



(25)-0422-1

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК С ТРУБОБЕТОННЫМ ВЕРХНИМ ПОЯСОМ

Виталий Васильевич Руденко¹, Андрей Николаевич Миронов²,
Елена Николаевна Оленич³, Алла Павловна Бутова⁴

^{1,2,3,4} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия,

¹ vitalik.rudenko.2019@inbox.ru, ² a.n.myronov@donnasa.ru, ³ e.n.olenich@donnasa.ru,

⁴ a.p.butova@donnasa.ru

Аннотация. В статье рассмотрены исследования разрезных подкрановых балок пролетом $L = 12$ м с трубобетонным сжатым верхним поясом на воздействия мостового крана грузоподъемностью $Q = 32$ т среднего режима работы. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния элементов подкрановой балки аналитическим и численным методом. Аналитический метод осуществлён согласно инженерным методикам расчета сжатых трубобетонных элементов, численный выполнен в программном комплексе «Лира САПР 2016 R5». В ПК «Лира САПР 2021» произведен расчет в физически нелинейной постановке, рассмотрена совместная работа стального сечения и бетонного ядра на восприятие вертикальных и горизонтальных нагрузок. Результаты анализа согласуются с действующими нормативными документами СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» и СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции». Выполнено сравнение металлоёмкости подкрановой балки с трубобетонным верхним поясом и сварной балки двутаврового составного сечения. Исследования направлены на определение возможности эксплуатации подкрановых балок с применением трубобетона без тормозной конструкции. Выполненные исследования являются важным шагом в области расчета трубобетонных изгибаемых конструкций, ввиду недостаточного опыта использования подобных конструкций в России.

Ключевые слова: трубобетонная балка (ТББ), напряженно-деформированное состояние (НДС), бетонное ядро, физическая нелинейность, диаграмма деформирования материала, напряжения, прогиб, металлоёмкость

Для цитирования: Напряженно-деформированное состояние подкрановых балок с трубобетонным верхним поясом / В. В. Руденко [и др.]. // *Металлические конструкции*. 2025. Том 31, № 2. С. 57–75. doi: 10.71536/mc.2025.v31n2.2. edn: ibhfod.

Original article

STRESS-STRAIN CONDITION OF CRANE BEAMS WITH A TUBE- CONCRETE UPPER BELT

Vitaly V. Rudenko¹, Andrey N. Mironov², Elena N. Olenich³, Alla P. Butova⁴

^{1,2,3,4} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia,

¹ vitalik.rudenko.2019@inbox.ru, ² a.n.myronov@donnasa.ru, ³ e.n.olenich@donnasa.ru,

⁴ a.p.butova@donnasa.ru



Abstract. The article considers studies of split crane beams with a span of $L = 12$ m with a compressed tube-concrete upper belt on the effects of an overhead crane with a lifting capacity of $Q = 32$ tons of average operating mode. The stress-strain state of crane beam elements is analyzed using analytical and numerical methods. The analytical method was carried out according to engineering methods for calculating compressed tubular concrete elements, the numerical method was performed in the software package «Lira CAD 2016 R5». In the Lira CAD 2021 PC, a calculation was performed in a physically nonlinear formulation, and the joint work of the steel section and the concrete core on the perception of vertical and horizontal loads was considered. The results of the analysis are consistent with the current regulatory documents SP 16.13330.2017 «Steel structures» and SP 63.13330.2018 «Concrete and reinforced concrete structures». The metal consumption of a crane beam with a tube-concrete upper belt and a welded beam of an I-beam composite section is compared. The research is aimed at determining the possibility of using crane beams using pipe concrete without a brake structure. The research performed is an important step in the field of calculation of tubular concrete bendable structures, due to the lack of experience in using such structures in Russia.

Keywords: tube-concrete beam (TCB), stress-strain state (VAT), concrete core, physical nonlinearity, material deformation diagram, stresses, deflection, metal consumption

For citation: Stress-strain condition of crane beams with a tube-concrete upper belt / V. V. Rudenko [et al.]. *Metal Constructions*. 2025;31(2): 57–75. (in Russ.). doi: 10.71536/mc.2025.v31n2.2. edn: ibhfod.

Введение

Началом применения трубобетонных конструкций следует считать появление монотрубной системы, получившее широкое применение в мостостроении – арочных конструкций.

Многотрубное армирование является одним из первых применений трубобетонных конструкций. Примером использования такой конструкции можно отметить арочный мост пролётом 9 м. в восточном предместье Парижа, изображенный на рис. 1, построенный в 1931 г. Каждая арка содержит шесть труб диаметром 60×3,5 мм, заполненные бетоном [3; 4].

В 1940-х годах профессор В. А. Росновский предложил использовать в качестве конструктивного элемента мостов одну тонкостенную стальную трубу, заполненную бетоном, и в ряде проектов показал её преимущества по сравнению с обычными решениями.

Володарский мост через Неву в Санкт-Петербурге до реконструкции был построен в 1932–1936 годах по проекту инженеров Г. П. Передерия, В. И. Крыжановского и архитекторов К. М. Дмитриева и А. С. Никольского. Первый мост через Неву с использованием многотрубного армирования изображен на рис. 2. В каждой арке моста было 40 труб сечением 140×5 мм, заполненных бетоном.

Обширное применение в строительстве и разработка нормативной документации для расчета трубобетонных конструкций распространи-

лись в таких странах как: Китай [12], США [13; 14; 15], Франция [10], Италия [11] и др. [16].

В Китае применяются **арочные фермы** с трубобетонными поясами. Сегмент, показанный на рис. 3, использован для моста через реку Янцзы в Хэцзяне. Поперечные стальные трубы имеют диаметр 762 мм и толщину 16 мм, а продольные – диаметр 660 мм и толщину 12 мм. Для заполнения труб использовался бетон класса В60–В70.

Выдвигаемым предложением является подкрановая балка с трубобетонным верхним поясом. Пояс выполнен из гнутосварного замкнутого прямоугольного профиля, заполненного бетоном. Предполагается, что данное конструктивное решение позволит эксплуатировать подкрановую балку без использования тормозной конструкции.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованиями НДС трубобетонных конструкций занимались многие инженеры. Работы, представляющие решения и исследования изгибаемых трубобетонных конструкций, запатентованы.

Несущая балка с бетонным наполнением, предложенная А. Н. Тетиором, рассматривается как стальная несущая балка, один из поясов которой выполнен в виде полого трубчатого элемента, заполненного бетоном. Конструкция балки изображена на рис. 4–6. Изобретение

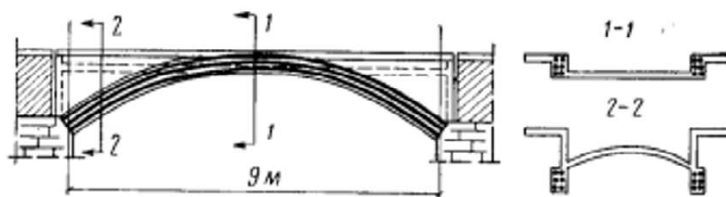


Рисунок 1 – Мост в предместье Парижа.

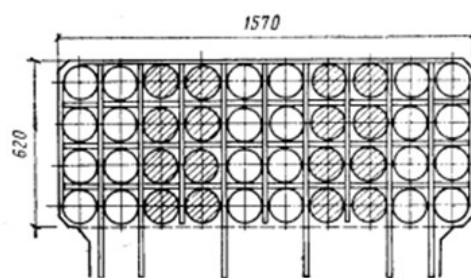
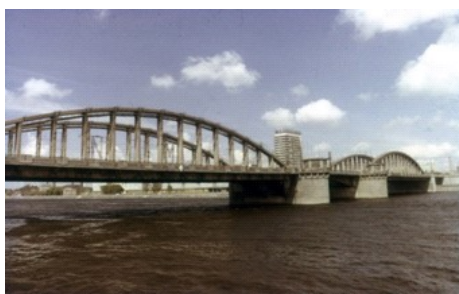


Рисунок 2 – Володарский мост через Неву, поперечное сечение арки.



Рисунок 3 – Сегмент арочной фермы.

относится к строительству и может быть использовано в качестве несущих балок для промышленности в зданиях и сооружениях. Цель изобретения – повышение несущей способности путем улучшения статической работы с использованием арочного эффекта сжатия.

