На правах рукописи

Проценко Дмитрий Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ УНИВЕРСАЛЬНОГО СБОРНО-РАЗБОРНОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ С БЫСТРОСЪЕМНЫМИ ШАРНИРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Специальность 05.23.11 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена на кафедре «Мосты» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СГУПС)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бокарев Сергей Александрович

Официальные оппоненты: **Мячин Валерий Николаевич**
доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Научно-исследовательский и проектный институт территориального развития и транспортной инфраструктуры»

Тряпицын Юрий Владимирович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения» института транспортного строительства ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»**

Защита состоится «05» июля 2018 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.174.02, созданного на базе федеральных государственных бюджетных образовательных учреждений высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» и «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191, ауд. 224.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» и на сайте www.stu.ru.

Отзывы на диссертацию и автореферат диссертации с указанием Ф.И.О., почтового адреса, телефона, адреса электронной почты, наименования организации и должности, подписанные и заверенные печатью организации, в двух экземплярах просим направить в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан «15» мая 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент

Ланис Алексей Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение транспортной доступности при чрезвычайных ситуациях, таких как наводнение, землетрясение, техногенная катастрофа и др. является приоритетной задачей при организации мероприятий по восстановлению пострадавших районов и спасению человеческих жизней. Восстановление транспортных артерий автомобильного и железнодорожного движения быстровозводимыми конструкциями позволяет организовать на отрезанную стихией территорию доставку средств первой необходимости.

В настоящее время Министерство чрезвычайных ситуаций эксплуатирует разработки советского времени, технические решения которых не удовлетворяют современным требованиям СП 35.13330.2011 Мосты и трубы и ГОСТ Р 52748-2007, а для их монтажа необходимо применение тяжелой техники и большого числа монтажников. Помимо прочего, не обеспечена безопасность передвижения в соответствии с требованиями ГОСТ 26804-2012 в части установки барьерного ограждения, что увеличивает вероятность выключения из работы несущих элементов при наезде транспорта на пролетных строениях с ездой по низу и выезда временной нагрузки за границы проезжей части для конструкций с ездой поверху. Основную массу конструкций временных мостов разрабатывали для решения тактических задач в военных целях, и эксплуатация их для гражданского строительства, влечет за собой неоправданный перерасход материала и дополнительные расходы на их возведение.

Сборно-разборные мосты являются неотъемлемой частью инфраструктуры любого развивающегося района: для развертывания сети новых дорог требуется пионерная прокладка искусственных сооружений, служащих для переправки транспортных средств, к строительным площадкам через водные и иные преграды. Их применяют крупные организации, разрабатывающие новые и эксплуатирующие старые месторождения полезных ископаемых (нефть, газ, золото, алмазы, руда и т.д.), горно- и лесозаготовительные предприятия, иные промысловые компании. Для них экономически эффективно применение конструкций многоразового применения, так как после окончания разработки месторождения все оборачиваемое имущество перевозят на другую строительную площадку.

Стагнация в разработке проектных решений привела к сужению предложений рынка сборно-разборных искусственных сооружений до конструкций средних автодорожных разборных мостов и понтонно-мостовых парков. Поэтому очевидно, что потребность в разработке новых решений и усовершенствовании существующих конструкций временных мостов высока. Следует обеспечить их максимальную универсальность с возможностью изменения геометрических характеристик, отвечающих за изменение длины, грузоподъемности, габарита проезда и др., чего не может предложить ни один тип существующих сборно-разборных мостов, что обуславливает актуальность диссертационного исследования.

Степень разработанности проблемы. Теоретические и практические аспекты диссертационного исследования были сформированы на основе изучения и анализа работ отечественных и зарубежных ученых, ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, высших учебных заведений и специалистов мостостроения.

В монографии А.В Кручинкина «Сборно-разборные временные мосты» затронуты вопросы, касающиеся обзора существующих решений, технологий их монтажа и норм проектирования временых конструкций, актуальных времени ее написания. Крупным специалистом в области временных наплавных мостов и паромных переправ был Телов В.И, им были разработаны теоретические основы расчета этих типов мостовых переправ и предложены соответствующие конструктивно-технологические решения. В работе Н.П. Дианова и Ю.С. Милородова «Табельные автодорожные разборные мосты» приведены о гражданских и военных временных мостах, применяемых для их производства материалах, а также способах транспортировки и монтажа. Специалисты В.Н Мячин, Васильев А.А, Курыпов А.А и Жарко А.А. разработали рекомендации по применению и оценке экономической эффективности разных типов существующих конструкций временных мостовых сооружений на дорогах Российской Федерации.

Помимо вышеперечисленных ученых, темой проектирования, изготовления и внедрения временных сооружений мостов, занимались Бахтиаров И.П, Беликов И.П, Бокарев С.А, Вдовин Ю.М, Гриднев С.Ю, Жинкин А.А, Захаров В.А, Картопольцев В.М, Корнеев М.М, Курлянд В.Г, Мартенс Л.К, Мингалиев А.Р, Овчинников И.Г, Перевозников Б.Ф, Петров К.В, Поддубный А.А, Попов В.Ю, Рязанов Ю.С, Светлов Л.Л, Селивестров В.А, Тарнаруцкий В.А, Трефилов В.Ф, Цвей И.И и Шипков А.С. Анализ работ авторов позволил выявить наиболее острые проблемы существующих сборно-разборных конструкций мостов САРМ, БАРМ, МАРМ, ПМП, ТММ, УМК и др. и найти пути их решения.

За рубежом подобные исследования проводили Antwan T, Artemov V, Burkett R, Crocetti R, Gorbatiuk Y, Grace S, Kopczak L, Konishi J, Morgan P, Nabil F, Nash T, Pidkoshanaia O, Reem H, Soldatov K, Taylor S, Thomas A, Vivek G. В своих работах они описывают конструкции как схожие с отечественными решениями, так и отличные от них. При этом, в иностранной литературе, нормы проектирования временных мостов выделены в отдельные документы, регламентирующие четкие требования и допущения. Кроме того, обобщение результатов работ ученых из США, Канады, Англии и Европы дали информацию о современных технологиях производства и монтажа временных пролетных строений, используемых членами Североатлантического Альянса.

Таким образом, была сформирована база, необходимая для совершенствования универсальной сборно-разборной конструкции пролетного строения многократного применения и технологии ее сооружения.

Объектом исследования являются временные мосты многократного применения, запроектированные под автодорожные и пешеходные нагрузки.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние проезжей части, несущих элементов конструкции и быстро съемных

соединений сборно-разборного временного универсального пролетного строения в процессе его эксплуатации и монтажа.

