

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный
университет (СибАДИ)»
Кафедра «Мосты и тоннели»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)
«РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ
С РАЗДЕЛЕНИЕМ МАТЕРИАЛА ПО НЕЙТРАЛЬНОЙ ОСИ»

по направлению 08.06.01 «Техника и технологии строительства»

научная направленность: «Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»

Аспирант



Белокопытов Артем Сергеевич

Допустить к защите научного доклада

Заведующий кафедрой «Мосты и тоннели»



к.т.н. П.Н. Кобзев

Научный руководитель



д.т.н. проф. В.А. Уткин

Научный консультант



д.т.н. проф. С.А. Матвеев

Нормоконтроль



О.С. Федосовская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Главная идея применения сталежелезобетонных конструкций состоит в выгодном использовании работы бетона на сжатие, соответственно первые сталежелезобетонные пролетные строения автодорожных мостов были только балочно-разрезными с ездой поверху. Однако на рубеже 40-50-х годов в СССР и других странах стали применять неразрезные, шарнирно-консольные и комбинированные сталежелезобетонные пролетные строения, в которых часть железобетонной плиты оказывалась растянутой.

Со второй половины 50-х годов преобладающим средством объединения стали и железобетона в большинстве зарубежных стран оказались гибкие цилиндрические упоры с головками, отличающиеся малой трудоемкостью приварки их сварочным пистолетом. Это обстоятельство послужило одной из многих причин применения за рубежом монолитной плиты, для которой эти упоры наиболее удобны и по сей день.

В нашей стране, с целью сокращения сроков строительства и исключения сезонности производства работ, широко применяли пролетные строения со сборными плитами проезжей части и соответственно жесткие упоры в качестве средства объединения со стальными главными балками. Стремление в 60-х годах к типизации и унификации строительных конструкций привело к созданию типовых проектов сталежелезобетонных пролетных строений мостов со сборными плитами. Большинство сталежелезобетонных конструкций пролетом до 84 м, построенных в прошлом веке, выполнены по типовым проектам. По индивидуальным проектам у нас сооружались автодорожные мосты пролетами более 84 м и широкие городские мосты.

Сталежелезобетонные пролетные строения со сборной плитой, построенные в прошлом столетии, показали свою неэффективность из-за разрушения узла объединения стали и железобетона в процессе эксплуатации, и, как следствие, выключение плиты и совместной работы. Причинами разрушения послужили несовершенство конструкции объединения и некачественное выполнение работ при омоноличивании плит с балками. Большинство таких пролетных строений были реконструированы с заменой сборной железобетонной плиты на ортотропную плиту проезжей части, либо заменены полностью. На фоне сложившейся ситуации, отечественные мостостроители перешли на более надежную конструкцию пролетных строений с монолитной плитой на гибких упорах в качестве средства объединения со стальными балками.

Переход на конструкции с монолитной плитой привел к увеличению сроков и трудоемкости производства работ, а также к необходимости учета сезонности при строительстве и повышению контроля качества работ. Из-за этих недостатков все большее распространение на территории нашей страны получают пролетные строения со стальной ортотропной плитой проезда.

Для дальнейшего развития конструктивных форм сталежелезобетонных пролетных строений необходимо решить следующие задачи: сокращение сроков,

снижение трудоемкости и ликвидация сезонности строительства, а также снижение материалоемкости изготовления пролетного строения.

При проектировании сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов без регулирования усилий, прочностные свойства железобетонной плиты используется не полностью. Железобетон включается в работу после набора прочности для восприятия постоянных и временных нагрузок стадии эксплуатации. Высота железобетонной части ограничена нормами и конструктивными особенностями пролетного строения, а увеличение размеров плиты проезжей части теряет целесообразность ввиду увеличения нагрузок стадии монтажа. Стальная главная балка перегружена весом железобетонной плиты со стадии монтажа, что влияет на ее геометрические характеристики и, как следствие, увеличивает металлоёмкость пролетного строения. Таким образом, для сталежелезобетонных конструкций характерна двухстадийная работа. Решением данной проблемы будет изменение технологии монтажа: регулирование усилий для обеспечения одновременного включения в работу стали и железобетона, что требует разработки дополнительных инженерных сооружений, монтаж пролетного строения сталежелезобетонными блоками или монтаж пролетного строения целиком.

Монтаж сталежелезобетонными блоками заводского изготовления или укрупненного пролетного строения целиком позволяет сократить сроки, исключить сезонность строительства и обеспечивает работу всего сечения в одну стадию. Соединение таких блоков выполняется болтовым стыком в стальной части и сухим стыком в железобетонной части, при условии бетонирования смежных сталежелезобетонных блоков в отпечаток при изготовлении. Таким образом, можно развить высоту железобетонной части на всю зону сжатия поперечного сечения, а сталь будет в зоне растяжения. Граница, разделяющая зоны растяжения и сжатия в поперечных сечениях пролетного строения, называется нейтральная ось. Разделение стали и железобетона по нейтральной оси позволит рационально использовать прочностные свойства материалов и приведет к снижению расхода стали на изготовление пролетного строения.

Таким образом, актуальность темы исследования обоснована необходимостью проектирования пролетного строения, изготовленного из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, в поперечных сечениях которого сталь и железобетон разделены по нейтральной оси поперечного сечения.

Степень разработанности темы исследования.

На территории нашей страны вопросами совершенствования методов расчета сталежелезобетонных пролетных строений занимались Гибшман М.Е., Стрелецкий Н.Н., Потапкин А.А., Корнеев М.М. и другие. Вопросами совершенствования сталежелезобетонных пролетных строений мостов в нашей стране занимались Гибшман М.Е., Стрелецкий Н.Н., Большаков К.П. Уткин В.А. и другие. Вопросами усиления и регулирования усилий сталежелезобетонных пролетных строений занимались Гитман Э.М. и Толмачев Х.Т. и другие. Вопросами оптимизации сталежелезобетонных пролетных строений в СибАДИ под руководством Горынина Л.Г. занимались Илюшенко В.И., Тараданов Е.Л., Шишов О.В. и другие.

В настоящее время известны работы следующих исследователей Овчинников И.Г., Козлов А.В., Козак Н.В., Веселов В.В., Мирсаяпов И.Т., Баблич В.С., Панова А.С., Голованов В.А. и другие.

За рубежом схожие исследования выполняли Ngoc-Long T., Johnson R.P., Hassanin A.I., Henderson I.E.J., Xu C., Xue W., Wang B., Ples D.C., Steven Stroh, Rajan Sen, Niranjana Pai, Purvik Patel, Dennis Golabek и другие.

В своих трудах Стрелецкий Н.Н. «Сталежелезобетонные пролетные строения мостов» упоминает о возможности применения «двухплитных» пролетных строений, где железобетон располагается в зоне плиты проезжей части и в зоне нижнего пояса в сечениях над опорой, что экономит сталь при строительстве пролетного строения. На территории СССР были построены «двухплитные» пролетные строения, усиленные железобетоном по нижнему поясу, но данная конструкция не прижилась.

Группа ученых под руководством Steven Stroh из University of South Florida (США) в 2010 году провели успешные статические и динамические испытания «двухплитного» пролетного строения. Пролетное строение имеет железобетонную плиту проезжей части и стальную главную балку коробчатого сечения. В зонах сжатия нижний пояс усилен железобетоном, а коробка выполняет роль опалубки. Таким образом, они подтвердили рациональность применения железобетона в нижнем поясе в качестве несущего элемента нижнего пояса.

