На правах рукописи

Пушков Никита Михайлович

РАЗВИТИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ ПРОЛЁТНЫХ СТРОЕНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ ЭСТАКАД ИЗ СБОРНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

05.23.11 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

13 МАР 2014

005545889

Москва-2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент, **Нестеров Иван Владимирович.**

Официальные оппоненты: **Сафронов Владимир Сергеевич,** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра строительной механики, профессор;

Кузнецова Инна Олеговна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения», кафедра «Мосты», доцент.

Ведущая организация: **Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение «Мостовик».**

Защита состоится «18» апреля 2014 г. в 10^{00} часов на заседании диссертационного совета ДМ 303.018.01, созданного на базе ОАО «Научно-исследовательский институт транспортного строительства» (ОАО ЦНИИС) и ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения» МГУПС (МИИТ) по адресу: 129329, г. Москва, ул. Кольская, д. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОАО ЦНИИС и МГУПС (МИИТ).

Автореферат разослан «27» февраля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, **Петрова Жаннета Алексеевна**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

В настоящее время в Российской Федерации и в других странах эксплуатируются и продолжают возводиться городские транспортные эстакады и развязки. Известная для таких объектов городской инфраструктуры идея об эффективности надстройки существующих железнодорожных магистралей, например, Московского узла, автодорожными галереями и даже зданиями более сложной структуры, признаётся вполне перспективной, но требующей существенного развития как конструктивных форм, так и технологий возведения новых инженерных сооружений. Сложившаяся практика показывает, что во многих случаях эстакады различных пролётов, протяжённости и формы в плане сооружаются из монолитного железобетона и сталежелезобетона. Вместе с тем, сборность таких конструкций позволила бы возводить эти сооружения в кратчайшие сроки на наиболее ответственных участках надстраиваемых магистралей, в том числе, при сохраняющемся интенсивном движении транспортных средств, а также там, где недостаточно территорий для организации больших площадок строительства.

Диссертация посвящена вопросам развития конструктивных форм пролётных строений транспортных эстакад-галерей из железобетонных монтажных элементов заводского изготовления, что в целом сводит к минимуму объёмы работ непосредственно на строительных площадках.

Индустриальные методы возведения мостовых конструкций из сборного железобетона определяются заводским изготовлением важнейших несущих элементов мостовых железобетонных конструкций опор и пролётных строений и их поточным монтажом на площадках строительства мостовых переходов и городских транспортных развязок. В то же время, одним из «слабых мест» любых сборных железобетонных конструкций справедливо считаются узлы стыковки монтажных элементов. При этом анализ возможности применения стальных замыкающих трубчатых элементов для соединения монтажных элементов сборных железобетонных пролётных строений автодорожных мостов не проводился. Развитие и обоснование математическим моделированием конструктивных форм железобетонных элементов сборных мостовых конструкций, для стыковки которых применяется техническое решение, сочетающее в себе простоту и сжатые сроки монтажа, а также достаточную несущую способность на стадии эксплуатации, является задачей актуальной и востребованной для практического использования.

В диссертации основой разработки конструктивных решений стала патентная заявка «Композитный несущий блок и монтажное соединение блоков сборной строительной конструкции» МГУПС МИИТ № 2012128146/03 с приоритетом от 06.07.2013 г., а одним из результатов

развития указанного инновационного предложения стала подготовленная на базе рассматриваемой диссертационной работы заявка «Пространственная балочная конструкция из сборного железобетона» МГУПС МИИТ № 2013152895 с приоритетом от 29.11.2013 г., находящаяся в настоящее время в процессе оформления.

Объект исследования – конструктивно-технические решения сборных железобетонных конструкций для мостовых сооружений.

Предмет исследования – стыковые соединения монтажных элементов сборных железобетонных пролетных строений автодорожных мостов.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является разработка и обоснование конструктивных форм монтажных элементов сборных железобетонных пролётных строений автодорожных эстакад-галерей, стыкуемых с помощью стальных замыкающих трубчатых элементов, и разработка оптимальной по размерности расчётной математической модели таких монтажных соединений.

В работе решены следующие *задачи*:

- выполнен анализ существующих конструктивных решений сборных железобетонных автодорожных пролётных строений мостов и двухуровневых эстакад в целом;
- изучены применяемые и перспективные решения стыковых соединений сборных железобетонных конструкций для последующей разработки новых конструкций монтажных элементов;
- разработаны новые конструктивные формы железобетонных монтажных элементов, стыкуемых с помощью стальных замыкающих трубчатых элементов, для пролётных строений автодорожных эстакад с промежуточными поперечными диафрагмами и для надстройки существующих магистралей эстакадами второго уровня и галереями;
- разработаны расчётные математические пространственные модели автодорожного пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами для оценки работы промежуточных поперечных диафрагм;
- разработана оптимальная по размерности расчётная математическая пространственная модель замыкающего трубчатого элемента для оценки напряженно-деформированного состояния стальных замыкающих трубчатых элементов;
- разработано программно-математическое обеспечение для расчёта поперечных сечений железобетонных элементов на косой изгиб и плоский поперечный изгиб с учетом требований действующих нормативных документов;
- раскрыто влияние промежуточных поперечных диафрагм на перераспределение усилий между главными балками пролётного строения;
- предложена последовательность монтажа новых сборных конструкций железобетонных пролётных строений, сводящая к минимуму ог-

раничения движения поездов по надстраиваемой магистрали в процессе строительства.

Научная новизна работы.

- Проведен анализ возможности стыковки монтажных элементов железобетонного пролётного строения при помощи стальных замыкающих трубчатых элементов без омоноличивания стыкового соединения.
- Разработаны пространственные математические модели нового железобетонного пролётного строения автодорожного моста с промежуточными сборными поперечными железобетонными диафрагмами для оценки общей работы конструкции, для выявления наиболее нагруженных монтажных элементов и для моделирования работы новых стыковых соединений.
- Разработаны геометрические и структурные характеристики монтажных элементов эстакады-галереи для надстраивания действующей магистрали с минимальным ограничением движения по ней транспорта.