Цель диссертационного исследования заключается в обеспечении доступности транспортного сообщения через водные и иные преграды на основе совершенствования конструкции и технологии монтажа временных быстровозводимых сборно-разборных мостов с возможностью изменения их геометрических характеристик – длины, грузоподъемности, габарита и пр., применяя однотипные элементы.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Совершенствование конструкции временного быстровозводимого сборно-разборного пролетного строения, отвечающего современному уровню нагрузок, технологических параметров, требованиям геометрии и безопасности, имеющего возможность изменения конструкции под индивидуальные требования длины, ширины проезда, типа пропускаемой нагрузки.
2. Выявление напряженно-деформированного состояния всех элементов усовершенствованной конструкции при их работе в самых невыгодных сочетаниях временной нагрузки.
3. Разработка технологии сборки и монтажа пролетного строения в проектное положение, позволяющей осуществлять возведение конструкции в полевых условиях без применения тяжелой техники.
4. Проведение стендовых испытаний пролетного строения и настилов, сравнение результатов испытаний с расчетными значениями нагрузок и перемещений.
5. Проведение натурных испытаний конструкции, оценка значений параметров ее работы с учетом реального уровня загружения подвижной нагрузкой.
6. Внедрение разработки на дорогах РФ.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем**:**

1. Получен коэффициент шарнирного закрепления $k_{ш}$, учет которого необходим при расчете инженерным методом одноосевого цельнолитого закрепления двух металлических элементов. Предложенный коэффициент следует учитывать при расчете прочности соединительного элемента на срез, по аналогии с расчетом не фрикционного болтового соединения по методике СП 35.13330.2011 Мосты и трубы.
2. Получены конкретные результаты испытаний деревянных плит в композиционной оболочке, которые показали высокую корреляцию со значениями, полученными методом конечных элементов. Плиты способны выдерживать уровень загружения современными и перспективными нагрузками до $K = 14$, что обосновывает возможность применения их в качестве дорожного и тротуарного настила пролетных строений взамен металлических и железобетонных элементов.
3. Разработаны принципы проектирования сборно-разборных конструкций многократного применения, отвечающие современным требованиям в соответствии с действующими нормативными документами, реальным уровнем

производственных мощностей заводов-производителей и возможностей строительных организаций, которые регламентируют условия, необходимые для разработки новых решений временных мостовых переходов.

4. Получен коэффициент циклических нагрузок $k_{\text{цикл}}$, учитывающий потерю прочностных характеристик полимерного материала по мере его эксплуатации, необходимый для расчета дорожного настила и тротуарных плит мостов, выполненных из такого материала. После серии экспериментальных исследований рассчитано значение коэффициента для длительно циклически нагруженных плит.

Теоретическая и практическая значимость. Усовершенствована инженерная методика расчета шарнирного закрепления, учитывающая пластику элементов металлического узла: получен коэффициент $k_{\text{ш}}$, который необходимо дополнительно вводить в расчет соединительного элемента на срез в рекомендованную СП 35.13330.2011 Мосты и трубы зависимость.

Аналитическим методом вычислен коэффициент циклического нагружения $k_{\text{цикл}}$, необходимый для расчета конструкций, выполненных из полимерного материала, работающих на изгиб. Коэффициент учитывает потерю прочности и жесткости во время его эксплуатации.

Разработаны принципы для проектирования временных мостов, согласующиеся с действующими нормативными документами и возможностями производителей и строительных организаций.

Было установлено моделированием и конечно-элементным расчетом, что рекомендуемый действующими нормативными документами СП 35.13330.2011 Мосты и трубы и ГОСТ Р 52748-2007 уровень нагружения временной подвижной нагрузкой ниже нагрузки, создаваемой реально обращающимися транспортными средствами. Обоснована необходимость учета этого фактора при расчете плиты настила проезжей части пролетных строений.

Выполненные исследования позволили усовершенствовать конструкцию и технологию сооружения универсального пролетного строения многократного применения, для чего был применен конструктивно-технологический подход к проектированию временных мостов. Многозадачная сущность подхода состояла в обеспечении конструкции современным нормативным требованиям, удовлетворяющим уровню нагружения, технологическим параметрам, а также параметрам безопасности.

Практическая значимость исследований состоит в создании усовершенствованной универсальной конструкции пролетного строения и технологии его возведения, дающей возможность изменения геометрических параметров конструкции отвечающих за длину, габарит и грузоподъемность в широких пределах, чего не может обеспечить ни одна из существующих конструкций.

Конструкция пролетного строения и технология его монтажа включены в методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию применения временных мостов (эстакад, путепроводов) на дорогах государственной компании «Автодор» - 2015 г., и рекомендованы к строительству

как экономичные и эффективные решения в сравнении с другими пролетными строениями временных мостов.

Внедрение. В настоящее время построено неразрезное универсальное пролетное строение длиной 72.93 метра для нужд ГК «Автодор» и ведется строительство 1170 погонных метров пролетных строений на восемнадцати объектах строительства магистрального газопровода «Сила Сибири» для нужд ПАО «Газпром». Самый протяженный объект – неразрезное десятипролетное строение по схеме 18+8x21+18 габаритом проезда Г-6.5 под нагрузки класса *К=11* в соответствии с СП 35.13330.2011 Мосты и трубы общей длиной 204 метра.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения диссертационной работы использован комплекс методов исследования, включающий в себя: метод системного анализа в транспортном строительстве, литературный и патентный поиск, метод конструктивно-технологического проектирования, экспериментальные методы исследования конструкций, натурные тензометрические исследования, анализ экспериментальных данных, конечно-элементное моделирование ЭВМ, а также синтез результатов теоретических и экспериментальных работ.

Достоверность результатов работы подтверждена согласованностью экспериментальных данных и натурных исследований, проводимых при помощи специального сертифицированного оборудования, с результатами конечно-элементного расчета, выполненными в апробированных и верифицированных программных комплексах Midas Civil и Ansys Workbench.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованное решение универсального сборно-разборного временного пролетного строения многократного применения, технологии его монтажа, а также конструкции деревоплиты в композиционной оболочке и полимерной плиты, используемых в качестве пешеходного и дорожного настила проезжей части мостов.
2. Экспериментальные стендовые и натурные исследования пролетного строения и элементов проезжей части, проведенные в рамках диссертационного исследования. Результаты сравнения их с конечно-элементными расчетами.
3. Значение коэффициента шарнирного закрепления $k_{ш}$, результатов нелинейного конечно-элементного моделирования работы соединения металлических несущих элементов пролетного строения моста цельнолитым цилиндрическим шарниром, с учетом пластических свойств материала и инженерного метода расчета такого узла на срез.
4. Эмпирически полученный коэффициент циклического загружения $k_{цикл}$, рассчитанный после серии испытаний, учитывающий деградацию прочности и жесткости полимерного материала по мере его эксплуатации.

Основные положения диссертационного исследования были доложены и обсуждены на форумах, выставках и конференциях:

1. Международный форум «Транспорт Сибири», г. Новосибирск, 28.05.2014-31.05.2014.

2. Всероссийский фестиваль науки «NAUKA0+», г. Новосибирск, 03.10.2014-05.10.2014.

3. Форум «Дороги Мосты Тоннели» 2014, г. Санкт-Петербург, 24.09.2014-26.09.2014.

4. Международная научно-техническая конференция «Применение инновационных технологий в транспортном строительстве», г. Сочи, 16.10.2014-18.10.2014.

5. III Всероссийский конкурс «Лидер освоения инноваций в дорожном хозяйстве Российской Федерации 2014года», г. Санкт-Петербург, 20.11.2014-21.11.2014.

6. VIII Международная научно-техническая конференция «Политранспортные системы», г. Новосибирск, 17.11.2014-18.11.2014.

7. Совещание ГК «Автодор» по вопросам применения современных и инновационных технологий при проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог, г. Москва, 26.02.2015.

8. Конференция «Расчет и проектирование мостов с использованием ПК MIDAS», г. Омск, 08.04.2015.

9. Международный форум «Транспорт Сибири», г. Новосибирск, 27.05-2015-30.05.2015.

10. III Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» в рамках VI Всероссийского фестиваля науки «NAUKA0+», г. Томск, 22.11.2016-25.11.2016.