Наиболее эффективным примером совершенствования сталежелезобетонных пролетных строений являются разработки изобретений профессором Уткиным В.А. запатентованные в 1988 г. №SU1823891A3 и 1995 г. №RU2040629C1 под одинаковыми названиями «Сталежелезобетонное пролетное строение». Изобретения описывают конструкции разрезных и неразрезных сталежелезобетонных пролетных строений, выполненных из сталежелезобетонных блоков, с сопряжением стали и железобетона по нейтральной оси поперечного сечения. В зоне положительного изгибающего момента устраивается железобетонная плита проезда и стальной нижний пояс, а в зоне отрицательного изгибающего момента – стальная ортотропная плита проезда и железобетонный нижний пояс.

В 2010 г. профессором Уткиным В.А. была опубликована статья «Регулирование положения нейтральной оси при проектировании сечений сталежелезобетонных пролетных строений» посвященная совершенствованию сталежелезобетонных пролетных и методике подбора предварительных геометрических параметров сечений для разрезных сталежелезобетонных пролетных строений.

В 2019 г. Белокопытовым А.С., профессором Уткиным В.А. и профессором Матвеевым С.А. опубликована статья «The Substantiation of Steel-Reinforced Concrete Composite Bridge Superstructure Design» с результатами аналитического и численного расчета методом конечных элементов разрезного балочного сталежелезобетонного пролетного строения пролетом 42 м, с разделением материалов по нейтральной оси.

В 2024 г. Белокопытовым А.С., профессором Уткиным В.А. и профессором Матвеевым С.А. опубликована статья «Методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста с разделением материала по нейтральной оси» с результатами аналитического и численного расчета методом конечных элементов консольно-балочного сталежелезобетонного пролетного строения максимальным пролетом 109 м, составленного из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, с разделением материалов по нейтральной оси.

В качестве задела на дальнейшие исследования нами зарегистрирована заявка на изобретение «Сталежелезобетонное пролетное строение с рациональным распределением материала по зонам сопротивления».

Целью диссертационной работы является разработка и совершенствование сталежелезобетонного пролетного строения, в котором материалы разделяются по нейтральной оси поперечного сечения.

Объект исследования – сталежелезобетонное пролетное строение, состоящее из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, с разделением материалов в поперечном сечении по нейтральной оси.

Задачи исследования:

1. Разработка методики аналитического расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материалов по нейтральной оси сечения;
2. Разработка новой конструкции пролетного строения, изготовленного из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, с разделением материала по нейтральной оси поперечного сечения;
3. Расчет нового сталежелезобетонного пролетного строения аналитическим методом и численным методом конечных элементов, и сопоставление полученной материалоемкости пролетного строения с существующими аналогами;
4. Определить условия производства и монтажа пролетного строения с организацией одностадийного работы поперечного сечения пролетного строения.

Научная новизна:

– Разработана расчетная модель поперечного сечения сталежелезобетонной балки с рациональным распределением материалов, позволяющая в сжатой части сечения размещать только железобетон, а в растянутой – сталь.

– Разработана методика аналитического расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материалов по нейтральной оси, что позволяет рационально распределить материалы в поперечном сечении пролетного строения.

– Разработано сборное консольно-балочное сталежелезобетонное пролетное строение с максимальной длиной пролета 109 м, состоящее из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, с разделением материалов по нейтральной оси поперечного сечения.

– Предложены технологические приемы изготовления и монтажа пролетного строения с организацией одностадийного работы поперечного сечения пролетного строения.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в получении методики расчета и конструктивного решения сталежелезобетонного пролетного строения, состоящего из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, с разделением материалов по нейтральной оси поперечного сечения.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием сертифицированного программного комплекса Midas Civil, широко применяемого для расчета мостовых сооружений; сопоставлением результатов расчета, выполненных аналитическим путем; сопоставлением результатов расчетов с объектами аналогами отечественного мостостроения.

Апробация работы. Результаты исследований и основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на следующих научных конференциях:

- 1) Образование. транспорт. инновации. строительство, Омск, 19 – 20 апреля 2018 г. – Омск, СибАДИ.
- 2) III Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации», Омск, 29 - 30 ноября 2018 г. – Омск, СибАДИ.
- 3) International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019" 01 – 04 октября 2019 г. – Владивосток;
- 4) VII Международная научно-практическая конференция, приуроченная к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 24–25 ноября 2022 года. – Омск, СибАДИ;
- 5) VIII Международная научно-практическая конференция, приуроченная к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 23–24 ноября 2023 года. – Омск, СибАДИ.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 печатных трудах, в том числе 1 статья подготовлена и опубликована в журнале входящем в перечень ВАК и 1 статья подготовлена и опубликована в журнале входящем в перечень SCOPUS. Также зарегистрирована заявка на выдачу патента на изобретение «Сталежелезобетонное пролетное строение с рациональным распределением материала по зонам сопротивления».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе произведен анализ развития конструктивных форм балочных сталежелезобетонных пролетных строений, обзор существующих конструкций и проблем сталежелезобетонных пролетных строений.

Главная идея применения сталежелезобетонных конструкций состоит в выгодном использовании работы бетона на сжатие, соответственно первые сталежелезобетонные пролетные строения автодорожных мостов были только балочно-разрезными с ездой поверху. Однако на рубеже 40-50-х годах в СССР и

других странах стали применять неразрезные, шарнирно-консольные и комбинированные сталежелезобетонные пролетные строения, в которых часть железобетонной плиты оказывалась растянутой.

Со второй половины 50-х годов преобладающим средством объединения стали и железобетона в большинстве зарубежных стран оказались гибкие цилиндрические упоры с головками, отличающиеся малой трудоемкостью приварки их сварочным пистолетом. Это обстоятельство послужило одной из многих причин применения за рубежом монолитной плиты, для которой эти упоры наиболее удобны и по сей день.

В нашей стране, с целью сокращения сроков строительства и исключения сезонности производства работ, широко применяли пролетные строения со сборными плитами проезжей части и соответственно жесткие упоры в качестве средства объединения со стальными главными балками. Стремление в 60-х годах к типизации и унификации строительных конструкций привело к созданию типовых проектов сталежелезобетонных пролетных строений мостов со сборными плитами. Большинство сталежелезобетонных конструкций пролетом до 84 м, построенных в прошлом веке, выполнены по типовым проектам. По индивидуальным проектам у нас сооружались автодорожные мосты пролетами более 84 м и широкие городские мосты.

В Сибирском автодорожный институт (СибАДИ) проведена обширная многолетняя работа по обследованию и испытанию сталежелезобетонных мостов со сборными плитами, построенных в период с 1957 по 1983 гг. под руководством профессора Толмачева К.Х. Обследовано 184 пролетных строения с целью определения их состояния и возможности перестройки мостов с габаритов Г-7 и Г-8 на Г-10 и Г-11,5 с целью оценки их состояния и возможности реконструкции для адаптации к современным требованиям.