Методология и методы исследования.

Методологической базой исследований является анализ литературных источников по конструкциям сборных железобетонных мостовых сооружений.

В теоретических и численных исследованиях, выполненных в работе, использованы общие *методы* теории упругости и теории железобетона, методы математического моделирования конструктивных элементов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется соответствием результатам экспериментальных и теоретических исследований в данной области других авторов, известным принципам построения расчетных моделей метода конечных элементов, требованиям действующих нормативных документов, а также результатам, полученных с использованием сертифицированного программного обеспечения.

Практическая значимость и реализация работы.

- Предложенные в диссертационной работе новые монтажные элементы для транспортных сооружений, включающих сборный железобетон, предназначены для изготовления на заводах железобетонных мостовых конструкций и могут использоваться для разработки новых технических решений мостовых сооружений и модификации существующих типовых проектов балочных железобетонных пролетных строений.
- Конструкция стыкового соединения, использованного при разработке новых монтажных элементов, сводит к минимуму объёмы работ по омоноличиванию стыков, что существенно повышает темпы возведения мостового сооружения в целом.
- Геометрия и технология установки разработанных монтажных элементов не требуют какого-либо нестандартного оборудования или специальной квалификации персонала на площадке строительства.

- Разработанные расчётные математические модели пролётных строений автодорожных мостовых сооружений из сборного железобетона могут быть использованы проектными организациями, занимающихся проектированием мостовых конструкций, а также учреждениями, ведущими научное сопровождение проектирования объектов транспортного строительства.
- С помощью компьютерных программ, разработанных в диссертации, и сертифицированных программ проведен сравнительный анализ пространственных расчётных схем сборных железобетонных пролётных строений мостов для нескольких уровней сгущения сетки конечных элементов. На основании серии проведённых расчётов были выработаны практические рекомендации по выбору оптимального уровня сгущения сетки конечных элементов в зависимости от задач конкретного расчёта.
- Подана заявка в Роспатент РФ на изобретение «Пространственная балочная конструкция из сборного железобетона» № 2013152895 с приоритетом от 29.11.2013 г.

Апробация работы. Основные научные положения работы доложены:

- на научно-практической конференции «Неделя науки-2010. Наука - транспорту» (МИИТ). Москва 2010 г.
- на 69 Научно-методической конференции (МАДИ). Москва 2011 г.,
- на научно-практической конференции «Неделя науки-2013. Наука - транспорту» (МИИТ). Москва 2013 г.

На защиту выносятся:

- новые конструктивные решения автодорожного сборного железобетонного пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами, двухуровневой эстакады-галереи из сборного железобетона и варианта усиления надопорной зоны пролётного строения из сборного железобетона, в которых для стыковки монтажных элементов используются стальные замыкающие трубчатые элементы без омоноличивания стыкового соединения;
- новая расчётная математическая модель пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами, в которой диафрагмы моделируются стержневыми конечными элементами без учёта замыкающих трубчатых элементов;
- новая расчётная математическая модель пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами, в которой диафрагмы моделируются пластинчатыми конечными элементами, а замыкающие трубчатые элементы моделируются стержневыми конечными элементами;
- новая расчётная математическая модель замыкающего трубчатого элемента, в которой стыкуемые монтажные элементы моделируются стержневыми конечными элементами эквивалентной жесткости и

пластинчатыми конечными элементами;

- результаты сравнительного анализа разработанных расчётных математических моделей.

Публикации.

По материалам выполненных исследований опубликовано 6 работ, из них 4 в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ для кандидатских диссертаций.

Объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего в себя 93 наименования. Общий объём диссертации составляет 170 страниц печатного текста, включая 71 рисунок, 10 таблиц и 6 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, обозначены решаемые автором задачи, обоснована достоверность полученных результатов. Кроме того, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации выполнен обзор литературы по теме исследования, выполнен краткий анализ конструктивных схем балочных пролётных строений из сборного железобетона, а также применяемых распространённых и новых запатентованных технических решений стыковки монтажных элементов. Кроме того, приведены некоторые реализованные проекты двухуровневых транспортных магистралей и способы их возведения.

Известны типовые проекты сборных железобетонных пролётных строений автодорожных мостов, предназначенные для возведения индустриальными методами, разработанные известными научными и проектными организациями страны, например, ЦНИИС, Союздорпроект. Получившие распространение в последние годы мостовые конструкции в монолитном исполнении предоставляют широкие возможности для индивидуального проектирования, однако трудоёмкость и сроки их возведения в ряде случаев существенно выше по сравнению с аналогами из сборного железобетона.

Сопоставлены распространённые омоноличиваемые стыковые соединения элементов сборных пролётных строений и конструкции новых запатентованных сборных композитных конструкций, разработанные в ЦНИИС и МИИТ. Стыковые соединения, не требующие омоноличивания, могут быть использованы для развития конструктивных форм железобетонных пролётных строений, предназначенных для возведения в стесненных условиях в сжатые сроки. Возможной областью применения таких конструкций может стать надстройка действующих магистралей вторым уровнем.

Вторая глава посвящена развитию новых конструктивных форм сборных железобетонных пролётных строений автодорожных мостов и эстакад, использующих стыковое соединение, разработанное в МИИТ. Сущность такого стыкового соединения состоит в применении стальных замыкающих трубчатых элементов без омоноличивания соединения. Эти элементы устанавливаются в круглые отверстия, образованные в стыкуемых монтажных элементах аналогичными закладными деталями. Замыкающий трубчатый элемент жестко прикреплен кольцевым электросварным угловым швом по своим торцам к внутренней поверхности закладной детали.

В работе рассматриваются пролётные строения длиной до 30 м. Это связано с тем, что предлагаемые конструкции предназначены для стесненных условий строительства, а это предъявляет требования к мобильности используемых кранов. В свою очередь, более мобильное оборудование имеет меньшую грузоподъёмность для установки монтажных элементов в проектное положение.

В качестве базового варианта предложена конструкция, состоящая из следующих основных несущих монтажных элементов (рисунок 1):

- ребристые главные балки,
- промежуточные поперечные диафрагмы, объединяющие главные балки с помощью стальных замыкающих трубчатых элементов.