11. Конференция «Инновационный транспорт-2016: специализация железные дороги» посвященная 60-летию УРГУПС, г. Екатеринбург, 16.11.2016-17.11.2016.

12. XI Международная выставка «Транспорт России», г. Москва, 26.11.2016-02.12.2016.

13. XI Международная выставка «Транспорт России», г. Москва, 17.11.2016-23.11.2017.

Структуру диссертации составляют введение, четыре раздела, заключение и список литературы. Полный объем диссертационного исследования составляет 188 страниц, 85 рисунков, 14 таблиц, 12 формул и 5 приложений. Список литературы содержит 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации приведены существующие и разработанные за последние 70 лет отечественные и зарубежные решения временных мостовых переходов из металла, дерева, бетона, железобетона и пластика. В отечественной практике наиболее распространенным типом временных мостов, на сегодняшний день, являются конструкции средних разборных автодорожных мостов и понтонно-мостовой парк, получившие широкую область применения благодаря их наличию на базах мобилизационного резерва в крупных населенных пунктах. Самыми быстровозводимыми конструкциями считаются временные механизированные

мосты, скорость монтажа которых достигает 200 метров в час, однако, из-за высокой стоимости они не получили широкого распространения.

Действующие нормативные документы по проектированию временных мостов носят рекомендательный характер, так как они предназначены для проектирования капитальных сооружений, а специальной нормативной литературы для таких конструкций нет. Несмотря на это, существуют общие требования к временным мостовым конструкциям, описанные в различных монографиях, методических рекомендациях и стандартах организаций, посвященных этой теме. В главе собраны общие правила проектирования таких конструкций, которыми следует руководствоваться при конструировании, производстве и строительстве временных мостов, чтобы получить конструкцию экономически эффективную, материалоемкую, быстромонтируемую, минимально трудозатратную для монтажа и т.д.

Затронут важный вопрос о проектировании плиты настила проезжей части мостов, так как при расчете временной конструкции требование СП 35.13330.2011 Мосты и трубы, регламентирующее толщину листа не менее 14 мм для металлических конструкций, приводит к избыточному собственному весу проезжей части. Согласно требованиям ГК «Автодор», уровень временного нагружения конструкций должен соответствовать классу современной нагрузки $K = 11$, а не перспективной $K = 14$, что обосновывает необходимость индивидуального расчета толщины настила для каждой конструкции.

Показана практика применения композиционных материалов в мостостроении, в том числе для временных мостов, что стало традиционным решением за рубежом. Одной из таких конструкций является деревоплита в композиционной оболочке, которую применяют в качестве плит настила на новых и реконструируемых мостовых переходах взамен вышедших из строя металлических плит. В основном, в работе элемента участвует дерево, в то время как композиционный материал защищает конструкцию от негативных внешних химических и биологических воздействий. Также, такие конструкции применяют для строительства шкафных стенок и иных элементов мостов.

Описаны способы монтажа временных конструкций, которые требуют иных подходов, нежели чем строительство капитальных сооружений. Временные мосты, как правило, имеют инвентарные укрупненные элементы, сборка которых в готовую конструкцию производится на стапеле посредством быстросъемных болтовых соединений и «пальцев». Схема сборки каждого временного моста отработана многократно, что позволяет, при наличии инструкции по сборке, производить монтаж в короткий промежуток времени. После сооружения все конструкции должны быть обследованы и по требованию заказчика испытаны. Порядок проведения испытаний в обязательном порядке должен включать проверку всех быстросъемных элементов, а также элементов, работающих на растяжение-сжатие и разнонаправленный изгиб. При необходимости, класс по грузоподъемности конструкции может быть снижен.

Определены основные требования к современным временным конструкциям, согласно которым длины всех проектируемых новых сооружений должны быть

кратны трем метрам; обеспеченная длина разрезного пролетного строения должна быть менее 60 метров; максимальная масса отдельных элементов должна быть не более одной тонны; геометрические характеристики конструкции должны обеспечивать универсальность, заключающуюся в возможности изменения длины, габарита и грузоподъемности пролетного строения; должна быть обеспечена высокая скорость монтажа конструкции, не менее 25 метров в сутки и многократность ее применения, а так же возможность доставки элементов моста в любой регион РФ за промежуток времени, не превышающий 24 часа.

Во второй главе изложен процесс конструирования и расчета, проведенных автором совместно с группой проектировщиков, конструкции универсального пролетного строения многократного применения, прототипом которого послужили самые распространенные зарубежные конструкции временных мостов Bailey Bridge. На сегодняшний день существует не менее десяти производителей по всему миру, которые реализуют подобные временные искусственные сооружения, однако, их применение на территории Российской Федерации невозможно по ряду причин, связанных с нормативными требованиями нашего государства по обеспечению габарита проезда, грузоподъемности и невозможности производства их из зарубежных марок сталей на территории нашей страны.

Поэтому, пролетное строение и технологию его сооружения совершенствовали на основании следующих отличительных принципов:

1. Пролетное строение рассчитано на возможность восприятия классов нагрузок в интервале $K = 2 \dots 14$ с массой одиночного экипажа от 15 до 100 тс. Все зарубежные аналоги рассчитаны на восприятие нагрузок от одиночной тележки в интервале 40.78…61.19 тс.
2. Габарит пролетных строений рассчитан на пропуск одно- и двухполосного движения в соответствии с СП 35.13330.2011 Мосты и трубы, Г-4.5, Г-6.5 и Г-8.0. В зарубежных конструкциях этот показатель равен 3.15 метра вне зависимости от числа полос движения.
3. Вариации длин пролетного строения кратны трем метрам для возможности замены реконструируемых мостов на территории Российской Федерации.
4. Сортамент и типы металлов для проектирования пролетного строения обеспечивают возможность производства конструкций на любых отечественных заводах.
5. Предельная масса сборочных единиц назначена до 1000 кг с целью возможности сборки пролетного строения средствами малой механизации, доступными любой строительной организации.

Описана конструкция усовершенствованного пролетного строения моста, в которой главным несущим элементом является ромбическая ферма с параллельными поясами, так как очевидным преимуществом решетчатых систем является экономия металла по сравнению с балочными конструкциями тех же пролетов.

Разработана технология строительства конструкции, в соответствии с которой монтаж пролетного строения возможно осуществить двумя способами:

надвижкой при помощи аванбека и установкой собранной конструкции в проектное положение краном. Оба варианта обеспечивают скорость монтажа не менее 25 метров в сутки. При отсутствии квалифицированного персонала время монтажа увеличится, в среднем, в 1.2-1.4 раза.

Для удобства сборки пролетных строений без применения тяжелой техники, фермы выполнены сборными, сборочной единицей которых является панель, габаритом 3.14х2.00х0.24 метра, а масса 614 кг, что позволят изменять длину пролетов кратно трем метрам и монтировать ее при помощи средств малой механизации. Объединение панелей в ферму происходит посредством пин-соединений – закреплений с применением соединительных «пальцев», ограниченных с одной стороны уширением тела соединяемого элемента, с другой – шплинтом так, что перемещение тела «пальца» вдоль своей оси не допускается. Пины – это элементы сплошного круглого сечения, обеспечивающие поворот соединяемых элементов друг относительно друга в одной плоскости, работающие на срез.

Панели крепят к поперечным балкам, которые воспринимают временную нагрузку от проезжей части, передавая ее на основные несущие элементы. Поперечные балки являются самыми объемными элементами конструкции. При двухполосном габарите проезжей части Г-8, их длина равна 11.73 метра, а масса составляет 980 килограмм.