Основные выявленные дефекты:

1. Несовершенство конструкции объединения. Жесткие дискретные упоры создавали недопустимые напряжения в бетоне омоноличивания, вследствие чего он разрушался с одновременным отслаиванием плиты от верхнего пояса главных балок и образованием между ними зазоров до 20 мм по всей длине пролетного строения с разрушением бетона омоноличивания в окнах;

2. Некачественное выполнение работ при омоноличивании плит с балками и между собой в поперечных и продольных стыках. Вследствие чего происходит выключение железобетонной плиты из совместной работы со стальной балкой.

3. Отсутствие надлежащей эксплуатации мостового сооружения. Выбоины в асфальтобетонном покрытии создавали сверхнормативные динамические нагрузки при пропуске по мосту большегрузных транспортных средств. Из-за нарушения гидроизоляции или плохого ее исполнения бетон плиты выщелачивается, в плите появляются трещины, вследствие чего происходила коррозия арматуры. Физический износ наступал через 15 лет, хотя расчетный срок их службы намечался 60 лет.

Выводы по результатам обследований однозначны: при таком состоянии сталежелезобетонных пролетных строений со сборными плитами реконструкция

мостов с расширением проезжей части и адаптация под современные требования невозможна.

Таким образом, сталежелезобетонные пролетные строения со сборной плитой, построенные в прошлом столетии, показали свою неэффективность из-за разрушения узла объединения стали и железобетона в процессе эксплуатации, и, как следствие, выключение плиты и совместной работы. Большинство таких пролетных строений были реконструированы с заменой сборной железобетонной плиты на ортотропную плиту проезжей части, либо заменены полностью. На фоне сложившейся ситуации, отечественные мостостроители перешли на более надежную конструкцию пролетных строений с монолитной плитой на гибких упорах в качестве средства объединения со стальными балками.

Переход на конструкции с монолитной плитой привел к увеличению сроков и трудоемкости производства работ, а также к необходимости учета сезонности при строительстве и повышению контроля качества работ. Из-за этих недостатков все большее распространение на территории нашей страны получают пролетные строения со стальной ортотропной плитой проезда.

Для дальнейшего развития конструктивных форм сталежелезобетонных пролетных строений необходимо решить следующие задачи: сокращение сроков, снижение трудоемкости и ликвидация сезонности строительства, а также снижение материалоемкости изготовления пролетного строения.

При проектировании сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов без регулирования усилий, прочностные свойства железобетонной плиты используется не полностью. Железобетон включается в работу после набора прочности для восприятия постоянных и временных нагрузок стадии эксплуатации. Высота железобетонной части ограничена нормами и конструктивными особенностями пролетного строения, а увеличение размеров плиты проезжей части теряет целесообразность ввиду увеличения нагрузок стадии монтажа. Стальная главная балка перегружена весом железобетонной плиты со стадии монтажа, что влияет на ее геометрические характеристики и, как следствие, увеличивает металлоёмкость пролетного строения. Таким образом, для сталежелезобетонных конструкций характерна двухстадийная работа. Решением данной проблемы будет изменение технологии монтажа: регулирование усилий для обеспечения одновременного включения в работу стали и железобетона, что требует разработки дополнительных инженерных сооружений, монтаж пролетного строения сталежелезобетонными блоками или монтаж пролетного строения целиком.

Монтаж сталежелезобетонными блоками заводского изготовления или укрупненного пролетного строения целиком позволяет сократить сроки, исключить сезонность строительства и обеспечивает работу всего сечения в одну стадию. Соединение таких блоков выполняется болтовым стыком в стальной части и сухим стыком в железобетонной части, при условии бетонирования смежных сталежелезобетонных блоков в отпечаток при изготовлении. Таким образом, можно развить высоту железобетонной части на всю зону сжатия поперечного сечения, а сталь будет в зоне растяжения. Граница, разделяющая зоны растяжения

и сжатия в поперечных сечениях пролетного строения, называется нейтральная ось. Разделение стали и железобетона по нейтральной оси позволит рационально использовать прочностные свойства материалов и приведет к снижению расхода стали на изготовление пролетного строения.

Во второй главе определена расчетная статическая схема пролетного строения и приведена разработанная методика аналитического расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материалов по нейтральной оси поперечного сечения.

Применения балочных сталежелезобетонных пролетных строений мостов экономически выгодно при длине перекрываемого пролета до 120,0 метров. С такими пролетами применяют неразрезные, консольно-балочные и рамно-подвесные статические схемы пролетных строений.

Неразрезные пролетные строения относятся к категории статически неопределимых конструкций, что делает их особенно восприимчивыми к таким факторам, как неравномерная осадка опор и температурным воздействиям. Неразрезные статические схемы пролетных строений (рисунок 1, а) также обладают вытянутой зоной нулевых моментов.

Консольно-балочные и рамно-подвесные пролетные строения мостов являются статически определимыми. Они менее чувствительны к неравномерной осадке опор, что делает их более надежными в условиях эксплуатации. Особенности конструкции консольно-балочных и рамно-подвесных статических схем позволяют организовать монтаж укрупненными блоками пролетного строения. Рамно-подвесные системы (рисунок 1, б) являются частным случаем консольно-балочных пролетных строений. Они не имеют переходных зон на эпюре моментов, но недостатком данной конструкции является включение опор в работу пролетного строения.

Для учета особенностей неразрезных и разрезных систем мостов больших пролетов мостов рассматривается консольно-балочная статическая схема (рисунок 1, в). Длина консолей, в такой системе, принимается согласно расположению зоны нулевых моментов в аналогичной неразрезной системе.

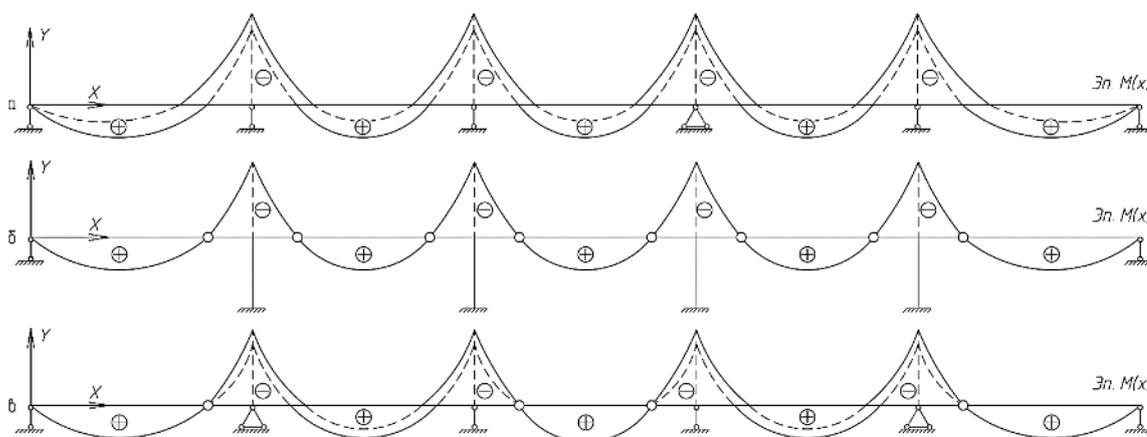


Рисунок 1 – Статические схемы пролетных строений:

а – неразрезное пролетное строение;

б – рамно-подвесное пролетное строение;

в – консольно-балочное пролетное строение.

Конструкция пролетного строения моста предусматривает сопряжение стальной и железобетонной части по линии, проходящей через центры тяжести сталежелезобетонных сечений. Центр тяжести сечения, или нейтральная ось сечения, меняет свое положение по длине пролетного строения в зависимости от действующего изгибающего момента $M(x)$, образуя линию нейтральной оси.