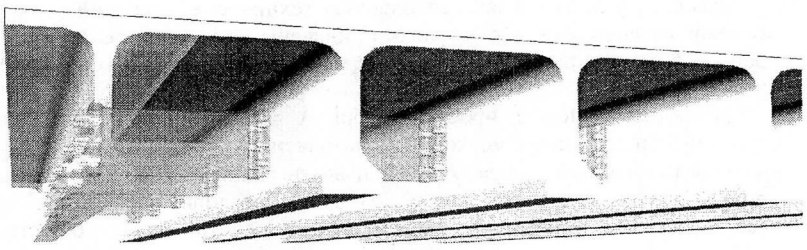

Рисунок 1 – Пример пролётного строения с промежуточными диафрагмами

Класс бетона, используемого в производстве таких диафрагм, должен быть не ниже класса бетона стыкуемых главных балок.

Для снижения строительной высоты однопролётные балки могут быть объединены в продольном направлении в упруго защемлённую структуру с помощью дополнительных конструктивных элементов (рисунок 2).

Для недопущения температурных деформаций главных балок дополнительно могут быть применены металлические стяжки, объединяющие соосные балки соседних пролётов. Такое конструктивное решение технически оправдано для прямых участков трассы.

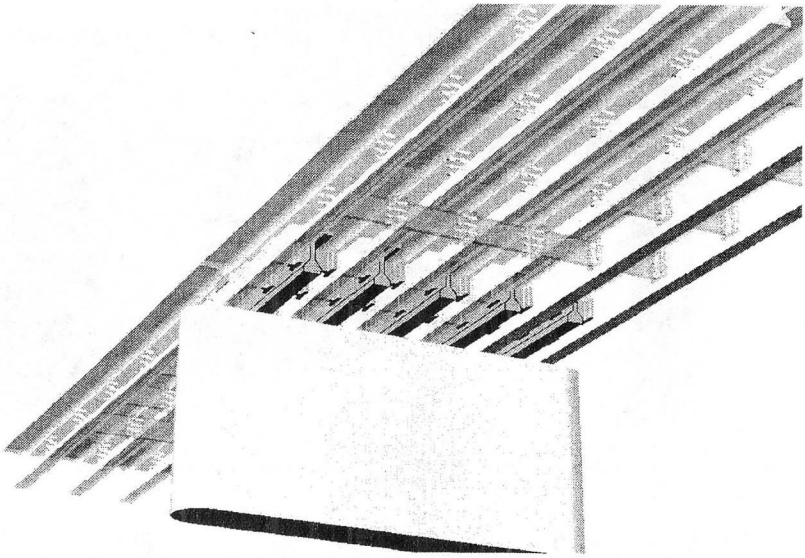

Рисунок 2 – Пример упруго защемлённого пролётного строения

Объединение монтажных элементов балок пролётных строений в упруго защемлённую схему предложенным способом позволяет:

- снизить строительную высоту конструкции,
- обойтись без омоноличивания надопорного стыка главных балок с объединением арматурных выпусков, что существенно повышает темпы возведения конструкции.

Задача надстраивания действующих магистралей вторым уровнем в стесненных условиях строительства может быть успешно решена применением сборных конструкций из железобетонных монтажных элементов, подобных рассмотренным ранее. Для этого в развитие разработанной конструкции (рисунок 1) разработаны конструктивные формы, представленные на рисунке 3. Стена из железобетонных монтажных элементов, соединяемых между собой и с опорными стойками такой эстакады с помощью замыкающих трубчатых элементов, защищает боковую часть конструкции эстакады от воздействий различного характера, а также снижает уровень шума от магистрали нижнего уровня.

Такая конструкция допускает переменную ширину проезжей части верхнего уровня. Расположение главных балок под незначительным углом к оси эстакады позволяет последовательно вывести необходимое их число за основной габарит эстакады. К их границе возможно подведение эстакады съезда любой другой конструкции (рисунок 4).

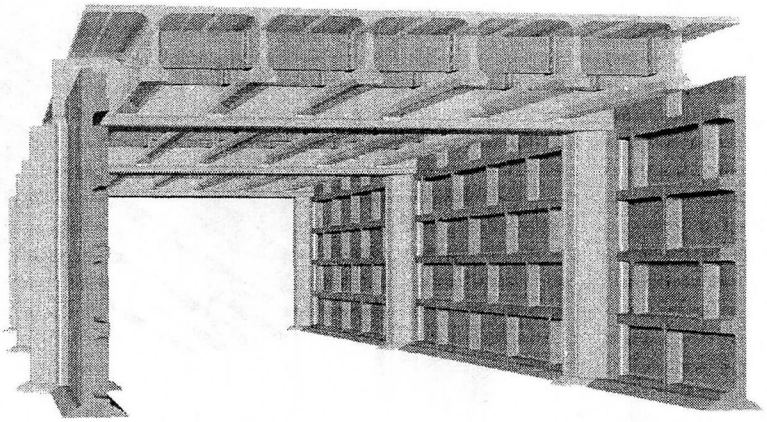

Рисунок 3 – Пример надстраивания магистрали вторым уровнем

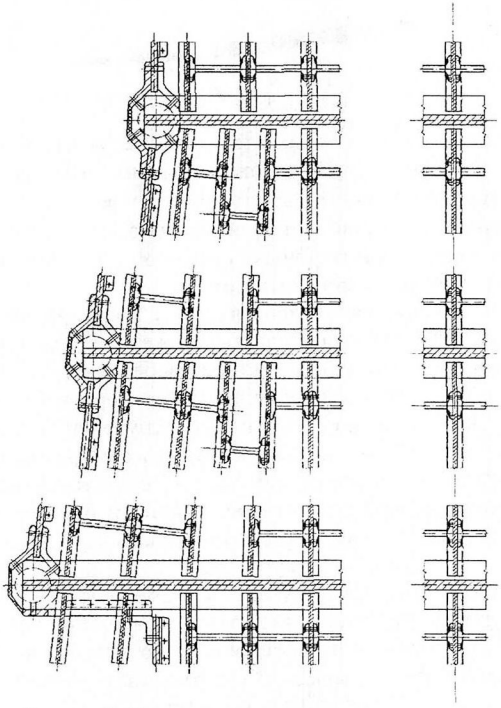

Рисунок 4 – План съезда со второго уровня эстакады

Третья глава посвящена вопросам монтажа разработанных конструктивных форм пролётных строений и двухуровневых эстакад. Все представленные монтажные элементы предназначены для изготовления на заводах мостовых железобетонных конструкций.