Несущая балка состоит из двутаврового профиля. Между поясами на стенке с двух сторон балки выполнены две симметричные полости арки коробчатого профиля, жестко присоединенные к стенке, причем арка в верхней части соединена с верхней полкой показанной на рис. 6 разрез А-А, а основаниями примыкает к нижнему поясу над опорами рис. 5. Полости в арках заполнены высокопрочным бетоном, а в стенке профиля, по контуру смежных арок с необходимым шагом выполнены отверстия, образующие после бетонирования бетонные шпонки.

Предлагаемая конструкция балки демонстрирует более рациональное использование материалов в статическом режиме. В отличие от традиционных балок, где несущая способность металла используется не полностью, а максимальные изгибающие моменты и нормальные напряжения возникают в середине пролета, данная конструкция использует принцип арочного эффекта. Бетон воспринимает часть сжимающих напряжений, передавая распорные усилия на опоры, что приводит к уменьшению прогиба и увеличению несущей способности. Применение высокопрочного бетона для восприятия сжимающих усилий позволяет достичь экономии металла до 10 % по сравнению с цельнометаллическими балками [4].

Битрубобетонная балка, предложенная В. В. Хариным и Д. Н. Парышевым, представляет

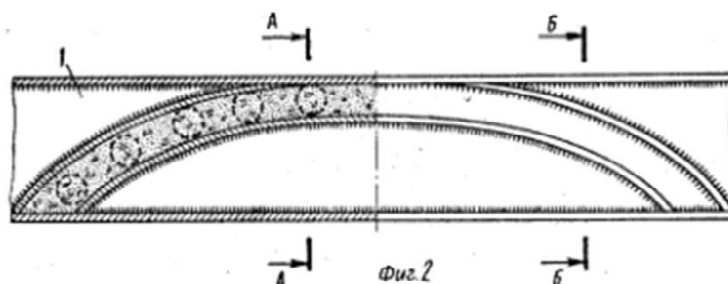


Рисунок 4 – Главный вид с дугообразным бетонным ядром.

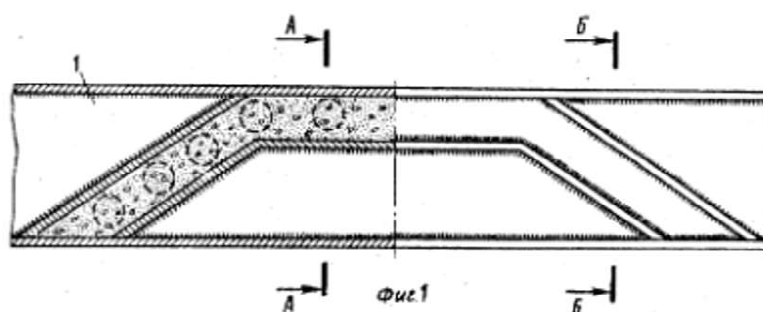


Рисунок 5 – Главный вид с трапецевидным бетонным ядром.

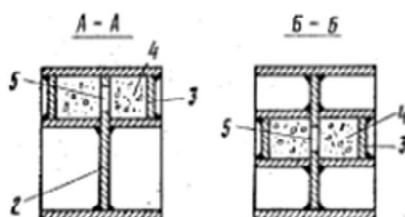


Рисунок 6 – Разрез А-А; разрез Б-Б.

балку, составленную из двух трубобетонных элементов (труба, заполненная бетоном), которые прочно соединены между собой решеткой или стенкой. Отличительной особенностью является предварительное напряжение нижнего бетонного ядра с помощью арматуры или арматурного троса до достижения допустимого уровня сжатия бетона. Внутри балки, по всей длине нижнего бетонного ядра, располагается опорная пластина, плотно прилегающая к его нижней поверхности и приваренная к внутренней поверхности балки. Изобретение относится к области строительства, а именно к предварительно напряженным элементам пролетных строений малых и средних мостов, а также к строительным конструкционным элементам общего назначения. **Цель изобретения** заключается в обеспе-

чении повышения несущей способности балки.

Технический результат достигается реализацией следующих основных признаков изобретения, изображённом на рис. 7: битрубобетонная балка (БТБ), содержащая металлическую оболочку в виде трубы и бетонное ядро с армирующими элементами, отличающаяся тем, что она разделена на две трубобетонные части, соединенные жестко между собой решеткой или стенкой. Кроме этого:

- нижнее бетонное ядро преднапряжено арматурой или арматурным тросом до допустимого предела сжатия бетона;
- одно бетонные ядро или оба бетонных ядра армированы металлической или неметаллической фиброй;

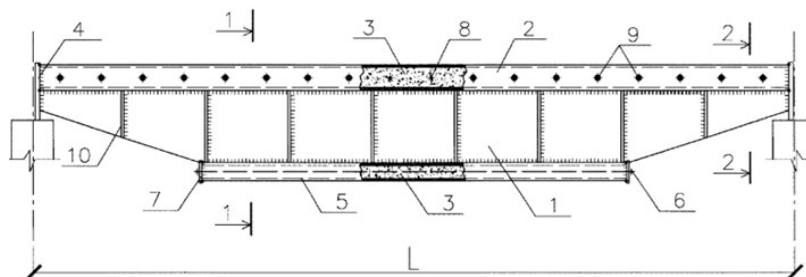


Рисунок 7 – Битрубетонная балка.

- трубы выполнены разного диаметра и (или) переменного сечения по длине;
- трубы соединены швеллером.

Преимущества БТБ при одинаковой допустимой транспортной нагрузке и равной длине балок заключаются в том, что балка БТБ будет иметь вес не меньше чем в 5,8 раз в сравнении с однострунной трубобетонной балкой [5].

Предварительно напряженная сталебетонная балка, предложенная Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения им. Императора Александра I». Изобретение относится к строительным конструкциям, а именно к балкам перекрытий, покрытий, мостовых сооружений и подкрановых конструкций, преимущественно с пролетом от 12 м. Целью изобретения является снижение металлоёмкости балки.

Бетонирование верхнего пояса увеличивает его прочность при изгибе. Герметичное заключение бетона в стальную трубу и опорные диафрагмы обеспечивает ему высокую прочность и отсутствие усадки. Поперечные ребра жесткости, стабилизируют стенку, а также поддерживают верхний пояс, повышая его устойчивость к кручению. Бетонирование нижнего пояса повышает его прочность на этапе предварительного натяжения арматуры и снижает его податливость. Предварительное напряжение арматуры в нижнем поясе позволяет контролировать напряжения изгиба в балке. В совокупности, эти конструктивные решения позволяют снизить расход стали и материалоемкость предварительно напряженной сталебетонной балки.

Следует отметить, что на данный момент практически нет работ, исследующих достоверность

методик расчета подкрановых балок, выполненных с применением трубобетона [6].

Цель исследований

Целью исследований является НДС подкрановой балки с трубобетонным верхним поясом пролётом 12 метров при её работе без тормозной конструкции.

Основной материал исследования

В качестве исследуемой модели рассмотрена подкрановая балка с трубобетонным верхним поясом пролётом 12 метров по требованиям [1; 2; 9] и инженерным методикам расчета сжатых трубобетонных элементов [3; 7; 8]. Нагрузки, действующие на балку, приняты для крана грузоподъемностью $Q = 32$ т со схемой, изображенной на рис. 10 при среднем режиме работы для пролёта 16,5 метров. Балка выполнена из стали С255 и бетона класса В40.

Согласно методике расчета по линиям влияния, изображенных на рис. 11–12, определены максимальные значения изгибающего момента и поперечной силы, действующие на балку.

Для действующих нагрузок были подобраны сечения трубобетонной балки, указанной на рис. 13–14 и двутавровой составного сечения из листовой стали, изображенной на рис. 15.

Для балок двух типов дополнительно выполнялся расчет стенки в зоне примыкания верхнему поясу на кручение согласно требованиям СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции».

Моделирование расчетной схемы и расчет ТББ производился в ПК «ЛИРА 2016 R5». Расчетная схема состоит из 55 486 узлов и 98 298 элементов. В расчетную модель вводился

крановый рельс КР-70. Модель ТББ приведена на рис. 17–20.

Расчет выполнялся МКЭ в линейной постановке, при упругой работе стали и бетона, с разбиением на узлы и элементы при помощи сетки с основным шагом по длине 100 мм и вспомогательным 50 мм. Используемые типы КЭ линейного расчета приведены в таблице 1.

Результаты линейного расчета представлены в виде изополей распределения вертикальных и

горизонтальных прогибов от нормативных нагрузок (рис. 21, 22), изополей нормальных, касательных и локальных напряжений в стали и бетоне от расчетных нагрузок, представленных на рис. 23–29. Изополя приведенных/эквивалентных напряжений по IV-й теории прочности приведены на рис. 30.