Проектирование пролетного строения моста заключается в определении рациональных, с точки зрения экономии материалов, геометрических параметров поперечных сечений, таких как высота сечения и площадь элементов поперечного сечения.

Аналитическая методика подбора предварительных геометрических параметров имеет следующие положения:

1. Сечения пролетного работает в упругой стадии и согласно гипотезе плоских сечений закон распределения напряжений прямолинейный. Таким образом, имеется возможность контролировать напряженное состояние конструкции в ее сечениях. Максимальное напряжение стальной части соответствует расчетному сопротивлению растяжения стали – R_{us} . Максимальное напряжение железобетонной части соответствует расчетному сопротивлению сжатия железобетона – R_{ub} ;

2. Условие равновесия сечения при сумме усилий по $\Sigma X = 0$, и при отсутствии продольных сил

$$\int_{F_b} \sigma_b dF = \int_{F_s} \sigma_s dF, \quad (1)$$

где σ_b – условие прочности бетонной части, σ_s – условие прочности стальной части;

Формула (1) может быть представлена как равенство нулю статических моментов инерции относительно нейтральной оси сечения

$$S_b = n_b S_s, \quad (2)$$

где S_b – статический момент инерции железобетонной части, S_s – статический момент инерции стальной части, $n_b = \frac{E_s}{E_b}$ – коэффициент приведения стали к бетону, E_s и E_b – модуль упругости стали и железобетона соответственно.

3. Условие прочности стального сечения

$$\sigma_s = M(x) \frac{y_s}{I_{st}}, \quad (3)$$

где $M(x)$ – изгибающий момент в сечении, y_s – высота стальной части, I_{st} – момент инерции сталежелезобетонного сечения, σ_s – напряжение в крайней фибре стальной части, равное расчетному сопротивлению стали на растяжение.

Геометрически параметры определяются путем решения системы уравнений (4), составленной из формул (2) и (3)

$$\begin{cases} S_b = n_b S_s \\ \frac{y_s}{I_{st}} = \frac{M(x)}{R_{us}} \end{cases} \quad (4)$$

Методика аналитического расчета приводится для зон положительного и отрицательного изгибающего момента.

МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЙ В ЗОНЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА

При действии положительного изгибающего момента, в сжатой зоне поперечного сечения устраивается железобетонная плита проезжей части с переменной высотой ребра. В растянутой зоне поперечного сечения располагается двутавровая стальная главная балка с переменной высотой стенки. Сопряжение стальной и железобетонной части происходит по верхнему поясу стальной главной балки. Расчетная схема поперечного сечения приведена на рисунке 2.

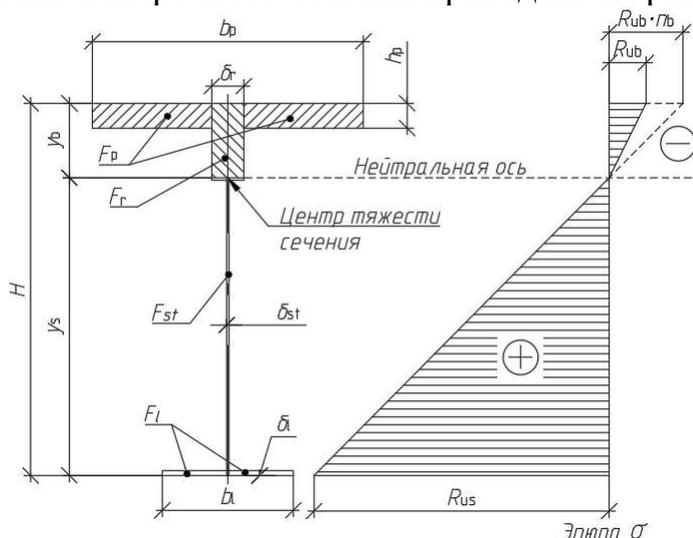


Рисунок 2 – Расчетная схема поперечного сечения
в зоне положительного изгибающего момента.

На рисунке 2 приняты следующие обозначения: F_p – площадь ж.б. плиты проезжей части, h_p – высота ж.б. плиты проезжей части, b_p – ширина ж.б. плиты проезжей части, F_r – площадь ж.б. ребра плиты проезжей части, δ_r – ширина ж.б. ребра плиты проезжей части, F_{st} – площадь стальной стенки главной балки, δ_{st} – толщина стальной стенки главной балки, F_l – площадь стального нижнего пояса главной балки, δ_l – толщина стального пояса главной балки, b_l – ширина стального нижнего пояса, y_b – высота железобетонной части сечения, y_s – высота стальной части сечения.

Из расчетной схемы очевидно, что соотношение высоты всего сечения H к стальной и железобетонной части может быть представлено следующим образом

$$y_b = k \cdot H, \quad y_s = k_1 \cdot H, \quad (5)$$

где $k = \frac{R_{ub} \cdot n_b}{R_{us} + R_{ub} \cdot n_b}$, $k_1 = 1 - k = \frac{R_{us}}{R_{us} + R_{ub} \cdot n_b}$.

После преобразования системы уравнения (4) получим

$$\begin{cases} \left[H(F_p k^2 + n_b F_l k_1^2) + \frac{H^2(\delta_r k^3 + n_b \delta_{st} k_1^3)}{3} + (k F_p h_p + k_1 F_l \delta_l) \right] \frac{1}{k_1 n_b} - \frac{M(x)}{R_{us}} = 0 \\ F_p \left(y_b - \frac{h_p}{2} \right) + F_r \frac{y_b}{2} - n_b F_{st} \frac{y_s}{2} - n_b F_l \left(y_s - \frac{\delta_l}{2} \right) = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

В зоне контакта стальной и железобетонной части располагается сопрягающий стальной лист. Сопрягающий лист стальной части находится близко

к центру тяжести поперечного сечения, учет его в работе сечения дает поправку в результатах менее 1%, что дает возможность пренебречь им в расчете геометрических параметров сечения.

Решение системы уравнений (6) ведет к нахождению двух величин F_1 и H для сечения с максимальным изгибающим моментом. Высота пролетного строения в зоне положительных изгибающих моментов принимается постоянной, а положение нейтральной оси в каждом последующем сечении контролируется изменением нижнего пояса.

МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЙ В ЗОНЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА

В зоне действия отрицательного изгибающего момента проезд осуществляется по стальной ортотропной плите проезжей части. Нижний пояс поперечного сечения железобетонный. Расчетная схема приведена на рисунке 3.

Подбор геометрических параметров ведется аналогичным способом, как и для сечений в зоне положительных изгибающих моментов. Так как стальная ортотропная плита имеет постоянные геометрические характеристики в расчете определяющими параметрами будут площадь железобетонного нижнего пояса и высота всего поперечного сечения.

В ходе определения геометрических параметров для каждого i -го сечения подбирается соотношение стальной и железобетонной части в зависимости от изменения изгибающего момента. Таким образом, полная высота сечения H будет максимальная в зоне опирания пролетного строения и уменьшится по мере приближения к зоне изменения знака изгибающего момента до размеров сечения, полученного при расчете в зоне положительных изгибающих моментов.