Монтаж несущей структуры пролётного строения из главных балок и промежуточных поперечных диафрагм (рисунок 1) производится последовательно. Сначала устанавливается первый ряд главных балок. Затем осуществляется стыковка нового монтажного элемента к элементу, уже находящемуся в проектном положении, с помощью замыкающих трубчатых элементов. В ряде случаев требуется временное закрепление нескольких монтажных элементов на время нескольких этапов стыковки.

Для случаев, когда оси главных продольных балок непараллельны, а также для косых пролётных строений, нет никаких принципиальных различий в применении рассмотренной технологии.

Таким же способом осуществляется и монтаж другой рассмотренной конструкции – объединение смежных пролётов с помощью дополнительных балок (рисунок 2).

Технология монтажа конструктивных элементов двухуровневой эстакады (рисунок 3) требует на каждом этапе обеспечить доступ к установке замыкающих трубчатых элементов, где это необходимо. В связи с этим предложена следующая последовательность монтажа.

1. Возведение опорных стоек по краям трассы.
2. Монтаж специальных накладок для крепления блоков защитной стены к опорным стойкам с помощью замыкающих трубчатых элементов.
3. Установка стальной трубы внутрь опорной стойки для ее усиления (дополнительная операция).
4. Монтаж ригеля (заранее изготовленной балки) на опорные стойки поперёк трассы.
5. На опорные ригели монтируется разрезной вариант пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами.
6. Сборка защитной стены (допустимо параллельно с этапом 5). Блоки устанавливаются сверху в проём между накладками.
7. Возводится монолитный карниз, закрывающий верх защитной стены и опорных стоек, а также стенка над опорой, где могут быть предусмотрены технологические проходы.

Из этой последовательности монтажа видно, что ограничение движения по надстраиваемой магистрали требуется лишь на время установки ригелей и частично – при монтаже пролётных строений.

Монтаж криволинейных участков эстакады, а также зон съездов не имеет принципиальных отличий от рассмотренной технологии.

В соединениях, используемых для стыковки основных несущих элементов рассматриваемых конструкций с помощью замыкающих трубчатых элементов, требуется специальная антикоррозионная обработка только двух торцевых зон на каждое соединение.

В четвёртой главе рассматриваются и обосновываются разработанные новые расчётные модели пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами, которые позволяют определить эффективность применения сборных железобетонных диафрагм в каждом конкретном случае.

Новые разработанные конечно-элементные модели промежуточной поперечной диафрагмы и замыкающего трубчатого элемента используются в качестве блоков глобальной модели конструкции. Необходимая степень детализации этих блоков как части общей линеаризованной модели определяется, с одной стороны, достоверным представлением работы конструкции и, с другой стороны, разумным уровнем сгущения конечно-элементной сетки, не приводящим к чрезмерному росту размерности задачи.

Исследовано несколько уровней детализации задачи и выработаны соответствующие практические рекомендации по применимости каждого случая. Сравнение выполнено по следующим критериям:

- максимальных прогибов главных балок,
- продольных сил в рабочей арматуре наиболее нагруженной балки.

В качестве примера рассмотрена конструкция разрезного пролётного строения из сборных цельноперевозимых железобетонных балок длиной 24 м. Пролётное строение образуют 6 двутавровых балок высотой 1,2 м, омоноличиваемых по плите. Такая схема рекомендована для автомобильных дорог II категории с двумя полосами движения, имеет полосы безопасности шириной 2 м и тротуары шириной 0,75 м. В качестве примера загружения выбрана нормативная нагрузка Н14 (п.6.12 Свода правил «Мосты и трубы») – 8 сосредоточенных сил по 126 кН (12,8 тс). Нагрузка приложена несимметрично для лучшего проявления перераспределяющего эффекта поперечных диафрагм. Несущая перекрёстная структура создается рядами диафрагм, объединяющих все продольные балки через каждые 4 м вдоль моста. В нашем случае насчитывается 5 рядов по 5 одинаковых промежуточных поперечных диафрагм.

Для моделирования работы пролётного строения использовался апробированный комплекс прочностного анализа открытой архитектуры «Катран», разработка И.В. Нестерова и В.А. Ожерельева (кафедра «САПР Транспортных конструкций и сооружений» МИИТ).

Выполнен сравнительный анализ новых разработанных расчётных моделей пролётного строения:

1. модель пролётного строения без диафрагм,
2. моделирование промежуточных поперечных диафрагм стержневыми конечными элементами (упрощенная модель),
3. моделирование промежуточных поперечных диафрагм пластинчатыми конечными элементами (уточненная модель),
4. подробная модель стыкового соединения (модель замыкающего трубчатого элемента).

Расчётная схема пролётного строения без диафрагм представлена на рисунке 5, а соответствующая деформированная схема – на рисунке 6.