Сопряжение пролетного строения с опорными частями происходит через опорные стойки, которые устанавливают в точках опирания конструкции. На одной из опор устанавливают инвентарные линейно-неподвижные опорные части, на другой/других - скользящего типа.

Тротуарные консоли с шириной прохода 0.75 м прикрепляют к поперечным балкам на болтах. На пешеходных трапах установлены металлические перила высотой 1.1 м в соответствии с действующими нормативными требованиями.

Разработаны несколько типов мостового полотна проезжей части, которые посредством болтов крепят к поперечным балкам: ортотропные плиты со сплошным металлическим покрытием, ячеистые плиты, металлические прогоны с деревянным покрытием и деревокомпозиционные плиты.

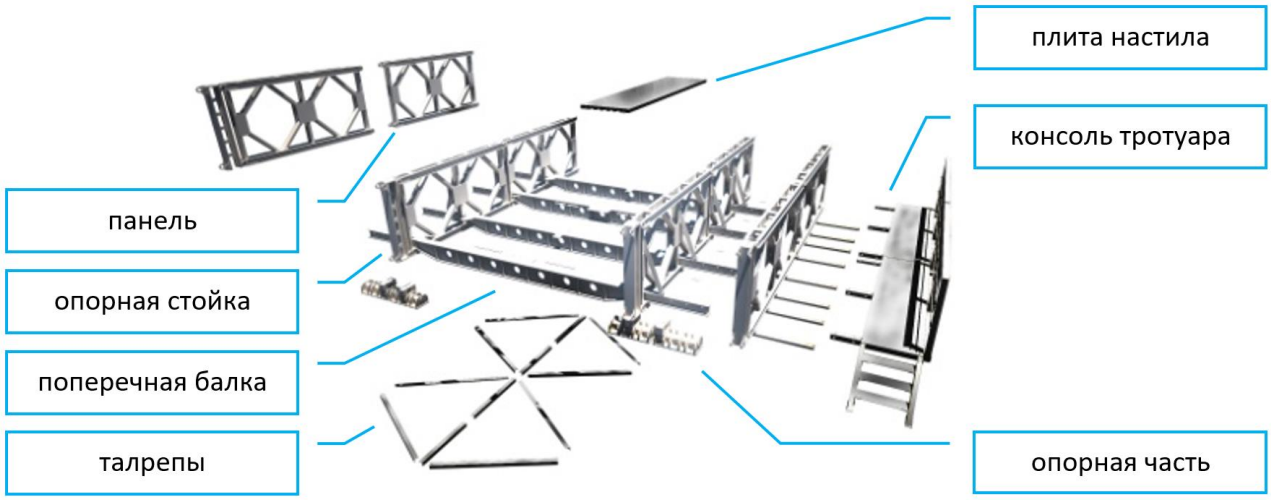

Рисунок 1 – Общий вид двух секций пролетного строения моста ТАЙПАН

Приведены результаты расчета всех элементов в общих расчетных стрежневых схемах, выполненных методом конечных элементов в программной среде Midas Civil. Для каждого в отдельности взятого элемента, выполненного из объемных и/или плитных элементов, интегрированного в общую расчетную схему для получения более полной картины их напряженно-деформированного состояния, учитывая пространственную работу элементов пролетного строения, приведены значения напряжений и перемещений полученные при расчете ЭВМ.

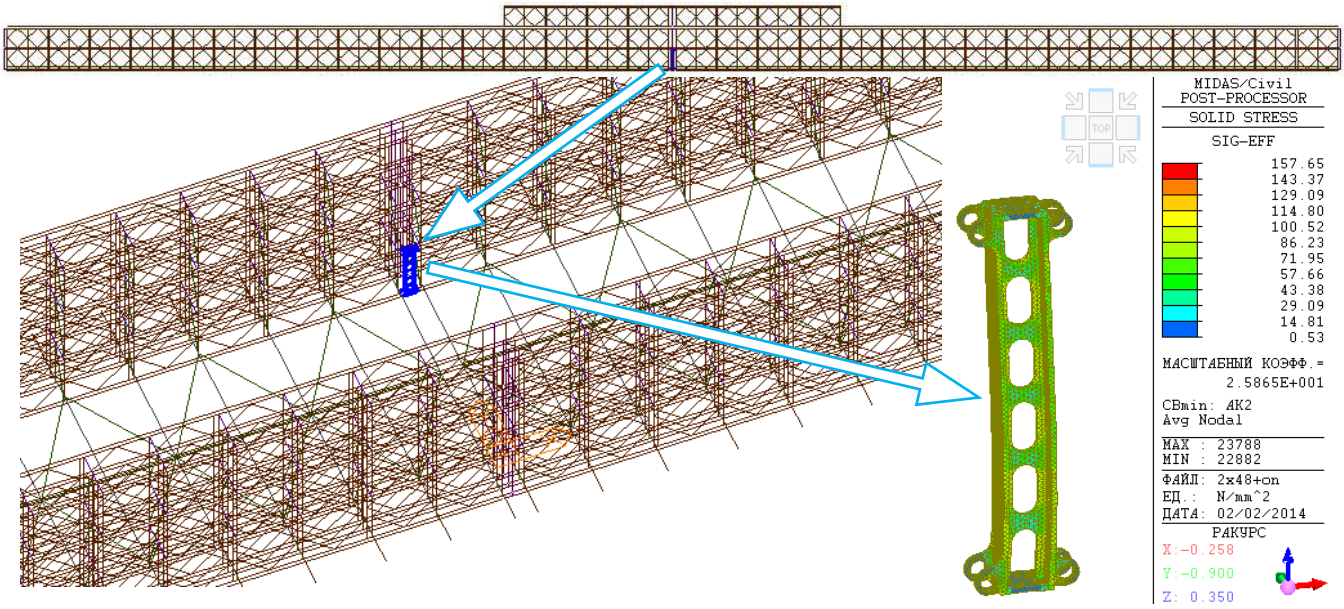

Рисунок 2 – Опорная стойка из объемных элементов интегрированная в стержневую неразрезную схему 2х48 м

В результате проведенных расчетов настильного листа плит проезжей части было получено, что давление от реально обращающейся нагрузки грузового транспортного средства общей массой 80 тонн, у которого давление на переднюю ось составляет 11.5 тонн при ширине колеса 325 мм больше, чем та же величина НК рекомендованная по СП:

$$p_{\text{нк}} = \frac{P_{\text{нк}} \cdot \gamma_{f_\text{нк}} \cdot (1+\mu)_{\text{нк}}}{S_{\text{нк}}} = 61.9 \cdot K \text{ кН/м}^2 = 680.7 \text{ кН/м}^2 \quad (1)$$

$$p_{\text{гр}} = \frac{P_{\text{гр}} \cdot \gamma_{f_\text{гр}} \cdot (1+\mu)_{\text{гр}}}{S_{\text{гр}}} = 867.9 \text{ кН/м}^2 \quad (2)$$

Потому, настильный лист рассчитан из предположения перемещения по нему реальной нагрузки, а окончательная толщина листа настила составила $t_{\text{л}} =$ 6 мм.

Было проведено сравнение расчетов шарнирно закрепленного узла пин-соединения инженерным методом, рекомендованным в СП 35.13330.2011 Мосты и трубы, и конечно-элементным расчетом с учетом нелинейной работы металла, проведенным в двух программных средах: Midas Civil и ANSYS Workbench.