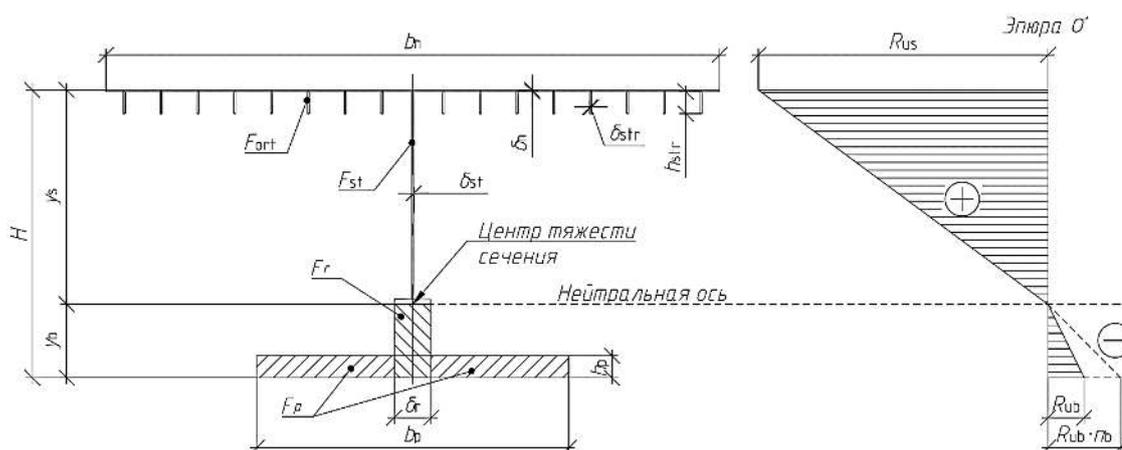


Рисунок 3 – Расчетная схема поперечного сечения в зоне отрицательного изгибающего момента.

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: F_p – площадь ж.б. плиты нижнего пояса, h_p – высота ж.б. плиты нижнего пояса, b_p – ширина ж.б. плиты нижнего пояса, F_r – площадь ж.б. ребра нижнего пояса, δ_r – ширина ж.б. ребра нижнего пояса, F_{st} – площадь стальной стенки главной балки, δ_{st} – толщина

стальной стенки главной балки, F_{ort} – площадь стальной ортотропной плиты проезжей части, b_n – ширина стального настила, δ_n – толщина стального настила, h_{str} – высота стального продольного ребра ортотропной плиты, δ_{st} – толщина стального продольного ребра ортотропной плиты, y_b – высота железобетонной части сечения, y_s – высота стальной части сечения.

В третьей главе приведена расчетная схема пролетного строения, соответствующее выбранной статической схеме, произведен аналитический расчет по разработанной методике и численный программный расчет методом конечных элементов. В качестве аналога и образца для экспериментального исследования принята схема и конструкция консольно-балочного пролетного строения моста через реку Иртыш в г. Омске, построенного в 1957 г по схеме $(83,5 + K13,5) + 109,0 + (K13,5 + 82,0 + K13,5) + 109,0 + (K13,5 + 83,5)$ м.

К расчету принято консольно-балочное пролетное строение с длиной пролета 109 м (рисунок 4). Консоли пролетного строения приняты равными 22,0 м согласно расположению зоны нулевых моментов в аналогичной неразрезной системе. Габарит проезда по расчетному пролетному строению Г-20, полная ширина пролетного строения 25,9 м. Поперечные сечения приведены на рисунке 5.

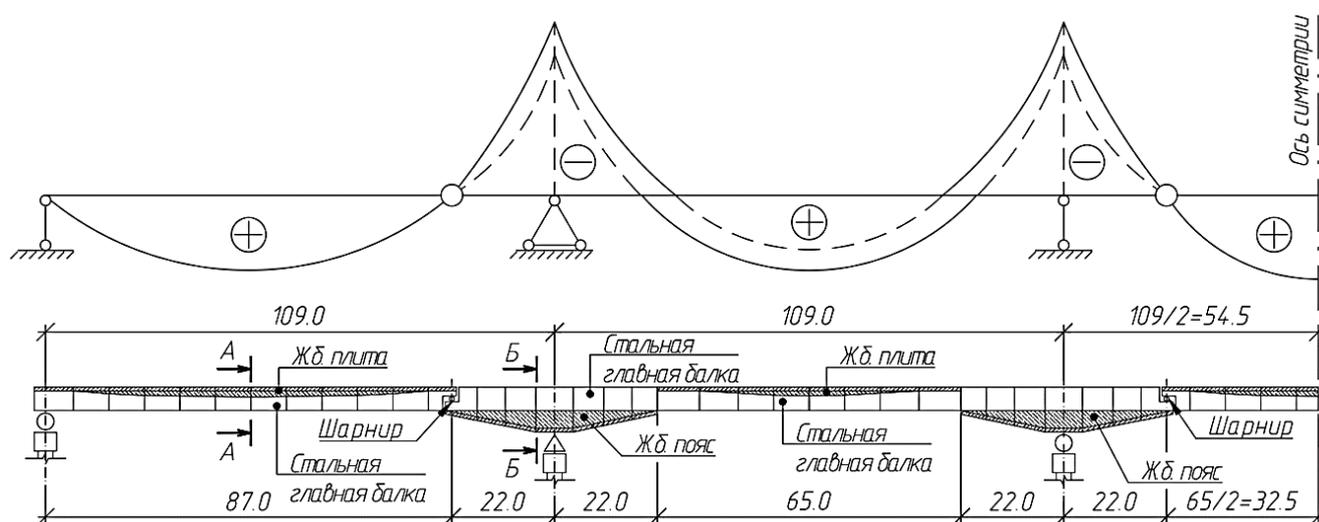


Рисунок 4 – Расчетная схема консольно-балочного пролетного строения (размеры указаны в метрах).

Класс расчетной временной нагрузки А14 и Н14, нагрузка от пешеходов на тротуарах принимается совместно с нагрузкой А14 и равна 3 кПа.

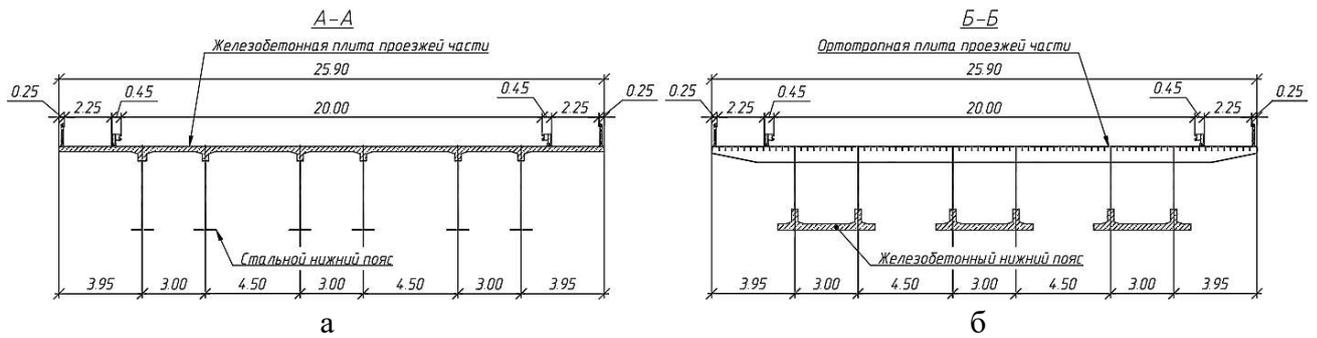


Рисунок 5 – Поперечное сечение проектируемого пролетного строения
(размеры указаны в метрах):

а – в зоне положительного изгибающего момента;
б – в зоне отрицательного изгибающего момента.