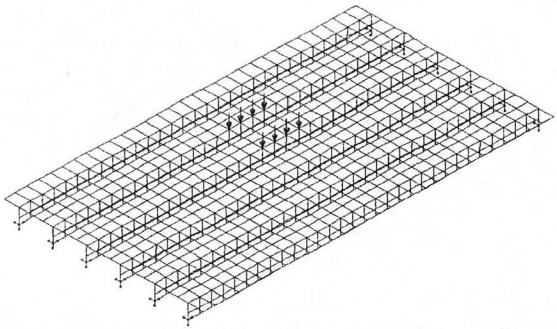

Рисунок 5 – Расчётная схема пролётного строения без диафрагм

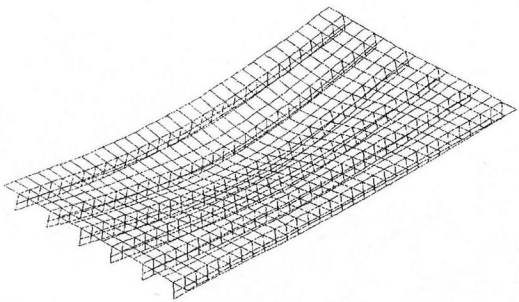

Рисунок 6 – Деформированная схема пролётного строения без диафрагм

Расчётная схема пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами (упрощенная модель) представлена на рисунке 7, а соответствующая деформированная схема – на рисунке 8. На этой схеме заметен эффект перераспределения усилий между главными балками благодаря поперечным диафрагмам, заключающийся в лучшей совместной работе всех главных балок и снижении максимального прогиба на 8,3 %.

Промежуточные поперечные диафрагмы по упрощенной модели в качестве первого приближения представлены стержневыми конечными элементами без учёта работы замыкающих трубчатых элементов. Такая расчётная схема достаточно точно представляет работу всей конструкции, что подтверждено результатами, изложенными далее. Крайне малое число конечных элементов, необходимое для моделирования одной диафрагмы, делает такую модель весьма удобной при разработке модели конструкции в целом, особенно при сопоставлении многих вариантов расположения монтажных элементов пролётных строений.

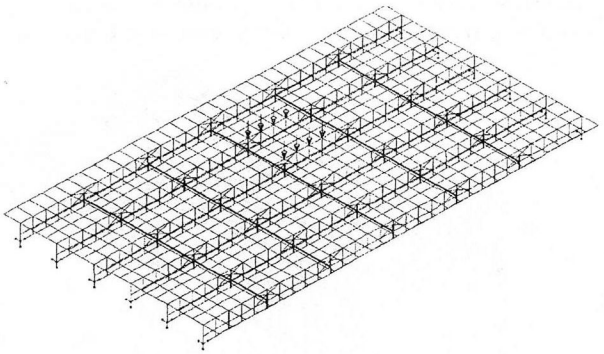

Рисунок 7 – Упрощенная расчётная схема нового пролётного строения с промежуточными диафрагмами

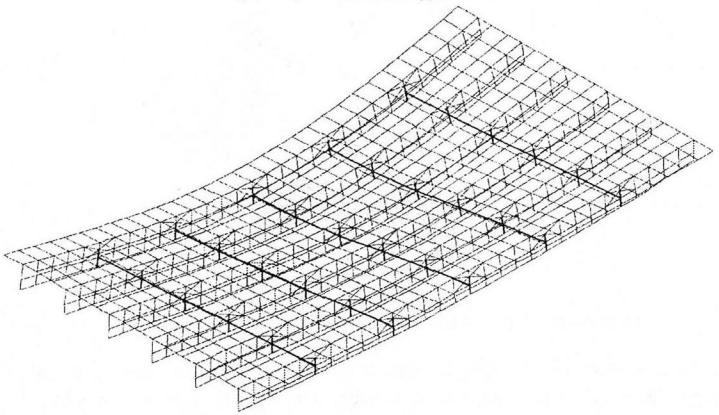

Рисунок 8 – Деформированная схема пролётного строения с диафрагмами

Для доказательства применимости предложенной упрощенной модели для общей оценки работы конструкций с промежуточными поперечными диафрагмами выполнен сравнительный расчёт, в котором диафрагмы представлены значительно детальнее. Характерные размеры такой диафрагмы допускают применение пластинчатых конечных элементов для моделирования работы такого монтажного элемента (рисунок 9).

Замыкающие трубчатые элементы в этом случае моделируются стержневыми конечными элементами. Для приближенного учёта влияния контакта диафрагмы и главной балки во всех узлах конечно-элементной сетки контактирующих поверхностей (исключая узлы установки замыкающих элементов) размещены контактные элементы (шарнирные «жесткие вставки») – стержневые конечные элементы, имеющие жесткость на

3 порядка выше жесткости других конечных элементов. Локальное сгущение конечно-элементной сетки в зоне контакта требует соответствующей зоны перехода в ребре и плите балки, реализованной треугольными пластинчатыми конечными элементами. Сопоставление упрощенной модели конструкции с уточненной показало общую сходимость результата в пределах 5 %, а по отдельным показателям – в пределах 3 %. Сравнение показателей приведено ниже. Незначительная погрешность по сравнению с более точным решением компенсируется значительно меньшим числом узлов и конечных элементов, что существенно при вариантном проектировании. В частности, при практически одинаковых значениях максимальных прогибов и наибольших продольных усилий в рабочей арматуре главных балок отмечена 5-кратная разница в количестве узлов и конечных элементов расчетных моделей (упрощенной и уточненной).

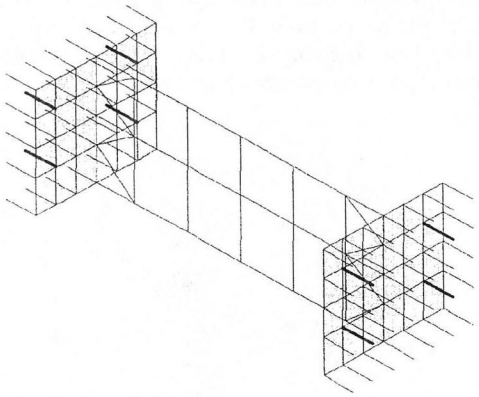

Рисунок 9 – Расчётная схема диафрагмы по уточненной модели

Для оценки эффекта влияния промежуточных поперечных диафрагм на перераспределение усилий между главными балками пролётного строения, помимо рассмотренного случая загружения нормативной нагрузкой Н14, сделаны сравнительные расчёты для нескольких случаев приложения нагрузки А14. В каждом из этих случаев рассматривались две полосы нагрузки А14 с учётом коэффициента полосности для крайней полосы $s_1 = 1{,}0$, для второй – $s_2 = 0{,}6$. Эффект влияния поперечных диафрагм на перераспределение усилий в главных балках пролётного строения заключается в том, что наиболее заметное снижение внутренних усилий в элементах конструкции происходит при размещении временной нагрузки над промежуточными главными балками. Такой случай наиболее характерен на практике для штатной эксплуатации такого пролётного строения. Заметное снижение изгибающих моментов в главных балках (на 22,3 %), в плите пролётного строения (на 49,8 %), продольных усилий в рабочей арматуре

главных балок (на 18,4 %) и максимальных прогибов (на 12,3 %) может способствовать сниженному и более равномерному износу элементов пролётного строения в условиях штатной эксплуатации.