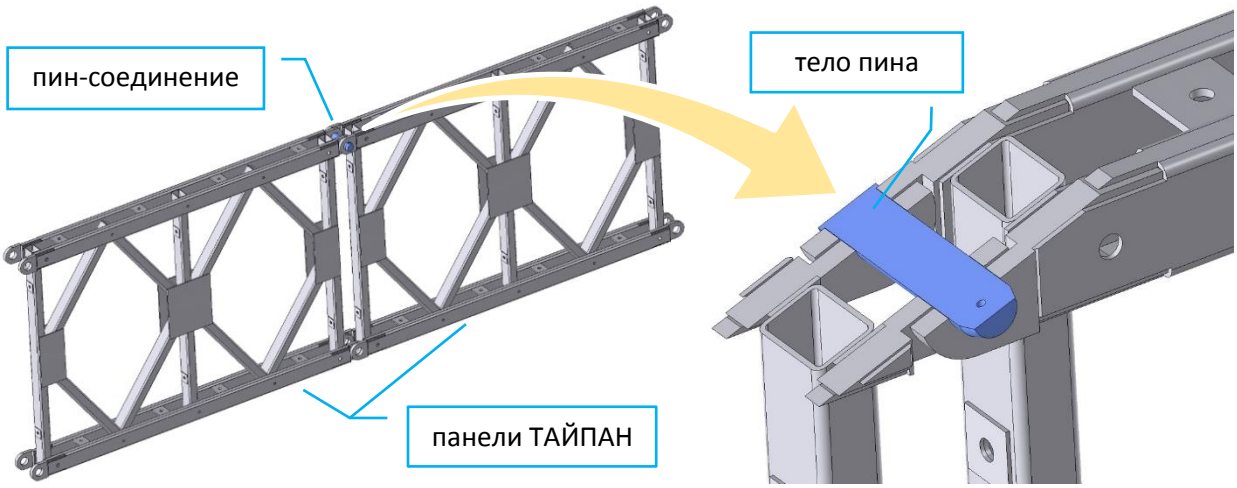

Рисунок 3 – Конструкция узла крепления панелей пролетного строения моста ТАЙПАН

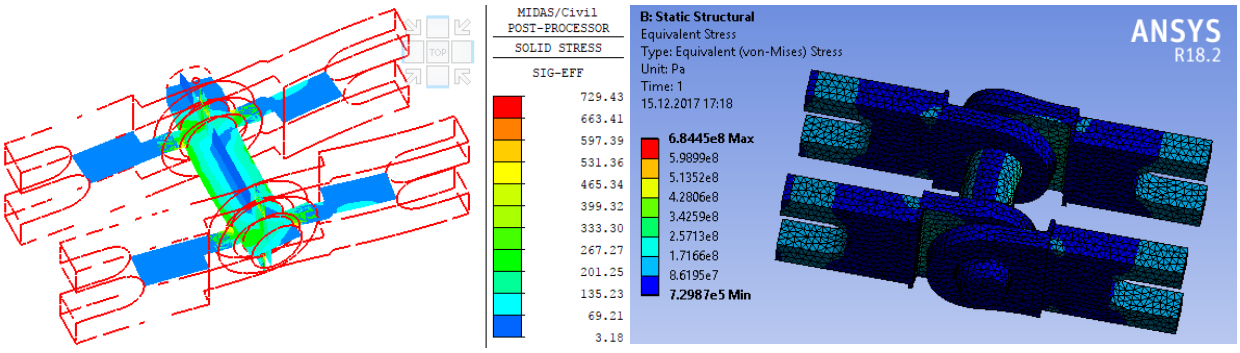

Рисунок 4 – Эквивалентное напряженно-деформированное состояние пин-соединения слева - Midas Civil; справа - ANSYS Workbench

В результате проведенной работы оказалось, что для такого типа закрепления в классический инженерный расчет на срез соединительного элемента необходимо вводить дополнительный коэффициент шарнирного закрепления $k_{ш}$, который будет учитывать нелинейность работы узла:

$$N_b = R_{bs} \cdot A_{bs} \cdot m_b \cdot n_s \cdot k_{ш}., \quad (3)$$

Для обобщения более 5 000 проведенных расчетов пролетных строений был введен коэффициент типизации $K_{тип}$, полученный для каждой схемы отдельно. Коэффициент типизации – отношение предельно допустимых прочности по материалам и жесткости в соответствии с действующими нормативными документами к полученным в каждом конкретном случае соответствующим характеристикам пролетных строений из типовых элементов.

В заключении раздела приведен принцип изменения грузоподъемности сборно-разборного пролетного строения в соответствии с уровнем предполагаемых подвижных нагрузок, за счет чего в каждом случае снижена материалоемкость, а коэффициент типизации стремится к единице ($K_{тип} \to 1$). Описаны способы монтажа пролетного строения в проектное положение методом конвейерно-тыловой сборки с применением аванбека, выполненного из типовых элементов, и

методом монтажа цельного пролетного строения при помощи кранового оборудования.

В третьей главе диссертационного исследования с целью проверки адекватности конечно-элементной расчетной модели пролетного строения, а также проверки собираемости конструкции и возможности ее монтажа неквалифицированными рабочими, был изготовлен прототип со съездами, длиной пролетного строения 18.31 метра, габаритом Г-4.5+2х0.75, общей длиной с аппарелями 32.76 метра. Автором была разработана программа испытаний и произведена обработка их результатов.

Рисунок 5 – Проведение статических испытаний на масштабной модели ТАЙПАН

Сборка моста заняла 14 часов силами четырех рабочих с завода и одного машиниста крана. После сборки были проверены геометрические параметры конструкции и ее нивелирование, которое показало уровень прогибов от собственного веса $\Delta_{\text{лев}} = 22$ мм. и $\Delta_{\text{прав}} = 28$ мм. для левой и правой ферм, что составляет $W_{\text{лев}} = \frac{1}{833}l$ и $W_{\text{лев}} = \frac{1}{654}l$ от длины пролета. Причиной такой величины прогибов послужила разница в диаметрах пин-соединений и отверстий в панелях для них равная 4 мм. Последующие измерения и сравнения результатов с расчетными данными были произведены с учетом асимметрии конструкции. После сборки были проведены испытания на кратковременное и длительное загружение конструкции моста статическими нагрузками. В качестве испытательной нагрузки использовали бетонные блоки массами 6 и 10 тонн.

Высокая степень корреляции экспериментальных данных и расчетных значений показала правомерность применения такого метода расчета для сборных металлических конструкций усовершенствованных пролетных строений с учетом пин-соединений.