Физически нелинейный расчет

Физически нелинейный расчет выполнялся с использованием ПК Лири-САПР 2021. Используемые

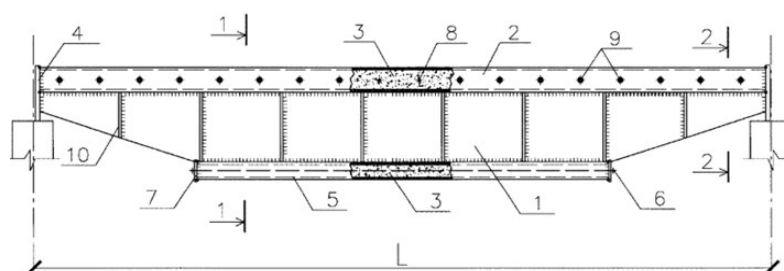


Рисунок 8 – Главный вид предварительно напряженной ТББ.

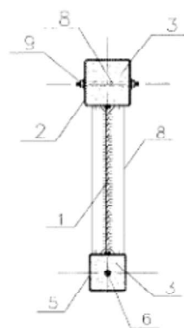


Рисунок 9 – Поперечное сечение ТББ (1-1). Предварительно напряженная сталебетонная балка, изображенная на рисунках 8–9, включает такие элементы как: 1 – стенка из листовой стали; 2 – верхний пояс из стальной трубы; 3 – бетонное ядро; 4 – опорные диафрагмы из листовой стали; 5 – нижний пояс из стальной трубы; 6 – преднапряженный стержень; 7 – заглушки; 8 – стяжные шпильки; 9 – гайка; 10 – поперечные ребра жесткости 10 из листовой стали.

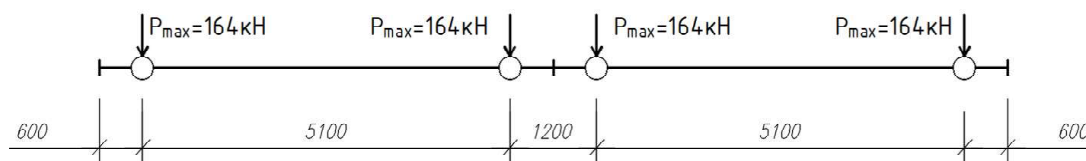


Рисунок 10 – Схема крана грузоподъемностью $Q = 32$ т.

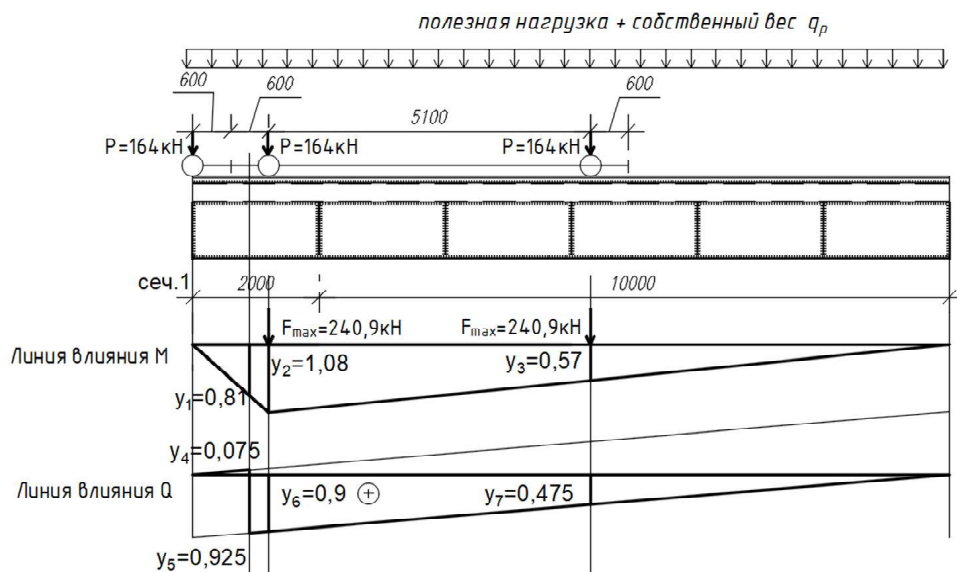


Рисунок 11 – Расположение колес крана на опоре подкрановой балки.

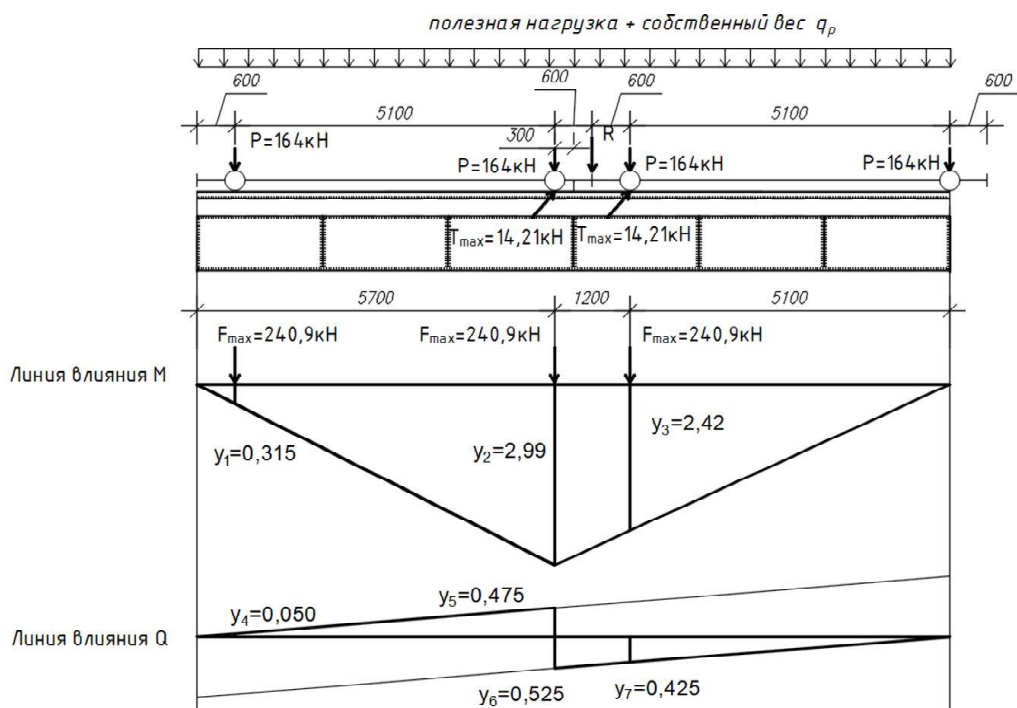


Рисунок 12 – Расположение колес крана в середине пролета по правилу Винклера.

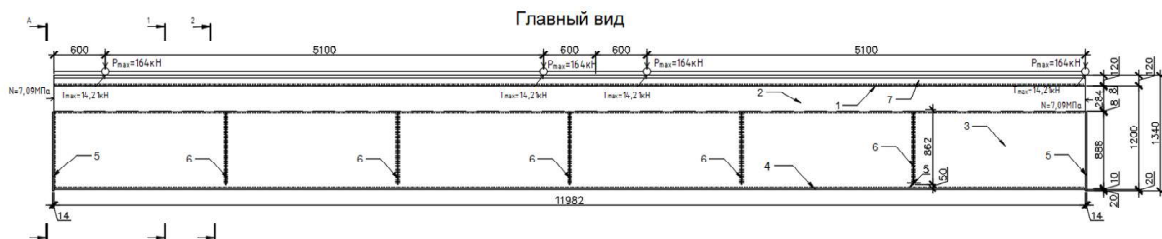


Рисунок 13 – Главный вид балки.