Одно из преимуществ данной конструкции и методики расчета – экономия материалов за счет их рационального распределения в сталежелезобетонном сечении. Поэтому геометрические и прочностные параметры элементов поперечного сечения принимаются минимальными в соответствии с требованиями нормативных документов и конструктивной необходимости (таблица 1).

Таблица 1 – Расчетные параметры элементов поперечного сечения

Параметр	Сечение	
	Зона положительных моментов (А-А)	Зона отрицательных моментов (Б-Б)
h_p – высота ж.б. плиты, мм	180	300
b_p – ширина ж.б. плиты, мм	3000	2310
δ_r – ширина ж.б. ребра, мм	300	300
δ_{st} – толщина стальной стенки балки, мм	12	12
h_{str} – высота стального продольного ребра ортотропной плиты, мм	180	-
δ_{st} – толщина стального продольного ребра ортотропной плиты, мм	14	-
δ_n – толщина стального настила, мм	14	-
b_n – ширина стального настила, мм	-	3000
R_{us} – расчетное сопротивление растяжению стали, МПа	295	295
R_{ub} – расчетному сопротивлению сжатия железобетона, МПа	16,7	16,7
E_s – модуль упругости стали, МПа	206000	206000
E_b – модуль упругости железобетона, МПа	34500	34500

Разработанная методика аналитического расчета позволяет, изменяя геометрические параметры каждого i -го сечения контролировать его напряженное состояние. Результаты расчета геометрических параметров поперечных сечений главных балок пролетного строения представлены на рисунке 6.

Согласно результатам аналитического расчета получаем:

— В зоне положительных изгибающих моментов устраивается железобетонная плита проезжей части и стальной нижний пояс. Полная высота сечения составляет 3,924 м. Высота ребра железобетонной плиты при максимальном моменте составляет 1,048 м и уменьшается до 0,180 м к опорной зоне. Высота стальной стенки главной балки при максимальном моменте 2,876 м и увеличивается до 3,744 м к опорной зоне. Нижний пояс главной балки меняется от 0,850x0,040 м до 0,420x0,020 м к зоне опирания.

— В зоне отрицательных изгибающих моментов полная высота сечения переменная, проезд осуществляется по стальной ортотропная плите, а нижний пояс железобетонный. При максимальном моменте высота железобетонной части составляет 2,384 м, а стальной части 3,842 м. В зонах нулевых моментов высота железобетонной части составляет 0,180 м, а стальной части 3,744.

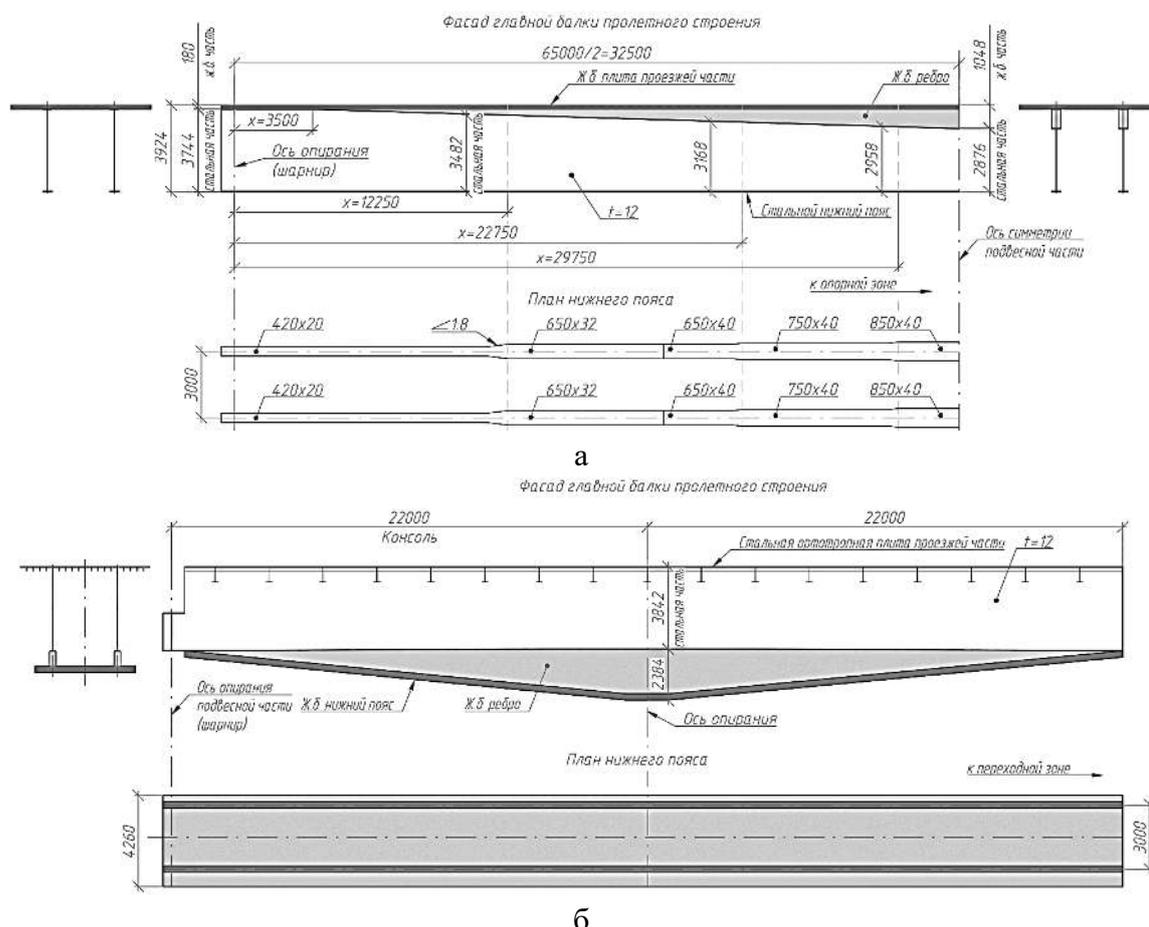


Рисунок 6 – Геометрические параметры пролетного строения по результатам расчета (размеры указаны в миллиметрах):

- а – геометрические параметры сечений зоны положительных изгибающих моментов;
- б – геометрические параметры сечений зоны отрицательных изгибающих моментов.

В качестве экспериментальной оценки аналитического расчета построена пространственная модель в специализированном программном комплексе для расчета мостовых конструкций «Midas Civil». Стальные элементы модели сформированы из пластинчатых элементов с 12-ю степенями свободы, а железобетонные элементы сформированы из объемных конечных элементов с 24-ю степенями свободы. Элементы связей и домкратных балок представлены стержневыми конечными элементами с 6-ю степенями свободы. Модель состоит из 45320 шт. плитных элементов и 19280 шт. объемных элементов.

Геометрические параметры элементов модели пролетного строения приняты на основе результатов аналитических расчетов и распространенных конструктивных решений в мостостроении. Модель пролетного строения приведена на рисунке 7.