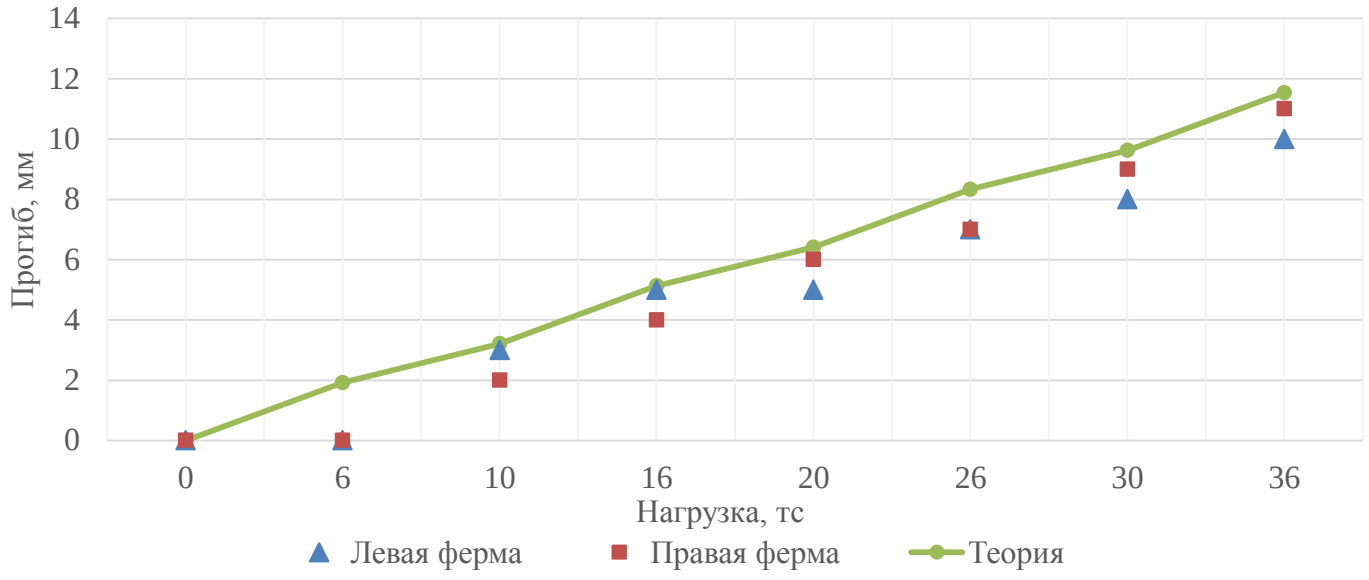

Рисунок 6 – График перемещений верхнего пояса от нагрузи

Дополнительно были проведены испытания на длительное статическое загружение, которые показали, что конструкция работает упруго и во всех испытанных случаях возвращается в исходное положение, что хорошо согласуется с расчетными данными.

В конструкцию был внесен ряд корректировок, нацеленных на повышение скорости сборки, понижение трудоемкости монтажа и снижение материалоемкости пролетного строения.

Была проверена возможность применения деревянных плит в композиционной оболочке в конструкции универсальных сборно-разборных пролетных строений, для чего автором была разработана программа испытаний и обработаны данные, полученные в ходе эксперимента проведенного специалистами ООО «Рускомпозит» на специально разработанном силовом стенде, имитирующем граничные условия закрепления настила на поперечных балках конструкции и пятно касания нагрузки площадью $S = 0.2x0.8$ метра от нагрузки НК 14 класса.

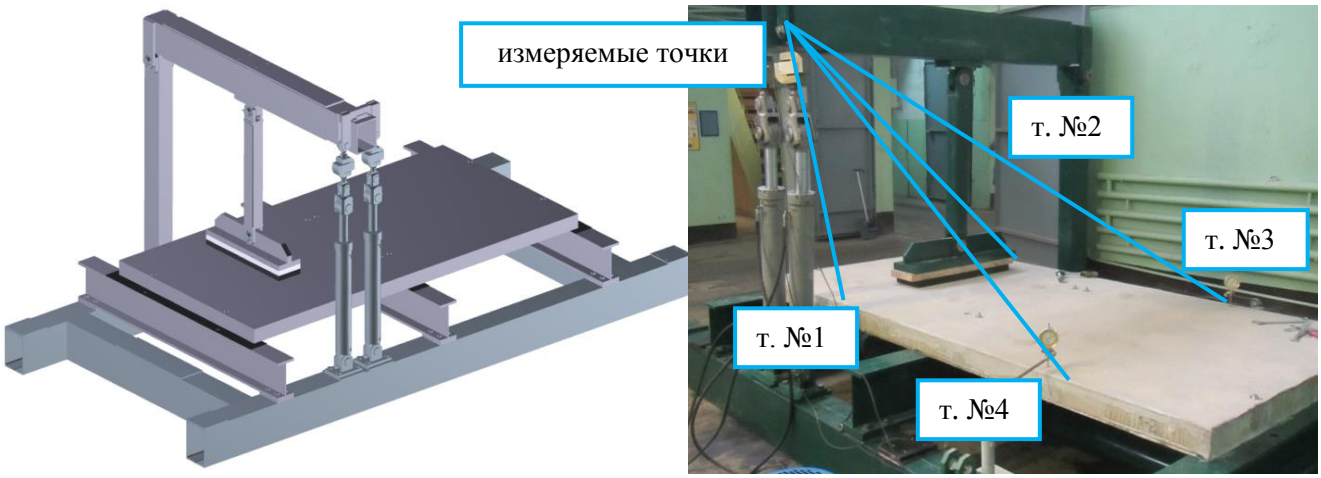

Рисунок 7 – Проведение испытаний деревокомпозитных плит
слева - модель испытательного стенда; справа – нагружение плиты нагрузкой Н14

Плиты представляли из себя шпонированный брус, обернутый в многослойную рубашку из стеклопластиковой ткани двух типов: моноаксиальной МХ и мультиаксиальной трехнаправленной ТХ. Схема армирования композиционным материалом: МХ–0°; ТХ–90°; МХ–0°; ТХ–90°, где направление 0° – вдоль длинной стороны плиты. Характерная толщина слоя для ткани ТХ – 1.2 мм, для МХ – 1 мм. Всего было изготовлено 3 образца.

Конечно-элементный расчет был произведен программной среде Midas Civil, характер перемещений образцов от нагрузки - линейный. При сравнении теоретических и экспериментальных данных оказалось, что на диаграмме деформирования все значения перемещений плиты, полученные практическим методом, лежат либо ниже ветки теоретических значений, либо на ней. При этом, максимальное расхождение их среднего значения от теории составляет 10.3%, что, в целом, свидетельствует об адекватности конечно-элементного метода расчета деревоплит с полимерным композиционным материалом, однако показывает необходимость проведения серии дополнительных испытаний ввиду малой выборки значений.