Для анализа работы стальных замыкающих трубчатых элементов разработана подробная расчётная модель. Эта модель может быть встроена в представленную выше уточненную расчётную модель пролётного строения. Замыкающие трубчатые элементы моделируются пластинчатыми конечными элементами в соответствии со своими реальными размерами. Балки и диафрагмы моделируются пластинчатыми конечными элементами по своим срединным плоскостям. Для учета отпора сжатого бетона стыкуемых блоков по всей их реальной толщине впервые применен подход, состоящий в том, что взаимодействие внешней сплошной среды с цилиндрической оболочкой может быть эквивалентно представлено радиальными стержневыми конечными элементами со специально вычисленной эквивалентной жесткостью (рисунок 10) для плоского деформированного состояния. Эти элементы объединены жестким передаточным стержнем, проходящим по оси оболочки замыкающего трубчатого элемента.

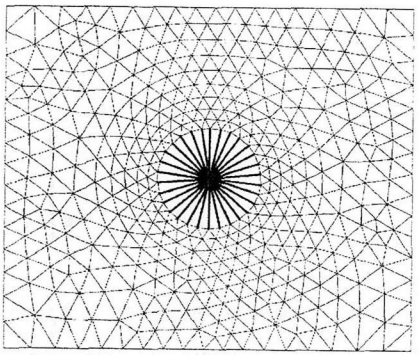

Рисунок 10 – Принципиальная схема замены массива стержнями эквивалентной жесткости

Эквивалентная жесткость стержневых элементов вычислена программно, как реакция бетона на единичную силу, приложенную по направлению соответствующего стержня. Симметричная расчётная схема данной задачи представлена на рисунке 11. Для генерации сетки треугольных конечных элементов использовалась разработанная на кафедре «САПР ТКиС» МИИТ программа, при этом оптимальные входные параметры были установлены путём проведения серии проверочных расчётов.

Применимость предложенной модели для анализа работы замыкающего трубчатого элемента подтверждена проверочным расчётом в комплексе Nastran на модели из объёмных тетраэдрических 10-узловых конечных элементов. Рассмотрена тестовая задача по моделированию рассматриваемого монтажного соединения под действием равномерно распреде-

ленной единичной нагрузки. Перемещения, вычисленные по модели Nastran, представлены на рисунке 12.

Сопоставление результатов решения тестовой задачи по предлагаемой модели и по модели из объёмных конечных элементов в комплексе Nastran представлено в таблице 1.

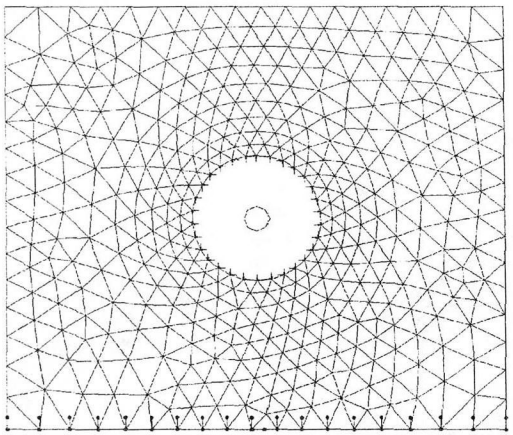

Рисунок 11 – Расчётная схема для определения эквивалентной жесткости стержневых конечных элементов в тестовой задаче

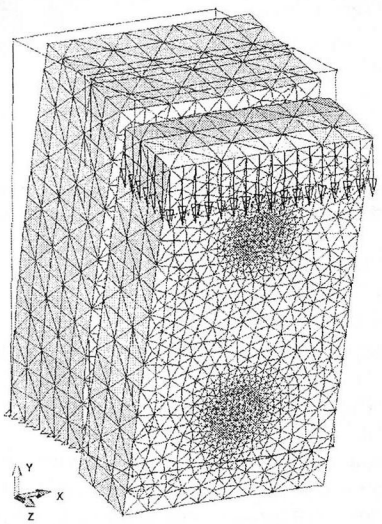

Рисунок 12 – Деформированная схема тестовой задачи в Nastran

Таблица 1 – Сравнение тестовых расчётных моделей стыкового соединения

Критерий сравнения	Предложенная модель	Модель Nastran
Максимальное перемещение, см	$1{,}2677 \cdot 10^{-3}$	$1{,}1640 \cdot 10^{-3}$
Наибольшие главные растягивающие напряжения σ_1, кгс/см^2	19,06	19,83
Наибольшие главные сжимающие напряжения σ_2, кгс/см^2	-25,29	-27,89
Наибольшие касательные напряжения τ_{12} (рисунок 13), кгс/см^2	20,5	21,0

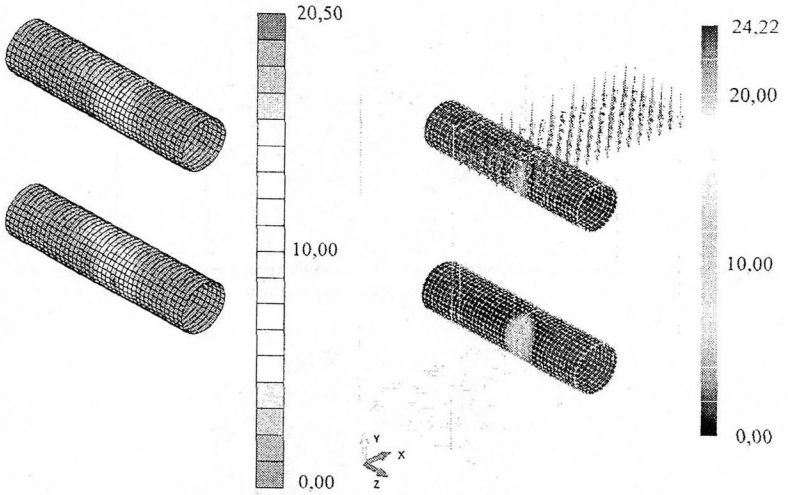

Рисунок 13 – Эпюры напряжений τ_{12} для тестовой задачи по предложенной модели (слева) и по проверочной модели в Nastran (справа)

Как видно, сходимость результатов по двум тестовым моделям находится в пределах 10 %, при этом отмечена 80-кратная разница в количестве узлов сравниваемых расчетных моделей.