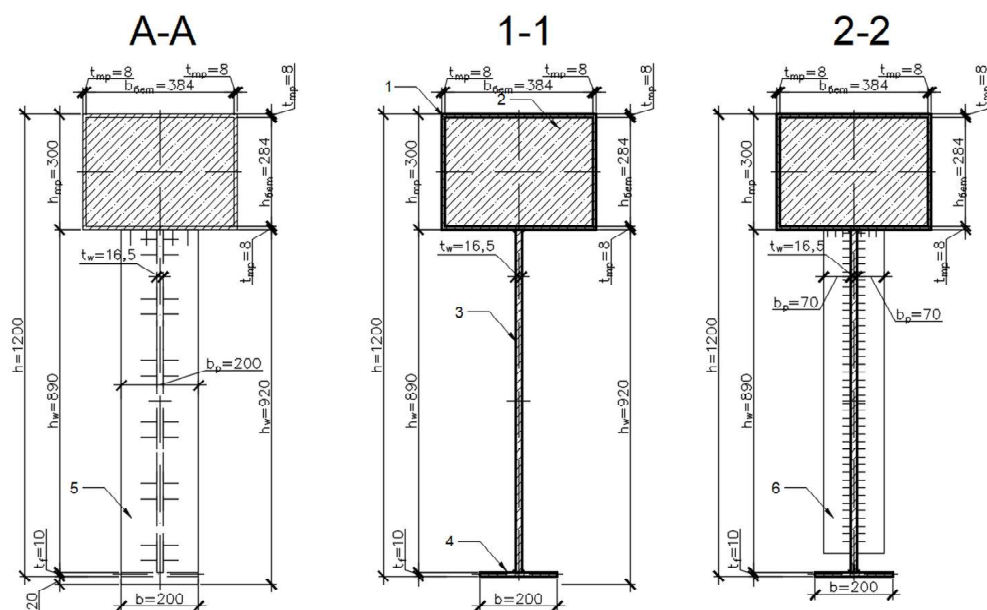


Рисунок 14 – Поперечные сечения ТББ: А-А – вид на торец балки; 1-1 – сечение в приопорном участке; 2-2 – сечение вблизи ребра жесткости. Наименование позиций: 1) профиль замкнутый прямоугольный; 2) бетонное ядро; 3) стенка подкрановой балки; 4) нижняя полка балки; 5) опорное ребро; 6) ребро жесткости; 7) рельс.

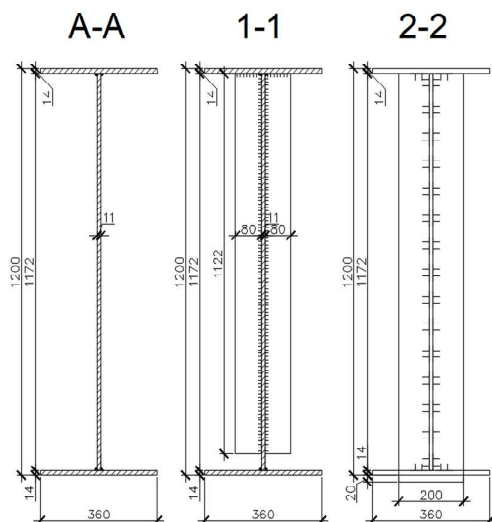


Рисунок 15 – Поперечные сечения балки двутаврового составного сечения: А-А – вид на торец балки; 1-1 – сечение в приопорном участке; 2-2 – сечение вблизи ребра жесткости.

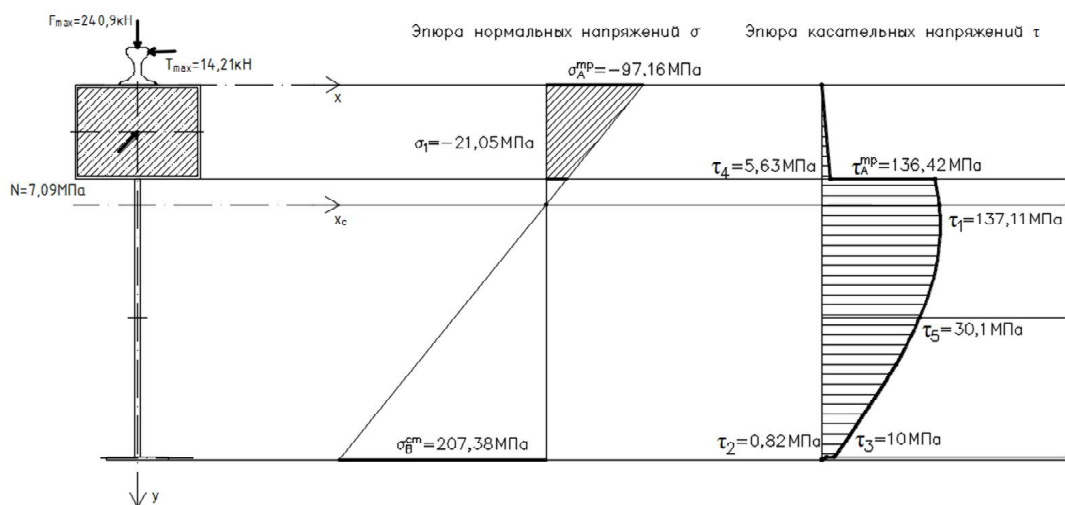


Рисунок 16 – Эпюры распределения нормальных и касательных напряжений в ТББ.

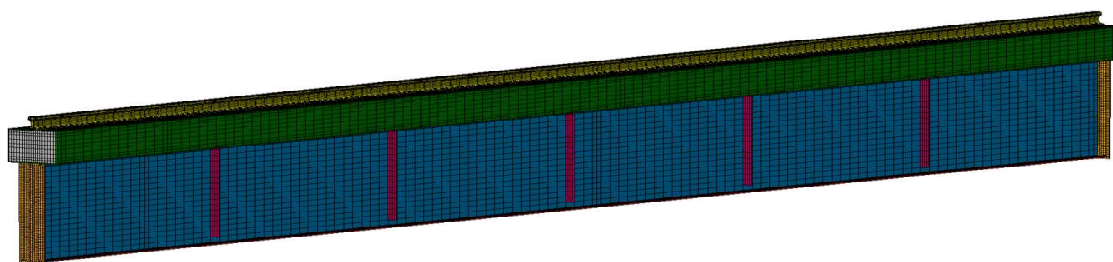


Рисунок 17 – Фрагмент пространственного вида.

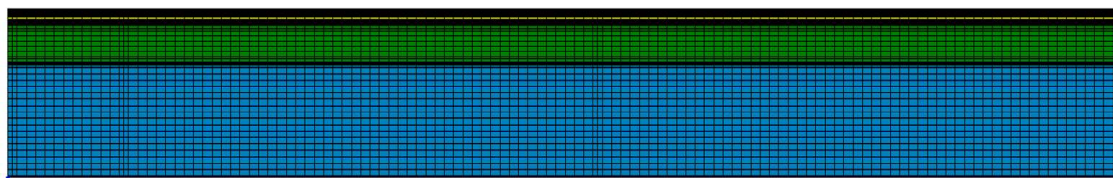


Рисунок 18 – Пространственная КЭ модель, боковой вид.



Рисунок 19 – Пространственная КЭ модель вид снизу.

типы КЭ приведены в таблице 2, изополя распределения напряжений от расчетных нагрузок изображены на рис. 32–38. Для стали и бе-

тона принимались двухлинейные диаграммы деформирования материала Прандтля, изображенные на рис. 31. Предельная относительная

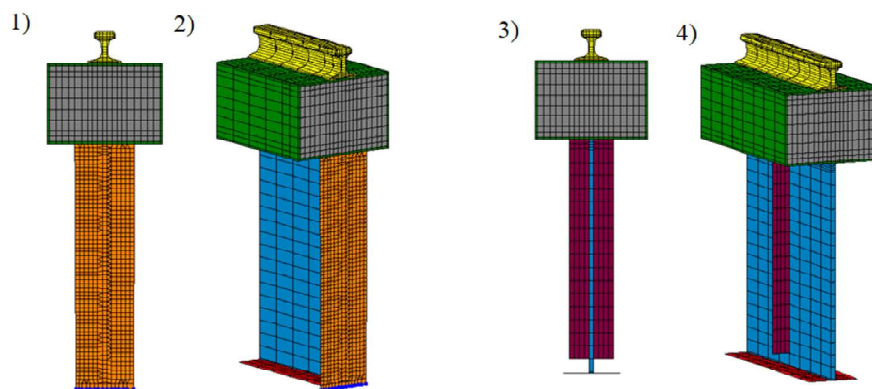


Рисунок 20 – Виды на поперечные сечения модели ТББ: 1) вид на торец балки; 2) пространственная КЭ модель фрагмента с опорным ребром; 3) вид на балку в разрезе; 4) пространственная КЭ модель фрагмента с ребром жесткости.