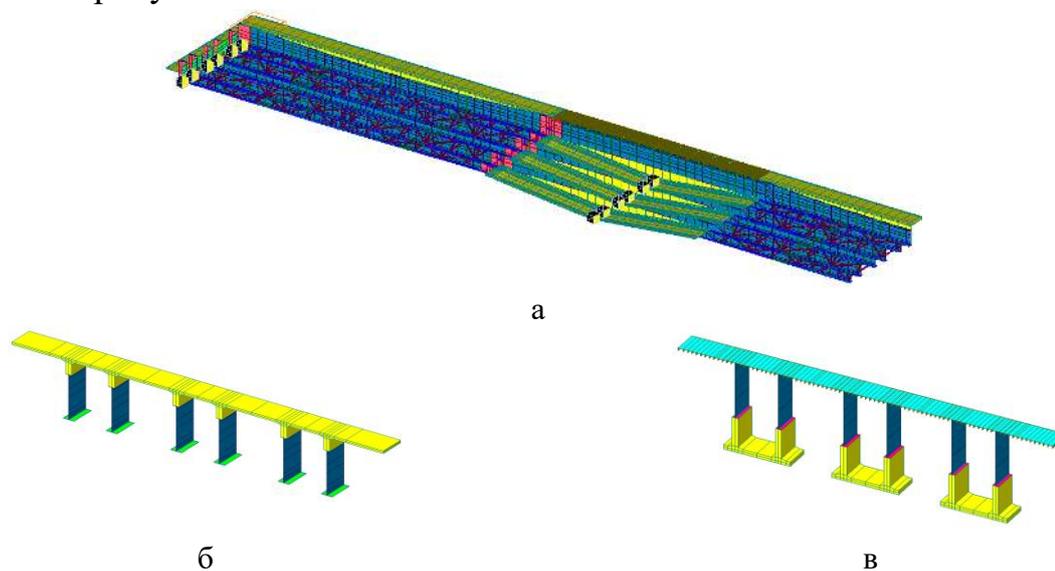


Рисунок 7 – Модель пролетного строения:

- а – общий вид модель пролетного строения (модель показана до середины);
- б – сечение в зоне положительного изгибающего момента;
- в – сечение в зоне отрицательного изгибающего момента.

В ходе расчета методом конечных элементов получены нормальные напряжения в элементах поперечного сечения конструкции. На рисунке 8 представлены эпюры нормальных напряжений в точках максимальных изгибающих моментов: в середине пролета ($L=109,0$ м) и в точке опирания пролетного строения на промежуточной опоре.

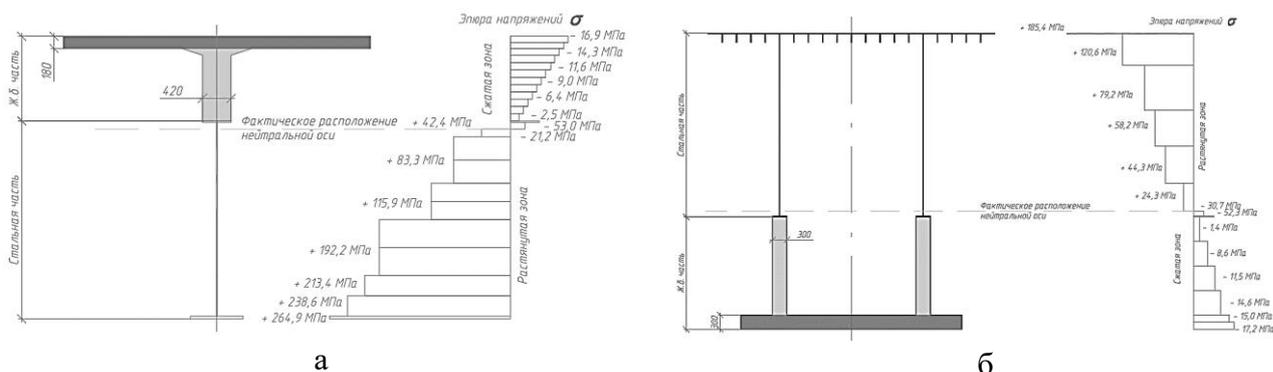


Рисунок 8 – Эпюры напряжений в поперечных сечениях пролетного строения по результатам расчета методом конечных элементов (размеры указаны в миллиметрах):

- а – в зоне положительных изгибающих моментов (в пролете);
- б – в зоне отрицательных изгибающих моментов (над опорой).

Анализ результатов расчета показывает, что нейтральная линия сечения вдоль пролетного строения проходит по границе объединения стальной и железобетонной части. Железобетон находится преимущественно в сжатой зоне. Напряжения в зоне положительных изгибающих моментов (в пролете) близки к расчетным сопротивлениям материалов. Напряжения в зоне отрицательных изгибающих моментов (над опорой) превышают расчетные сопротивления на 3%.

Ближайшим аналогом разработанной конструкции пролетного строения является «Ленинградский мост» через р. Иртыш в г. Омске, 1957 года постройки, проект капитального ремонта выполнен в 2022 году. Мост имеет сталежелезобетонное консольно-балочное пролетное строение с центральным пролетом 109,0 м и консолью 11,5 м. В рамках капитального ремонта нами успешно произведены проверки моста на воздействие временных нагрузок А11 и Н11. Проверки выполнены методом конечных элементов в программном комплексе «Midas Civil».

По результатам исследований произведена оценка материалоемкости исследуемых пролетных строений. Расход стали разработанного пролетного строения – 6,12 т/п.м., расход железобетона – 6,54 м³/п.м. Расход стали главных балок «Ленинградского моста» через р. Иртыш в г. Омске – 10,04 т/п.м., расход железобетона – 5,68 м³/п.м., что на 39% больше и на 15% меньше исследуемого пролетного строения соответственно.

В четвертой главе описаны условия производства и монтажа пролетного строения.

Железобетонная плита является элементом несущей конструкции, поэтому следует уделять особое внимание качеству изготовления плит проезжей части, а также объединению их в совместную работу со стальной главной балкой.

Для обеспечения совместной работы стальной и железобетонной части пролетного строения применяют металлические упоры. Упоры должны обеспечить равномерную передачу усилий от главной балки к железобетонной плите проезжей

части. В случае нарушения конструкции объединения плита проезжей выключается из совместной работы сталежелезобетонного сечения и работает на восприятие местных временных нагрузок от движущегося транспорта.

Возможные узлы объединения представлены на рисунке 9.

Изготовление сталежелезобетонных блоков пролетного строения организовывается в непосредственной близости участка строительства, куда с завода металлоконструкций поставляется готовая стальная часть пролетного строения. Бетонирование железобетонной части смежных блоков производится «в отпечаток», для обеспечения плотного обжатия железобетона после монтажа. Стык стальной части пролетного строения – фрикционный, на высокопрочных болтах и накладках. Стык железобетонной части – сухой, железобетонные части плотно прижимаются друг к другу сжимающими усилиями.