Подробная модель стыкового соединения позволяет определить напряжения в замыкающих трубчатых элементах, в частности для двух поперечных диафрагм (наиболее нагруженных по изгибающему моменту) пролётного строения, рассмотренного ранее.

Расчётная схема для определения эквивалентной жесткости стержневых конечных элементов этой задачи представлена на рисунке 14. Рассчитываемая зона крепления диафрагмы имеет две оси симметрии, что отражено в закреплениях расчётной схемы. Полная расчётная схема стыка

представлена на рисунке 15. Классы бетона ребра балки (В35) и диафрагмы (В50) отражены в эквивалентных жесткостях стержневых конечных элементов. Результаты расчёта представлены в таблице 2.

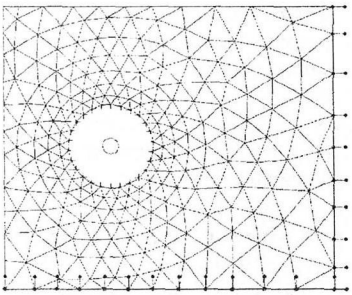

Рисунок 14 – Расчётная схема для определения эквивалентной жесткости стержневых конечных элементов при расчёте замыкающих трубчатых элементов

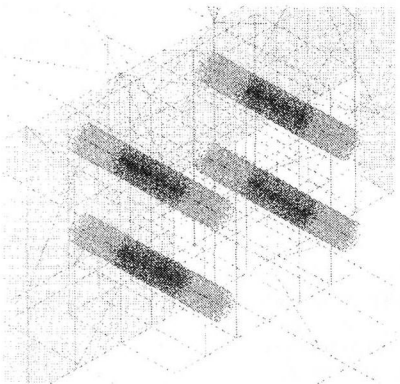

Рисунок 15 – Полная расчётная схема стыкового соединения

Таблица 2 – Наибольшие напряжения в замыкающих трубчатых элементах модели пролётного строения с поперечными диафрагмами

Напряжения	Крайняя диафрагма	Смежная диафрагма
Главные растягивающие σ_1, кгс/см^2	667	773
Главные сжимающие σ_2, кгс/см^2	-292	-354
Касательные τ_{12}, кгс/см^2	358	437

Из приведенных данных видно, что напряжения в стали замыкающих трубчатых элементов не превышают значения расчётного предела прочности для стали 10ХСНД R_s (3500 кг/см^2), приведенного в нормах. Для обес-

печения большего запаса прочности конструкция поперечных диафрагм допускает применение труб, имеющих больший диаметр или большую толщину стенки.

Заметим, что такая подробная модель стыкового соединения оправдана лишь для исследования работы замыкающего трубчатого элемента. Определить наиболее нагруженные диафрагмы позволяет разработанная уточненная модель, использующая пластинчатые конечные элементы для моделирования диафрагмы и стержневые конечные элементы для оценки усилий в замыкающих трубчатых элементах. Для оценки работы конструкции в целом такой уровень сгущения сетки конечных элементов излишен, в этом случае достаточно применение упрощенной модели. Рациональный уровень сгущения конечно-элементной сетки, не приводящий к чрезмерному росту размерности задачи, способствует эффективному использованию вычислительной мощности, а в некоторых случаях и уменьшению ошибок, поскольку облегчает контроль над корректностью сгенерированной конечно-элементной сетки. Результаты сравнения расчётных моделей сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Сравнение расчётных моделей пролётного строения

Критерий	Модель без диафрагм	Модель с диафрагмами – стержнями (упрощенная)	Модель с диафрагмами – пластинами (уточненная)	Подробная модель стыкового соединения
Максимальный прогиб,, см	1,813	1,592	1,663	1.658
Наибольшее продольное усилие в рабочей арматуре, тс	122	99	97	98
Число узлов	1110	1265	6545	16811
Число элементов	1050	1295	6660	16646

Проведенное исследование подтвердило работоспособность предложенных новых конструктивных форм из сборного железобетона, стыкуемых с помощью замыкающих трубчатых элементов.

Пятая глава раскрывает вопросы учёта требований действующих нормативных документов в линеаризованной расчётной модели, рассмотренной выше. Успешное практическое применение разработанных в работе расчётных моделей новых конструктивных элементов требует учёта современных подходов к моделированию нелинейного деформирования железобетона.

Моделированию нелинейного поведения железобетонных элементов под нагрузкой (в том числе, разработке общей деформационной модели) посвящены труды Н.И. Карпенко, В.М. Круглова, С.Ф. Клованича, Т.М. Пецольда, В.М. Бондаренко, M.P.Collins, F.J. Vecchio и др. В диссертационной работе задача интеграции разработанных расчётных моделей новых конструктивных элементов с какой-либо общей расчётной моделью не ставилась.

Нередко для быстрой оценки физической нелинейности в условиях плоского напряженного состояния и косого изгиба в практических инженерных расчётах строятся отдельные упрощенные расчётные модели.

В дополнение к новым конструктивным элементам из сборного железобетона и конечно-элементной модели по их расчёту предложен разработанный по упрощенной модели алгоритм, позволяющий учесть нелинейное поведение железобетона при конкретных режимах нагружения.