Таблица 1. Типы конечных элементов, применяемых в расчетной численной модели. Линейный расчет

№ типа жесткости в расчетной модели моста	Геометрические параметры, $H \times B \times t$; H; см	Описание конечного элемента (КЭ)	Положение в конструктивной схеме подкрановой балки
1	Пластиновый КЭ толщиной 1 см	Тип 44 – 4-х угольный КЭ оболочки. Тип 42 – 3-х угольный КЭ оболочки.	Нижняя полка
2	Объемный КЭ толщиной 1,65 см	36 – универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ	Стенка
3	Объемный КЭ с размерами 28,4×38,4 см	36 – универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ	Бетонное ядро класс бетона В40
4	Пластиновый КЭ толщиной 1,4 см	Тип 44 – 4-х угольный КЭ оболочки. Тип 42 – 3-х угольный КЭ оболочки.	Опорное ребро
5	Пластиновый КЭ толщиной 0,5 см	Тип 44 – 4-х угольный КЭ оболочки. Тип 42 – 3-х угольный КЭ оболочки.	Ребро жесткости
6	Объемный КЭ с размерами 30×40×0,8 см	36 – универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ	Гнутосварной замкнутый профиль, верхняя полка балки
7	Объемный КЭ	36 – универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ. 34 – универсальный пространственный шестиузловой изопараметрический КЭ	Рельс КР70

деформация бетона при сжатии принята равной $\varepsilon_b = 0,002$, наибольшее расчетное сопротивление бетона принято для условий трехосного НДС бетона в трубе при сжатии $R_b^* = 38,75$ МПа.

По результатам расчета выполнено сравнение значений параметров НДС для аналитического и численного расчетов в линейной и физически нелинейной постановке. Сравнение результатов расчета приведено в таблице 3.

Сравнение аналитического и численного методов расчёта показывает, что:

- в нижней полке балки расхождение в нормальных напряжениях составляет 3,57 %;
- в стенке балки расхождение в нормальных напряжениях составляет 10,31 %, локальных напряжений 29,23 %, касательных напряжений

10,4 %, приведенных (эквивалентных) напряжений 5,52 %;

- в стальной поясной трубе расхождение в нормальных напряжениях составляет 6,01 %, локальных напряжений 50,23 %;
- в бетонном ядре запас несущей способности по нормальным напряжениям составляет 67,48 %, по локальным напряжениям 56,9 %;
- отклонение вертикального прогиба от аналитического расчета составляет 11,8 %, горизонтального прогиба 50,70 %.

Выводы

1. Полученные значения нормальных, касательных, локальных и приведенных напряжений

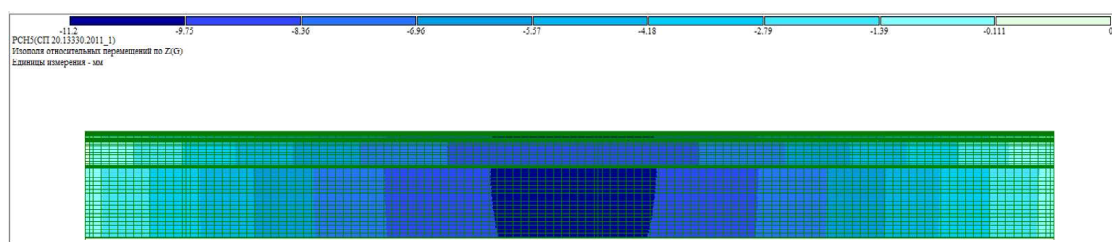


Рисунок 21 – Изополя распределения вертикальных прогибов от нормативных нагрузок.

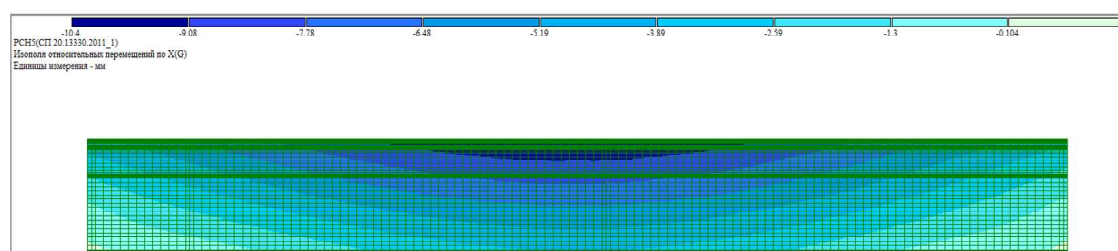


Рисунок 22 – Изополя распределения горизонтальных прогибов балки от нормативных нагрузок.

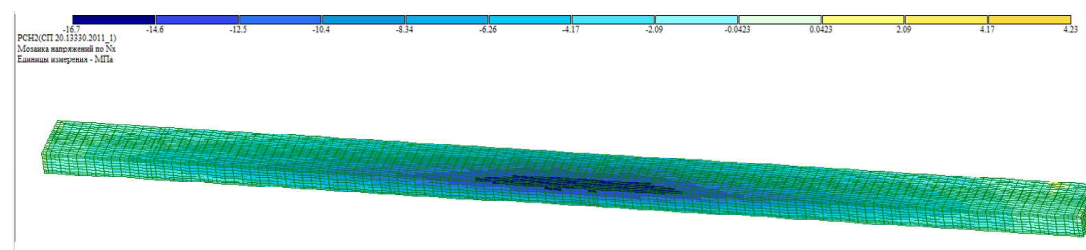


Рисунок 23 – Изополя распределения нормальных напряжений σ_{max} в бетонном ядре верхней полки балки.

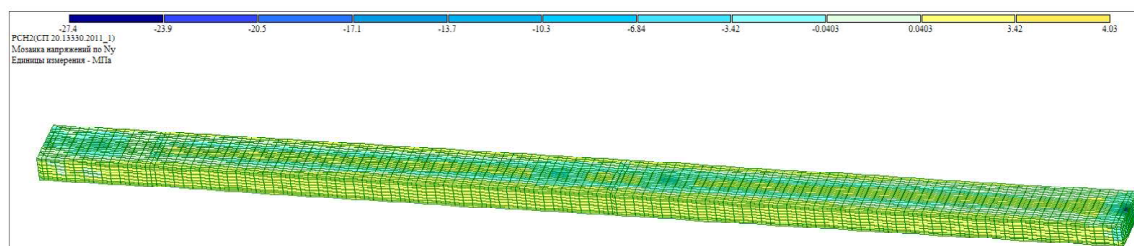


Рисунок 24 – Изополя распределения локальных напряжений σ_{loc} в бетоне верхней полки балки.

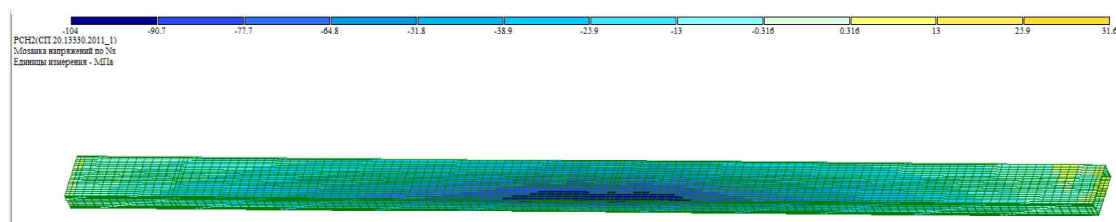


Рисунок 25 – Изополя распределения нормальных напряжений σ_{max} в трубе.

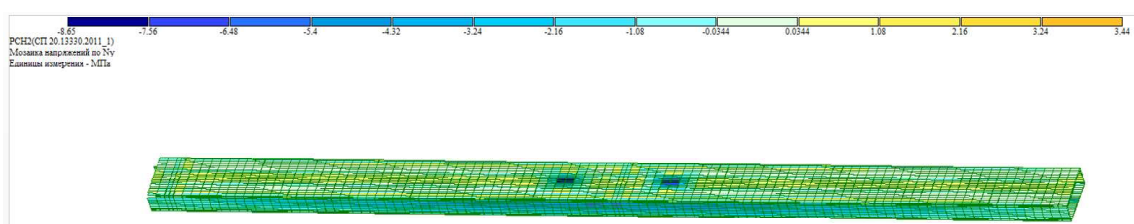
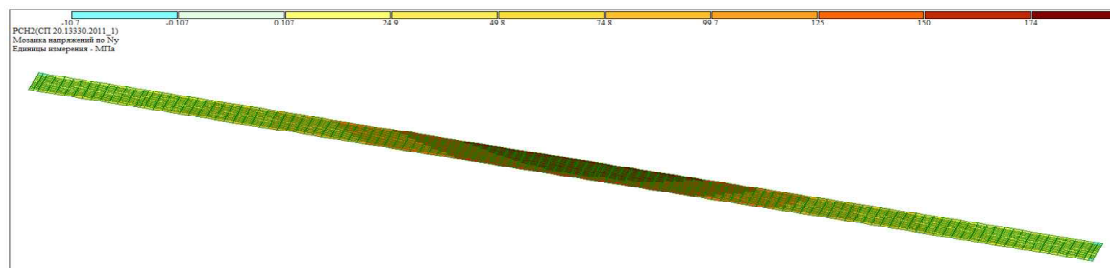


Рисунок 26 – Изополя распределения нормальных напряжений σ_{loc} в трубе.