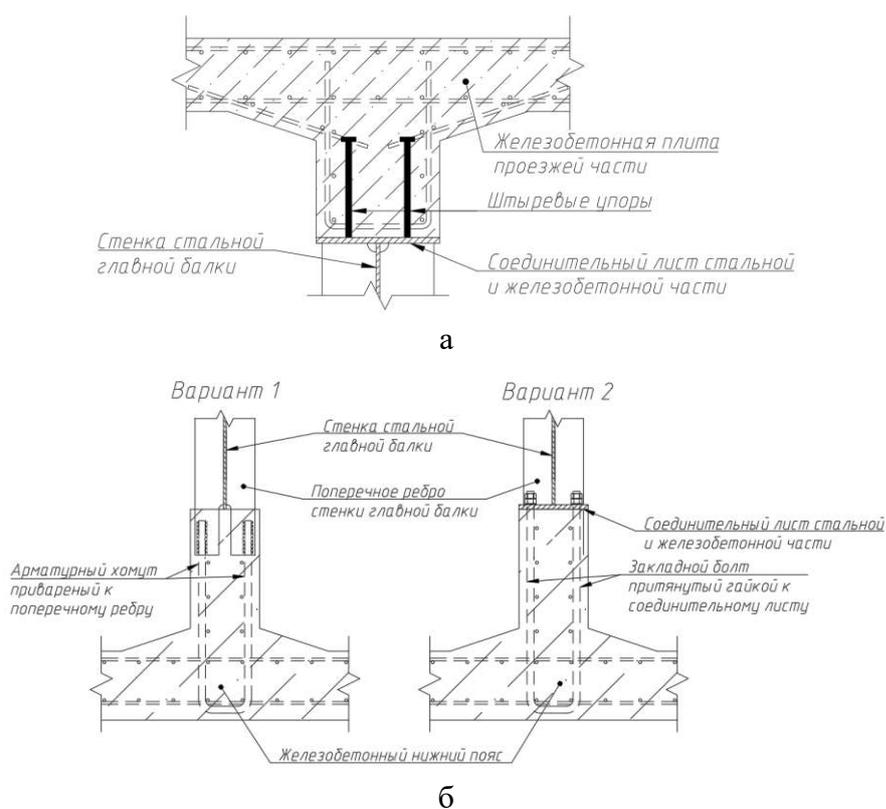


Рисунок 9 – Возможные варианты узлов объединения стальной и железобетонной части:

- а – в зоне положительных изгибающих моментов (в пролете);
- б – в зоне отрицательных изгибающих моментов (над опорой).

Укрупненные блоки консольной части можно монтировать двумя способами: с применением временных опор, для обеспечения устойчивости конструкции, и с устройством временного анкера на опоре с поочередным монтажом блоков с разных сторон (рисунок 9, а).

Укрупненная подвесная часть монтируется целиком в пролет с воды (рисунок 9, б). Монтаж подвесной части пролетного строения может производиться с плавсредства кранами, либо с применением технологии Heavy Lifting.

Преимуществом приведенных методов монтажа пролетного строения является отсутствие высотных работ по устройству железобетонной части в пролете и сокращение общего срока производства работ. Также изготовление и монтаж не зависит от сезона производства работ.

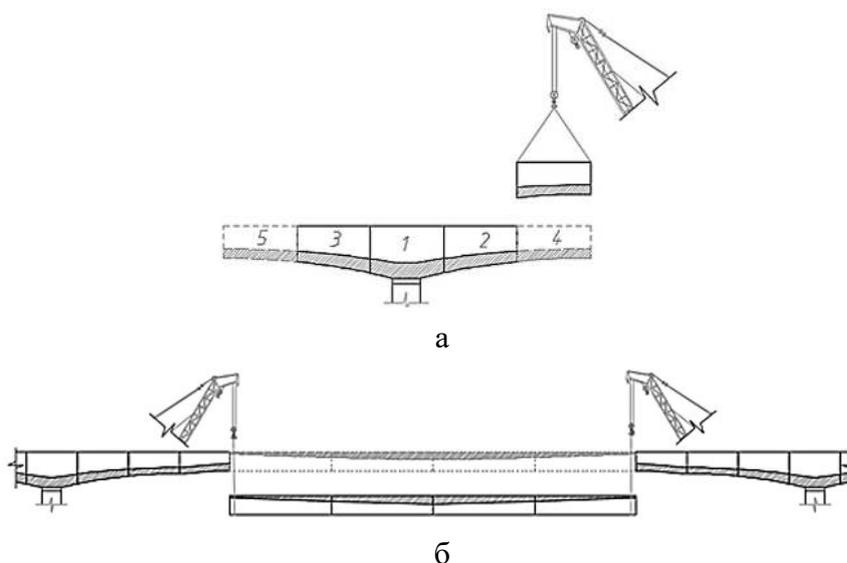


Рисунок 9 – Схемы монтажа пролетного строения:
а – монтаж консольной части;
б – монтаж подвесной части.

Недостатком приведенного способа монтажа является необходимость устройства временного завода железобетонных изделий в непосредственной близости от площадки строительства и применение временных опор у консольной части пролетного строения, либо усиление конструкции опоры. Но, стоит отметить, что на временном заводе железобетонных изделий возможно организовать изготовление контурных блоков для опор моста, что уменьшает себестоимость опор.

Заключение

По результатам проведенных исследований выполнены задачи, выносимые на защиту, а именно:

1. Разработана методика аналитического расчета сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материалов по нейтральной оси поперечного сечения: представлена методика для положительного и отрицательного значения изгибающего момента;

2. Разработана новая конструкция пролетного строения, изготовленного из сталежелезобетонных блоков заводского изготовления, с разделением материала по нейтральной оси поперечного сечения: подобрана оптимальная статическая схема и конструктивные параметры;

3. Произведен расчет нового сталежелезобетонного пролетного строения аналитическим методом и численным методом конечных элементов, и сопоставление полученной материалоемкости пролетного строения с существующими аналогами;

4. Определены условия производства и монтажа пролетного строения с организацией одностадийной работы поперечного сечения пролетного строения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1) Уткин, В. А. Исследование сталежелезобетонных пролетных строений. Пути конструктивного и технологического совершенствования / В. А. Уткин, С. А. Матвеев, А. С. Белокопытов // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство : сборник научных трудов национальной научно-практической конференции, Омск, 19–20 апреля 2018 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2018. – С. 390-393.

2) Уткин, В. А. Расчет разрезного сталежелезобетонного пролетного строения с учетом регулирования положения нейтральной оси / В. А. Уткин, С. А. Матвеев, А. С. Белокопытов // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Омск, 29–30 ноября 2018 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. – С. 269-273.

3) Belokopytov, A. S. The Substantiation of Steel-Reinforced Concrete Composite Bridge Superstructure Design / A. S. Belokopytov, V. A. Utkin, S. A. Matveev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019", Vladivostok, Russky Island, 01–04 октября 2019 года. Vol. 753, 3, Chapter 2. – Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020.

4) Белокопытов, А. С. Разработка и совершенствование сталежелезобетонного пролетного строения с разделением материала по нейтральной оси / А. С. Белокопытов, В. А. Уткин, С. А. Матвеев // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 24–25 ноября 2022 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 323-327.

5) Белокопытов, А. С. Ремонт мостов города Омска. «Ленинградский мост» / А. С. Белокопытов, В. А. Уткин, С. А. Матвеев, В. П. Чучалина // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, приуроченной к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий, Омск, 23–24 ноября 2023 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. – С. 411-416.

6) Белокопытов А.С., Уткин В.А., Матвеев С.А. Методика расчета сталежелезобетонного пролетного строения моста с разделением материала по нейтральной оси // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 3. С. 436-451.