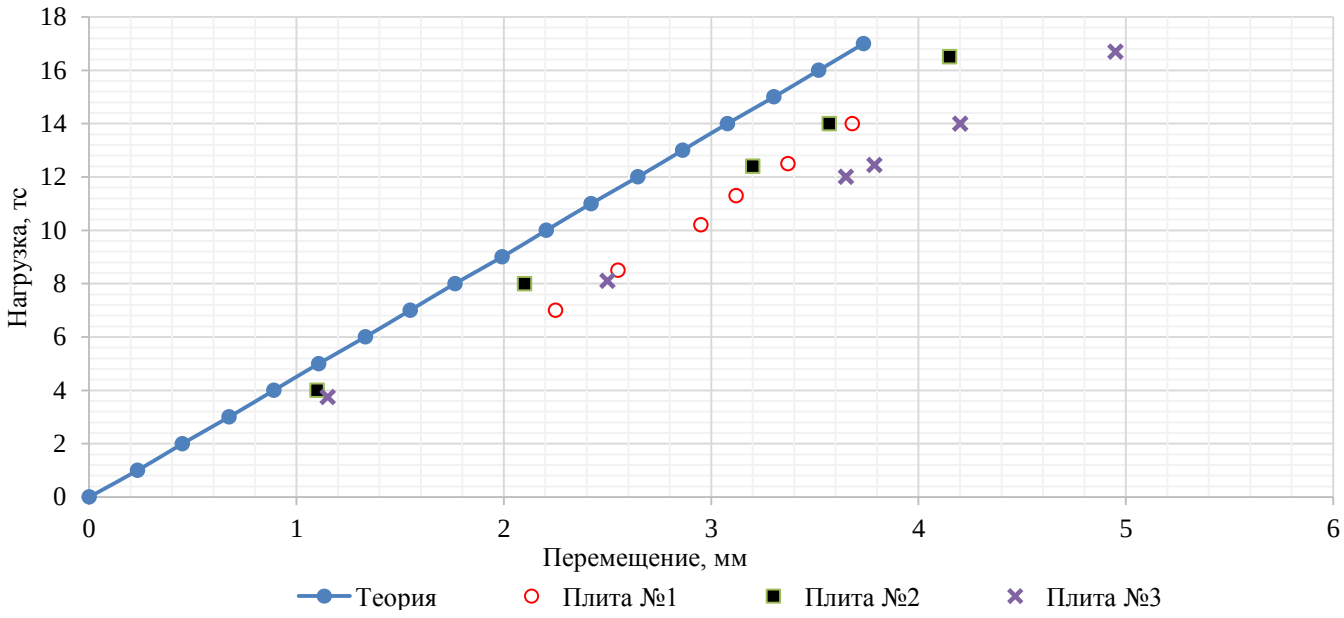

Рисунок 8 – График зависимости перемещений точки № 1

Параллельно с испытаниями деревоплит в композиционной оболочке были проведены испытания плит из полимерных материалов, которые также предполагалось применять в качестве настила усовершенствованных пролетных строений. Полимерные плиты представляют из себя пултрузионные квадратные профили, «спаянные» между собой. Шесть образцов было изготовлено для испытаний новыми, а другие 6 образцов перед проведением испытаний подвергали циклическим нагрузкам на изгиб до 30 000 проходов тяжелой техникой. Для испытаний на прочность, вдоль и поперек ребер жесткости, было подготовлено по две серии с разным числом предварительного нагружения тяжелой техникой, в каждой серии по 3 образца. Довести плиты до разрушения не удалось из-за ограниченности хода штока испытательного стенда.

Рисунок 9 – Общий вид испытуемых образцов полимерных плит слева – испытания вдоль ребер жесткости; справа – испытания поперек ребер жесткости

Во время проведения эксперимента материал плит ПМ проявил вязкоупругие и вязкопластические свойства. На рисунке ниже приведена диаграмма перемещений испытанного образца плиты “1.2.И”, на которой хорошо видны площадки релаксации. Остаточные деформации составили около половины от общих - 55.9 от 109.6 мм. Аналогичные результаты получены у всех испытанных образцов.

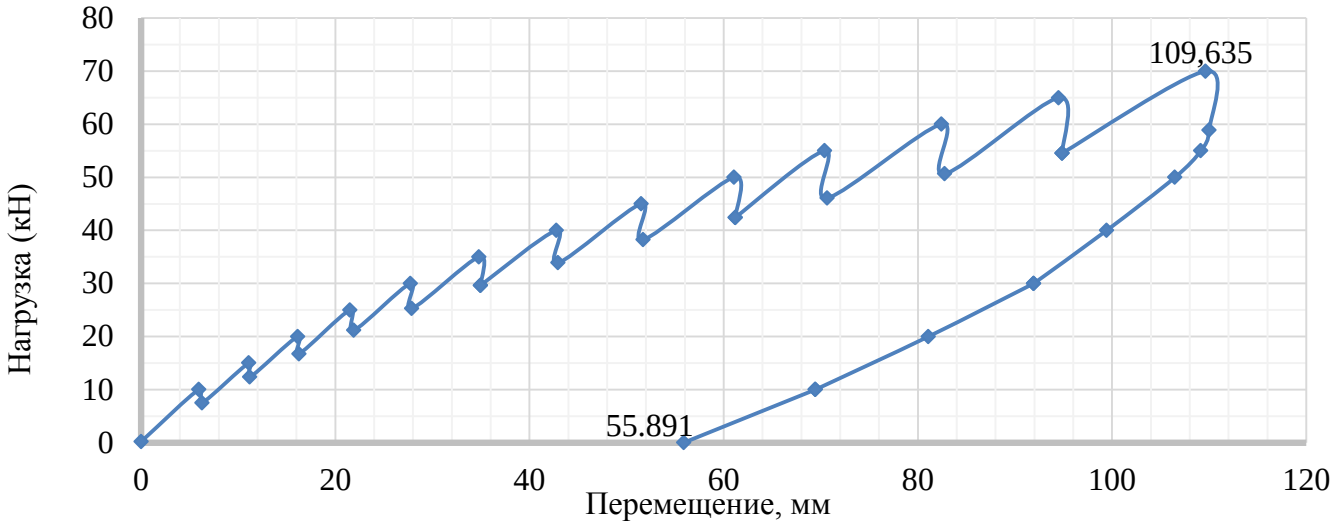

Рисунок 10 – Диаграмма деформирования образца 1.2.И с продольноориентированными ребрами с разгрузкой в характерных точках

Было проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными моделями, учитывающими промежутки времени между стадиями нагружения, а также пластические характеристики, описанные линейной функцией ползучести, показавшее высокую степень корреляции новых образцов.

Однако, подобное сравнение для образцов подверженных предварительному циклическому нагружению показало необходимость учета дополнительного коэффициента циклического нагружения $k_{\text{цикл}}$, учитывающего потерю прочности и жесткости материала по мере его эксплуатации.

При проведении испытаний на изгибную прочность поперек ребер жесткости после нагружения образца 2.2.01 $P_{\text{пред}} = 30$ кН была приложена следующая ступень, при которой сжатая полка прямоугольного профиля, ближнего к точке приложения нагрузки, потеряла устойчивость.

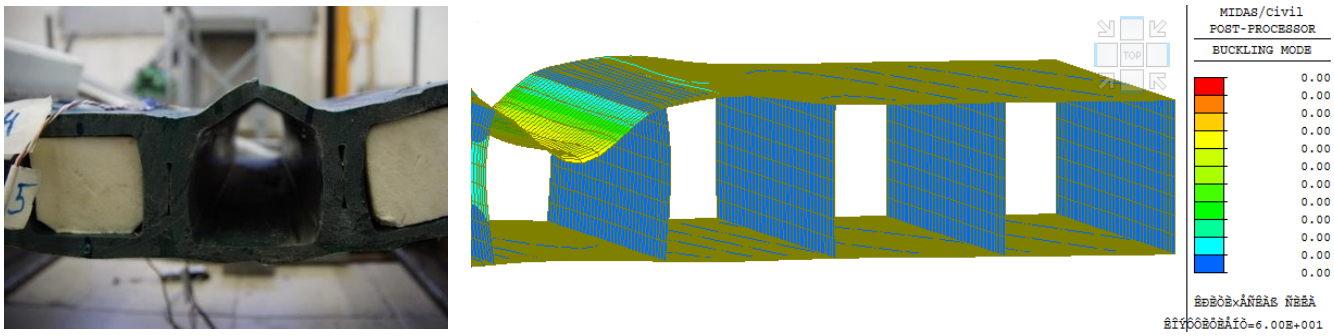

Рисунок 11 – Потеря устойчивости полки образца плиты из полимерного материала слева - элемент испытанной плиты; справа - первая форма потери равновесного состояния расчетной модели

Согласно конечно-элементным расчетам, такая потеря устойчивости в этом элементе является первой формой потери равновесного состояния конструкции и происходит при приложении нагрузки 32.5 кН, что на 7.7% больше значения, полученного при испытаниях.