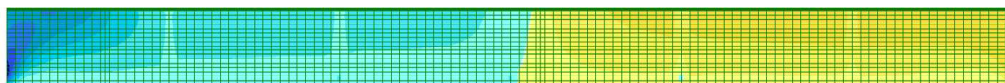


Рисунок 29 – Изополюс распределения касательных напряжений τ_{max} в стенке балки при расположении крана на опоре.

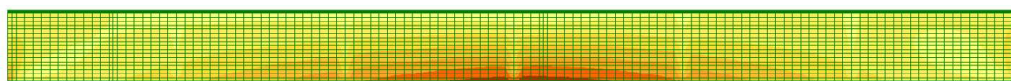


Рисунок 30 – Изополюс распределения эквивалентных напряжений σ_d^{IV} в стенке подкрановой балки.

Таблица 2. Типы конечных элементов, применяемых для физически нелинейного расчета

№ типа жесткости в расчетной модели моста	Геометрические параметры, Н×В×t; Н; см	Описание конечного элемента (КЭ)	Положение в конструктивной схеме подкрановой балки
1	Пластина КЭ толщиной 1 см	Тип 244 – физически нелинейный универсальный четырехугольный элемент оболочки. Тип 242 – физически нелинейный универсальный треугольный КЭ оболочки.	Нижняя полка
2	Объемный КЭ толщиной 1,65 см	236 – физически нелинейный универсальный пространственный 8-узловой изопараметрический КЭ.	Стенка
3	Объемный КЭ с размерами 28,4×38,4 см	236 – физически нелинейный универсальный пространственный 8-узловой изопараметрический КЭ.	Бетонное ядро класс бетона В40
4	Пластина КЭ толщиной 1,4 см	Тип 244 – физически нелинейный универсальный четырехугольный элемент оболочки. Тип 242 – физически нелинейный универсальный треугольный КЭ оболочки.	Опорное ребро
5	Пластина КЭ толщиной 0,5 см	Тип 244 – физически нелинейный универсальный четырехугольный элемент оболочки. Тип 242 – физически нелинейный универсальный треугольный КЭ оболочки.	Ребро жесткости
6	Объемный КЭ с размерами 30×40×0,8 см	236 – физически нелинейный универсальный пространственный 8-узловой изопараметрический КЭ.	Профиль прямоугольный замкнутый, верхняя полка балки
7	Объемный КЭ	236 – физически нелинейный универсальный пространственный 8-узловой изопараметрический КЭ. 234 – физически нелинейный универсальный пространственный 6-узловой изопараметрический КЭ.	Рельс КР70

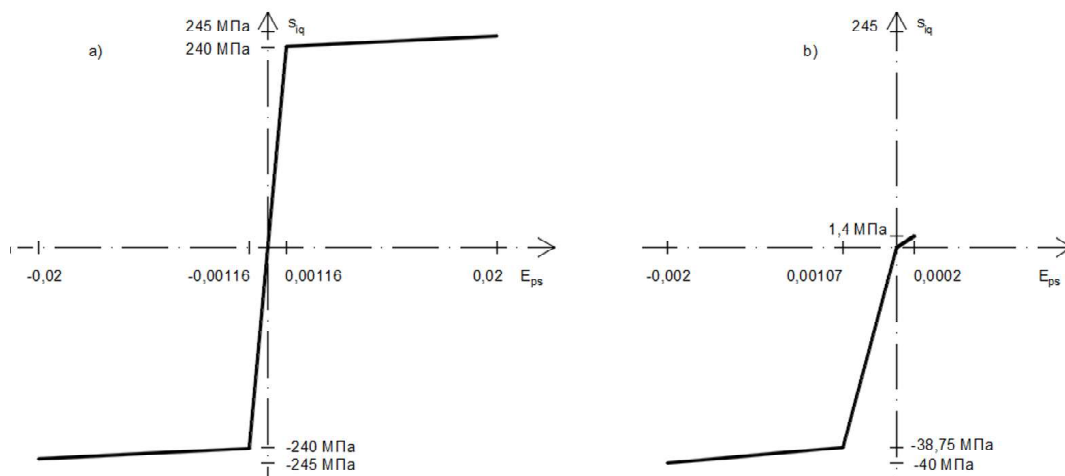


Рисунок 31 – Двухлинейные диаграммы деформирования Прандтля: а) для стального сечения; б) для бетонного ядра при $R_b^* = 38,75$ МПа.

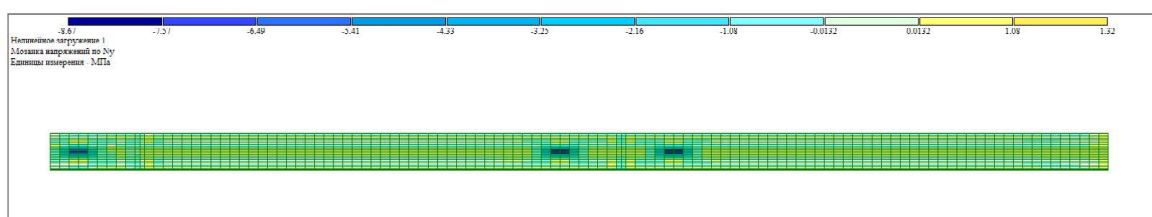


Рисунок 32 – Изополя распределения локальных напряжений σ_{loc} в стальной трубе.

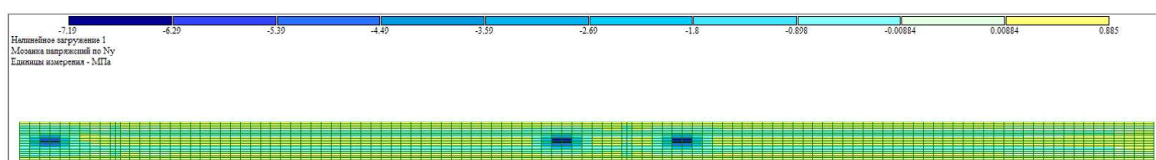


Рисунок 33 – Изополя распределения локальных напряжений σ_{loc} в бетонном ядре.

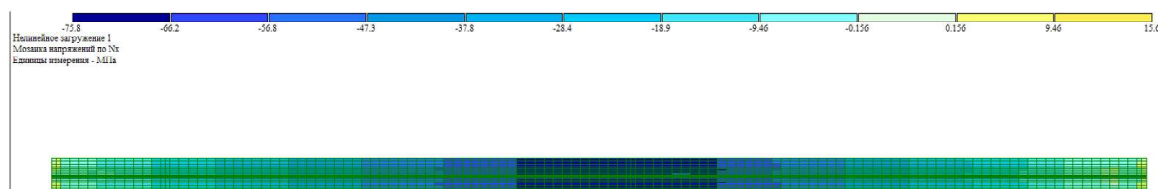
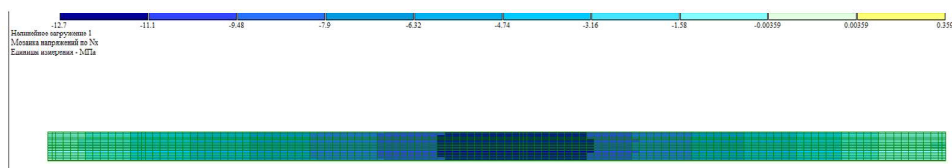
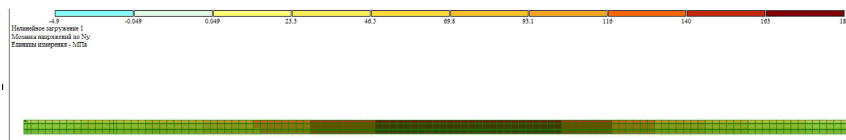
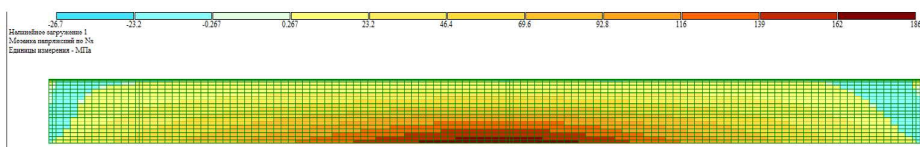


Рисунок 34 – Изополя распределения нормальных напряжений σ_{max} в стальной трубе.

