiy na rabotu stal'no-betonnykh kompozitnykh elementov [Influence of temperature and elastic deformations on the behavior of steel-concrete composite elements] / V.A. Levin, A.A. Zhuravlyov // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. — 2018. — № 9. — P. 42–49. [in Russian]
11. Nussbaumer A. Fatigue of bridge joints using welded tubes or cast steel node solutions / A. Nussbaumer, S.C. Haldimann-Sturm, A. Schumacher. — 2006. — URL: https://www.researchgate.net/publication/46178705_Fatigue_of_bridge_joints_using_welded_tubes_or_cast_steel_node_solutions (accessed: 25.10.2024).
12. Kalugin A.Yu. Modelirovaniye i raschyot stroitel'nykh konstruksiy v SCAD, LIRA-SAPR i Revit [Modeling and calculation of building structures in SCAD, LIRA-SAPR and Revit] / A.Yu. Kalugin. — Moscow: ASV, 2022. — 312 p. [in Russian]
13. Malygin V.A. Chislennoye modelirovaniye kombinirovannykh stal'no-zhelezobetonnykh konstruksiy v programnom komplekse LIRA-SAPR [Numerical modeling of combined steel-reinforced concrete structures in the LIRA-SAPR software package] / V.A. Malygin, P.S. Platonov // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. — 2021. — № 3. — P. 47–54. [in Russian]
14. Skryabin A.A. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya bol'sheproletnykh arochnykh pokrytiy smeshannogo tipa [Analysis of the stress-strain state of long-span arch coverings of mixed type] / A.A. Skryabin, K.Yu. Tokarev // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. — 2022. — № 8. — P. 23–29. [in Russian]
15. Shirokov R.P. Pereraspredeleniye vnutrennikh usiliy v stalezhelezobetonnykh arkakh po rezul'tatam chislennogo modelirovaniya [Redistribution of internal forces in steel-reinforced concrete arches based on the results of numerical modeling] / R.P. Shirokov, V.Yu. Aksenov // Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]. — 2024. — № 2. — P. 58–65. [in Russian]