Разработанная по алгоритму программа взаимодействует с комплексом «Катран» и моделирует поведение поперечных сечений изгибаемых элементов. К настоящему времени, разработано два расчётных случая, отвечающих действующим нормам:

1. косой изгиб с учётом продольной силы,
2. плоский поперечный изгиб с учётом продольной силы.

Предложенный алгоритм имеет модульную структуру, который потенциально позволяет расширять поддерживаемые расчётные случаи, а также включать положения апробированных общих расчётных математических моделей железобетона.

Тестовые расчёты по разработанной программе показали хорошую сходимость результата с проверкой по методикам соответствующих нормативных документов.

Проведенные исследования показали, что за счёт некоторого снижения точности расчёта общую оценку работы предложенных конструктивных элементов можно выполнить по линеаризованной расчётной модели. Уточнить результат линейно упругого расчёта позволяет учёт физической нелинейности железобетона по разработанной программе.

ВЫВОДЫ

1. Анализ существующих конструктивных решений сборных железобетонных автодорожных пролётных строений мостов и двухуровневых эстакад показал, что применение сборного железобетона в таких конструкциях позволяет обеспечить высокий уровень индустриализации строительства, но нередко определяющую роль в надежности и технологичности таких конструкций играет выбранное техническое решение стыкового соединения монтажных элементов.
2. Разработаны новые конструктивные формы железобетонных монтажных элементов для балочных диафрагменных пролётных строений автодорожных эстакад и эстакад-галерей, отличающиеся тем, что для их

стыковки используются стальные замыкающие трубчатые элементы без омоноличивания стыкового соединения.

3. Предложена последовательность монтажа новых сборных конструкций пролётных строений, которая сводит к минимуму ограничения движения поездов по надстраиваемой железнодорожной магистрали в период строительства. Геометрия и предложенная технология установки разработанных монтажных элементов не требуют какого-либо нестандартного оборудования или специальной квалификации персонала на площадке строительства.
4. Разработана конечно-элементная расчётная математическая модель сборного железобетонного автодорожного пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами для оценки общей работы конструкции, отличающаяся тем, что диафрагмы моделируются стержневыми конечными элементами без учёта замыкающих трубчатых элементов.

   Разработана конечно-элементная расчётная математическая модель сборного железобетонного автодорожного пролётного строения с промежуточными поперечными диафрагмами, стыкуемыми с помощью стальных замыкающих трубчатых элементов, для выявления наиболее нагруженных монтажных элементов (включая оценку работы промежуточных поперечных диафрагм), отличающаяся тем, что диафрагмы моделируются пластинчатыми конечными элементами, а замыкающие трубчатые элементы моделируются стержневыми конечными элементами.
5. Разработана конечно-элементная расчётная математическая модель замыкающего трубчатого элемента, позволяющая оценить его напряженно-деформированное состояние, отличающаяся тем, что стыкуемые монтажные элементы моделируются стержневыми конечными элементами эквивалентной жесткости и пластинчатыми конечными элементами, существенно сокращая размерность задачи.
6. В рамках созданных математических моделей в диссертации выработаны практические рекомендации по выбору уровней сгущения конечно-элементной сетки и по выбору вариантов моделей стыковых соединений в зависимости от задач расчёта.
7. Разработано программно-математическое обеспечение для расчёта поперечных сечений железобетонных элементов на косой изгиб и плоский поперечный изгиб с учетом требований действующих нормативных документов, отличающееся тем, что данное программно-математическое обеспечение имеет модульную структуру, позволяющую комбинировать и расширять расчётные случаи без внесения изменений в программное обеспечение.
8. Показан эффект влияния промежуточных поперечных диафрагм на перераспределение усилий в главных балках пролётного строения с помощью разработанных расчетных математических моделей на при-

мере разрезного сборного железобетонного пролётного строения для автодорог, заключающийся в том, что наиболее заметное снижение внутренних усилий в элементах конструкции происходит при размещении временной нагрузки над промежуточными главными балками.

9. В результате изучения применяемых и перспективных решений стыковых соединений сборных железобетонных конструкций установлено, что новые стальные замыкающие трубчатые элементы, разработанные в МИИТ, отличаются низкой трудоёмкостью монтажа, что обеспечивает быстроту монтажа и стабильное качество стыка на уровне, заложенном при проектировании.

   В диссертационной работе впервые поставлены и решены задачи по применению стальных замыкающих трубчатых элементов для развития конструктивных форм пролётных строений транспортных эстакад из сборного железобетона.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Пушков, Н.М. К вопросу автоматизации нормативных проверок железобетонных пролетных строений автодорожных эстакад / Н.М. Пушков // Наука и техника транспорта. – 2010. – №4. – С. 48–56;
2. Пушков, Н.М. Оценка предельного состояния железобетонной балки при плоском поперечном изгибе на основе нелинейной деформационной модели / Н.М. Пушков // Транспортное строительство. – 2012. – №7. – С. 18–20;
3. Пушков, Н.М. Некоторые вопросы интеграции технологии расчета железобетонных поперечных сечений с конечноэлементным программным комплексом / Н.М. Пушков // Наука и техника транспорта. – 2012. – №2. – С. 48–56;
4. Нестеров, И.В. К задаче прочностного анализа железобетонных балочных элементов конструкции с учетом нелинейного поведения материала / И.В. Нестеров, Н.М. Пушков // Транспортное строительство. – 2013. – №2. – С. 22–23.

В других изданиях:

5. Пушков, Н.М. Модель автоматизации нормативных проверок сечений железобетонных автодорожных эстакад / Н.М. Пушков // Труды 69-й Научно-методич. и научно-исслед. конф., МАДИ, 2011. – М., 2012. – ч.2. – С. 20–29;
6. Пушков, Н.М. Оптимизация поиска предельного состояния железобетонного пролетного строения / Н.М. Пушков // Сборн. статей Междун. научно-практ. конф. 27-28 фев. 2013 г. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. – С. 220–223.

Подписано к печати 11.02.14 Формат 60x80 1/16

Заказ № 851 Объём 1,5п.л. Тираж 80 экз.

УПЦ ГИ МИИТ, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.