не превышают расчетных сопротивлений материалов. Полученные значения вертикальных и горизонтальных прогибов не превышают предельно допустимых прогибов. Таким

образом, эксплуатация разрезных подкрановых балок с трубобетонным верхним поясом возможна без устройства тормозной конструкции;

Рисунок 35 – Изополя распределения нормальных напряжений σ_{max} в бетоне.Рисунок 36 – Изополя распределения нормальных напряжений σ_{max} в нижней полке.Рисунок 37 – Изополя распределения нормальных напряжений σ_{max} в стенке.Рисунок 38 – Изополя распределения локальных напряжений σ_{loc} в стенке.

2. Сравнение затрат по количеству и цене материала для 2-х типов подкрановых балок показывает, что расход стали для трубобетонной балки на 15 % меньше, чем для сварной подкрановой балки, а её цена снижается на 21 %. Следует отметить, что масса трубобетонной балки возрастает на 44 %.
3. На основании полученных данных рассмотрены преимущества эксплуатации данных типов ТББ:
 - **высокая прочность** – ТББ обладают высокой несущей способностью с минимальным запасом 13,45 %;
 - **экономия материала** – расчеты подтверждают возможность снижения затрат стали на 15 % вследствие эксплуатации подкрановой

балки без устройства тормозной конструкции;

- **снижение денежных затрат** – расчет показывает, что стоимость материалов для ТББ на 21 % меньше по сравнению с традиционной балкой двутаврового сечения, при этом, стоимость подкрановой ТББ ориентировочно составляет 206 тыс. руб., а стоимость двутавровой сварной подкрановой балки 262 тыс. руб.;
- **устойчивость к деформациям** – ТББ обеспечивают более высокую жесткость, что минимизирует возможные деформации под нагрузкой, запас несущей способности для вертикального прогиба ТББ составляет 62,33 %, в то время как сварная двутавровая балка имеет запас несущей способности 52,5 %.

Таблица 3. Сравнение результатов расчета

Элемент (конструкция) расчетной модели	Значения напряжений МПа, перемещений мм	Значения напряжений (пропорционального) расчета МПа, перемещений мм	Значения напряжений нелинейного расчета при сопротивлении бетона $R_b = 22$ МПа	Значения напряжений нелинейного расчета при сопротивлении бетона $R_b = 38,75$ МПа	Отклонение значений аналитического и численного Δ , %	Отклонение значений аналитического и нелинейного расчетов при $R_b = 22$ МПа, Δ , %	Отклонение значений аналитического и нелинейного расчетов при $R_b = 38,75$ МПа, Δ , %	Запас несущей способности. Аналитический	Запас несущей способности. Численный	Запас несущей способности. Нелинейный, при $R_b = 22$ МПа	Запас несущей способности. Нелинейный при $R_b = 38,75$ МПа
Балка	Вертикальный прогиб $f_z = 12,7$ мм	Вертикальный прогиб $f_z = 11,2$ мм	Вертикальный прогиб $f_z = 9,47$ мм	-	-11,8 %	-25,43 %	-	57,67 %	62,67 %	68,43 %	-
Нижняя полка	$\sigma_{\max} = 207,4$ МПа	$\sigma_{\max} = 200$ МПа	$\sigma_{\max} = 186$ МПа	$\sigma_{\max} = 186$ МПа	-3,57 %	-10,32 %	-10,32 %	13,58 %	16,67 %	22,50 %	22,50 %
Стенка	$\sigma_{\max} = 207,39$ МПа $\sigma^A_{\text{loc}} = 17,38$ МПа $\tau_{\max} = 137,11$ МПа $\sigma^W_{\text{a}} = 237,1$ МПа	$\sigma_{\max} = 186$ МПа $\sigma^A_{\text{loc}} = 12,3$ МПа $\tau_{\max} = 41,9$ МПа $\sigma^W_{\text{a}} = 224$ МПа	$\sigma_{\max} = 186$ МПа $\sigma^A_{\text{loc}} = 12,3$ МПа - -	$\sigma_{\max} = 186$ МПа $\sigma^A_{\text{loc}} = 12,3$ МПа - -	-10,31 % -29,23 % -69,44 % -5,53 %	-10,31 % -29,23 % - -	-10,31 % -29,23 % - -	13,59 % 92,76 % 1,1 % -	22,50 % 94,88 % 69,78 % -	22,50 % 94,88 % - -	22,50 % 94,88 % - -
Труба	$\sigma_{\max} = 97,16$ МПа $\sigma_{\text{loc}} = 17,38$ МПа	$\sigma_{\max} = 104$ МПа $\sigma_{\text{loc}} = 8,65$ МПа	$\sigma_{\max} = 75,8$ МПа $\sigma_{\text{loc}} = 8,67$ МПа	$\sigma_{\max} = 75,8$ МПа $\sigma_{\text{loc}} = 8,67$ МПа	6,01 % -50,23 %	-21,88 % -50,29 %	-21,88 % -50,29 %	59,52 % 92,76 %	57,08 % 96,40 %	68,38 % 96,40 %	68,38 % 96,40 %
Бетонное ядро	$\sigma_{\text{loc}} = 6,92$ МПа $R_b = 38,75$ МПа	$\sigma_{\text{loc}} = 7,18$ МПа $\sigma_{\max} = 12,6$ МПа	$\sigma_{\text{loc}} = 7,19$ МПа $\sigma_{\max} = 16,7$ МПа	$\sigma_{\text{loc}} = 7,19$ МПа $\sigma_{\max} = 12,7$ МПа	3,76 % -	3,90 % -	3,90 % -	68,55 % -	67,36 % 67,48 %	67,32 % 56,90 %	67,32 % 67,23 %
Балка	Горизонтальный прогиб $f_x = 7,1$ мм	Горизонтальный прогиб $f_x = 10,4$ мм	Горизонтальный прогиб $f_x = 10,7$ мм	-	46,5 %	50,70 %	50,70 %	40,83 %	13,33 %	10,83 %	-

Список источников

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (с Изменениями № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6). Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 06.04.2025).
2. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции (с Изменениями № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6). Актуализированная редакция СНиП II-23-81* [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456069588> (дата обращения 06.04.2025).
3. Кикин А. И., Санжаровский Р. С., Труль В. А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. М.: Стройиздат, 1974. 144 с.
4. Несущая балка: пат. на изобретение 937663 СССР. N 3005419 / А. Н. Тетиор, В. И. Редькин, В. А. Митрофанов; заявл. 20.11.1980; опубл. 23.06.1982, Бюл. N 23. 3 с.
5. Битрубобетонная балка: пат. на изобретение 2739271 Рос. Федерация. N 2019130450 / Д. Парышев [и др.]; заявл. 25.09.2019; опубл. 22.12.2020, Бюл. N 36. 8 с.
6. Предварительно напряженная сталебетонная балка: пат. на изобретение 2675002 Рос. Федерация. N 2018106568 / В. В. Веселов, Т. Д. Абатурова, М. В. Копачева; заявл. 21.02.2018.; опубл. 14.12.2018, Бюл. N 35. 8 с.
7. Лихтарников Я. М., Ладыженский Д. В., Клыков В. М. Расчет стальных конструкций: справ. пособие. К.: Будівельник, 1984. 368 с.
8. Металлические конструкции / Е. И. Беленя [и др.]. М.: Стройиздат, 1982. 471 с.
9. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения СНиП 52-01-2003 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. 2025. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения 06.04.2025).
10. Veyrier M. Le pont des Ibis, au Vésinet // Bulletin officiel de la Direction des recherches scientifiques et industrielles et des inventions. 1930. Issue 193. URL: <https://histoire-vesinet.org/pontdesibis1930.htm> (дата обращения 06.04.2025).
11. EN 1994-2:2005. Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Part 2: General rules and rules for bridges. Brussels: CEN, 2005. 93 p. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.2.2005.pdf> (дата обращения: 06.04.2025).
12. 钢哲混凝土组合梁:发明专利101298788,中华人民共和国N 200710068426/马小杰,杜时贵,徐汉勇,王晓翠;声明30.04.2007;已出版05.11.2008,8页. (Сталебетонная композитная балка: пат. на изобретение 101298788 Китайская Народная Республика. N 200710068426 / Сяоцзе Ма, Шигуй

References

1. Electronic fund of legal and regulatory documents (2016), *SP 20.13330.2016: Nagruzki i vozdejstviya* [SP 20.13330.2016: Loads and actions], available at: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (Accessed 06 April 2025).
2. Electronic fund of legal and regulatory documents (2017), *SP 16.13330.2017: Stal'nye konstrukcii* [SP 16.13330.2017: Steel structures], available at: <https://docs.cntd.ru/document/456069588> (Accessed 06 April 2025).
3. Kikin, A.I., Sanzharovsky, R.S. and Trull, V.A. (1974), *Konstrukcii iz stal'nyh trub, zapolnennykh betonom* [Structures made of steel pipes filled with concrete], Stroyizdat, Moscow, Russia.
4. Tetior, A.N., Redkin, V.I. and Mitrofanov, V.A., Simferopol branch of the Sevastopol Instrument-making Institute (1980), *Nesushchaya balka* [Load-bearing beam], Federal Service for Intellectual Property, Sevastopol, USSR, Pat. 937663.
5. Paryshev, D.N., Iltyakov, A.V., Kopyrin, V.I., Moiseev, O.Yu., Agafonov, Yu.A., Ovchinnikov, I.G., Sherenkov, V.M., Ovchinnikov, I.I., Kharin, V.V., Kharin, D.A., Voronkin, V.A. and Popov, I.P., Kharin Valery Vasilievich, Paryshev Dmitry Nikolaevich (2020), *Bitrubobetonnaya balka* [Bituminous concrete beam], Federal Service for Intellectual Property, Kurgan, RU, Pat. 2739271.
6. Veselov, V.V., Abaturova, T.D., Kopacheva, M.V., Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University" (2018), *Predvaritel'no napryazhennaya stalebetonnaya balka* [Prestressed concrete beam], Federal Service for Intellectual Property, Saint Petersburg, RU, Pat. 2675002.
7. Likhtarnikov, Ya.M., Ladyzhensky, D.V. and Klykov, V.M. (1984), *Raschet stal'nyh konstrukcij* [Calculation of steel structures]: reference manual, Budivelnik, Kiev, Ukraine.
8. Belenya, E.I., Streletsky, N.N., Vedernikov, G.S., Klepikov, L.V. and Morachevsky, T.N. (1982), *Metallicheskie konstrukcii* [Metal structures]: Stroiizdat, Moscow, Russia.
9. Electronic fund of legal and regulatory documents (2018), *SP 63.13330.2018: Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii* [SP 63.13330.2018: Concrete and reinforced concrete structures], available at: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (Accessed 06 April 2025).
10. Veyrier, M. (1930), "Le pont des Ibis, au Vésinet", *Bulletin officiel de la Direction des recherches scientifiques et industrielles et des inventions*, issue 193, available at: <https://histoire-vesinet.org/pontdesibis-1930.htm> (Accessed 06 April 2025).
11. European Standard (2005), *EN 1994-2:2005: Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures. Part 2: General rules and rules for bridges*. CEN, Brussels, BE, available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.2.2005.pdf> (Accessed 06 April 2025).

- Ду, Ханьюн Сюй, Сяоцуй Ван; заявл. 30.04.2007; опубл. 05.11.2008, 8 с.)
13. Ghannam S. Flexural Strength of Concrete-Filled Steel Tubular Beam with Partial of Coarse Aggregate by Granite // *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. 2016. Vol. 7, issue 5. P. 161-168. ISSN 0976-6316.
 14. GB 50017-2017. Standard for design of steel structures. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC, 2017. 386 p.
 15. CAN/CSA-S16-01. Limit States Design of Steel Structures. Toronto: Canadian Standards Association, 2001. 162 p. URL: <https://sciarium.com/file/227426/> (дата обращения: 06.04.2025).
 16. ABNT NBR 8800:2008. Design of steel structures and mixed steel and concrete structures of buildings. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 247 p.
 12. 馬小傑, 杜世貴, 徐漢勇, 王小翠, 浙江省土木工程學會 (2005), 鋼筋混凝土組合梁, 中華人民共和國國家智慧財產局, 杭州, SN, 專利號 101298788. (Ma, Xiaojie, Du, Shigui, Xu, Hanyong, Wang, Xiaocui, Zhejiang Civil Engineering Institute (2005), *Stalebetonnaya kompozitnaya balka* [Reinforced concrete composite beam], State Intellectual Property Office of the People's Republic of China, Hangzhou, SN, Pat. 101298788.)
 13. Ghannam, S. (2016), "Flexural Strength of Concrete-Filled Steel Tubular Beam with Partial of Coarse Aggregate by Granite", *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, vol. 7, issue 5, pp. 161-168. ISSN 0976-6316.
 14. National Standard of the people's republic of China (2017), *GB 50017-2017: Standard for design of steel structures*. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of PRC, Beijing, CN.
 15. Canadian standards association (2001), *CAN/CSA-S16-01: Limit States Design of Steel Structures*. Canadian Standards Association, Toronto, CA, available at: <https://sciarium.com/file/227426/> (Accessed 06 April 2025).
 16. Brazilian Association of Technical Standards (2008), *ABNT NBR 8800:2008: Design of steel structures and mixed steel and concrete structures of buildings*. ABNT, Rio de Janeiro, BR.

Информация об авторах

Руденко Виталий Васильевич – магистрант 2-го курса обучения кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: напряженно-деформированное состояние стальных и трубобетонных конструкций, испытывающих изгиб.

Миронов Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: усталостная прочность металлических конструкций, концентрация напряжений в узлах ферм с применением широкополочных двутавров и гнутосварных замкнутых профилей, напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций в том числе трубобетонных конструкций.

Оленич Елена Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: сравнение методик расчета высотных сооружений, расчет и проектирование зданий и сооружений, оценка состояния существующих конструкций, усиление конструкций.

Бутова Алла Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования зданий и строительной физики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: развитие методик оценки ветровых воздействий на здания, сооружения и их комплексы, совершенствование методик моделирования пограничного слоя атмосферы, натурных и модельных испытаний зданий и сооружений на ветровое давление.

Information about the authors

Rudenko Vitaly V. – master's student of the Department of Metal Structures Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: stress-strain state of steel and tubular concrete structures during bending.

Mironov Andrey N. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Metal Constructions and Structures, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: fatigue strength of metal structures, concentration of stresses in the nodes of trusses with the use of wide-band I-bars and gnutosvarnyh closed profiles, stress-strain state of steel reinforced concrete structures including pipe-concrete structures.

Olenich Elena N. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of Metal Structure and Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: chimneys, comparison of methods of calculation of chimneys, calculation and designing of chimneys, estimation of a condition of existing designs, strengthening of structures.

Butova Alla P. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Building Design and Structural Physics, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: development of methods for assessing wind impact on buildings, structures and their complexes, improvement of methods for modeling the atmospheric boundary layer, full-scale and model tests of buildings and structures for wind load.

Вклад авторов:

Руденко В. В. – аналитический расчет; разработка конечно-элементной модели объекта исследований и численный расчет; итоговые выводы по результатам исследований.

Миронов А. Н. – научное руководство; постановка целей и задач исследований; численный расчет конечно-элементной модели; итоговые выводы по результатам исследований; доработка текста.

Оленич Е. Н. – анализ последних исследований и публикаций; патентный поиск; численный расчет конечно-элементной модели.

Бутова А. П. – обработка и сравнение результатов численного расчета; написание текста; создание и редактирование рисунков.

Contribution of the authors:

Rudenko V. V. – analytical calculation; development of a finite element model of the research object and numerical calculation; final conclusions based on the research results.

Mironov A. N. – scientific guidance; setting goals and objectives of research; numerical calculation of the finite element model; final conclusions based on research results; revision of the text.

Olenich E. N. – analysis of recent research and publications; patent search; numerical calculation of a finite element model.

Butova A. P. – processing and comparing the results of numerical calculations; writing text; creating and editing drawings.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.04.2025; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 23.05.2025.

The article was submitted 21.04.2025; approved after reviewing 16.05.2024; accepted for publication 23.05.2025.