В конце раздела приведено заключение, согласно которому метод конечных элементов для расчета работы элементов сборно-разборного пролетного строения может быть применен на практике с учетом полученных коэффициентов.

В четвертой главе приведены данные по внедрению пролетного строения на сети дорог Российской Федерации государственными предприятиями.

После презентации усовершенствованной разработки пролетного строения и технологии ее возведения на III всероссийском конкурсе «Лидер освоения инноваций в дорожном хозяйстве Российской Федерации 2014 года», проходившем в Санкт-Петербурге, ГК «Автодор» выступила заказчиком неразрезной конструкции схемой 21.31+30.31+21.31 общей длиной 74.53 метра габаритом проезда Г-4.5 под нагрузки $K = 11$ в соответствии с СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Мостовой переход был возведен для организации временного проезда транспортного потока на период ремонта капитального моста автомобильной дороги М-4 "Дон" через р. Левая Богучарка на км. 749+150 от Москвы (обратное направление), в Воронежской области.

Рисунок 12 – Общий вид пролетного строения моста ТАЙПАН

Процесс от начала монтажа до приемки конструкции был разбит на три этапа: установка опор, которая заняла 36 часов, сборка и надвижка пролетного строения, занявшая 72 часа, и приемочные испытания по программе, разработанной совместно с автором, для чего были проведены геодезические измерения прогибов конструкции и относительных деформаций элементов от собственного веса и при загружении ее испытательной нагрузкой в виде груженого автосамосвала Volvo FM TRUCK 6x2 общей массой 32 тонны.

Прогибы от собственного веса конструкции составили: $\Delta_1 = 16.0$ мм, $\Delta_2 = 36.0$ мм и $\Delta_3 = 16.0$ мм для первого, второго и третьего пролетов, что сооствтствует $W_1 = \frac{1}{1332}l$, $W_1 = \frac{1}{842}l$ и $W_1 = \frac{1}{1332}l$ от длины пролета. Эта характеристика показывает повышение жесткости конструкции по сравнению с экспериментальной моделью моста за счет снижения разницы диаметров пина и отверстия в панели для него с 4 мм до 1 мм.

Приведены результаты измерений относительных деформаций в элементах конструкций пролетного строения, которые во время статических испытаний производили тензодатчиками, приклееным на верхние и нижние пояса ферм.

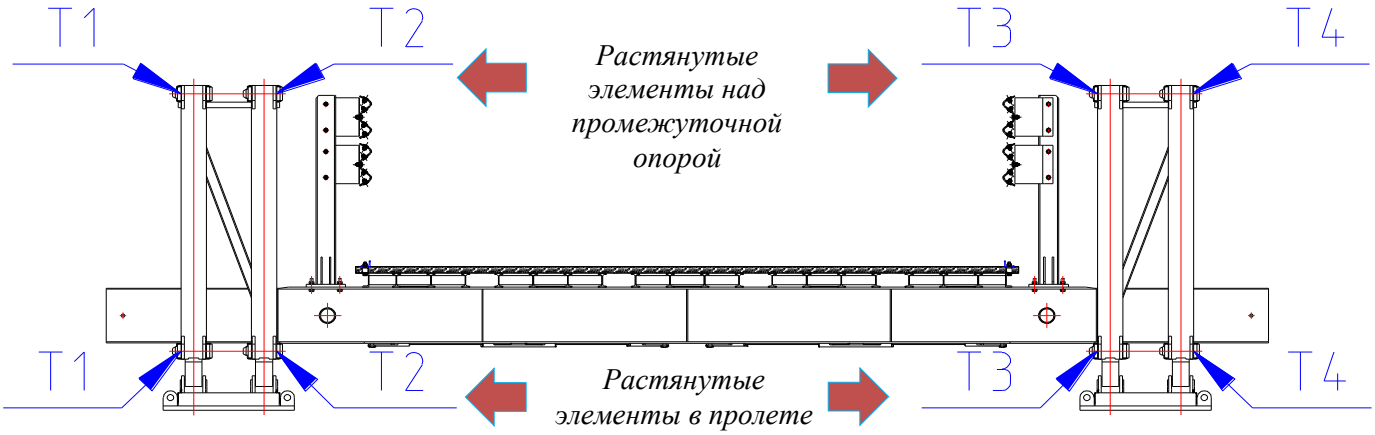

Рисунок 13– Расположение тензодатчиков на поясах ферм ТАЙПАН

Рисунок 14 – Проведение испытаний
слева - монтаж испытательного оборудования на верхний пояс фермы; справа - передвижение испытательной нагрузки по мосту

После испытаний был произведен расчет теоретических значений эквивалентного напряженно-деформированного состояния для каждого загружения с использованием конечно-элементной расчетной модели, учитывающей податливость пин-соединений, упруго-пластические свойства металла и реальные условия эксплуатации конструкции, сформированной в программном комплексе Midas Civil.

Экспериментальные и расчетные значения напряжений в верхних и нижних растянутых поясах ферм, а также соответствующий конструктивный коэффициент при положении нагрузки посередине поперечного сечения пролетного строения ТАЙПАН, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Напряжения в поясах ферм, полученные по результатам расчета методом конечных элементов и обработки данных эксперимента

Сечение		Середина первого пролета	Опора №2	Середина второго пролета	Опора №3	Середина третьего пролета
Положение нагрузки		в 1 пролете	во 2 пролете			в 3 пролете
Напряжения фактические $\sigma_{эксп}$, МПа	Т1	56,21	64,94	86,22	66,23	58,46
	Т2	78,32	75,38	108,28	74,87	79,45
	Т3	76,97	74,08	107,36	72,54	76,05
	Т4	55,17	63,74	84,62	65,00	57,38
Напряжения теоретические $\sigma_{теор}$, МПа	Т1	63,80	72,98	94,10	72,98	63,83
	Т2	79,74	75,98	108,94	75,98	79,74
	Т3	79,74	75,98	108,94	75,98	79,74
	Т4	63,80	72,98	94,10	72,98	63,80
Констр. коэф. Т1 $k_{T1} = \frac{\sigma_{факт}}{\sigma_{теор}}$		0,881	0,890	0,916	0,908	0,916
Констр. коэф. Т2$k_{T2} = \frac{\sigma_{факт}}{\sigma_{теор}}$		0,982	0,992	0,994	0,985	0,996
Констр. коэф. Т3 $k_{T3} = \frac{\sigma_{факт}}{\sigma_{теор}}$		0,965	0,975	0,985	0,955	0,954
Констр. коэф. Т4 $k_{T4} = \frac{\sigma_{факт}}{\sigma_{теор}}$		0,865	0,873	0,899	0,891	0,899

Распределение напряжений между соседними фермами, происходило неравномерно: более нагружены внутренние фермы и это находит отражение, как в экспериментальных, так и в расчетных данных. Конструктивный коэффициент также оказался значительно отличающимся как для внутренних, так и для

наружных ферм, причиной чему послужил сварной шов, который не позволял полноценно опереться поперечной балке на нижний пояс внешней фермы. По итогам опытной сборки моста и его приемочных испытаний в проект пролетных строений мостов были внесены корректировки, обеспечившие равномерное распределение напряжений между соседними фермами.

Дополнительно к статическим, были проведены динамические испытания, в результате которых был получен фактический динамический коэффициент конструкции пролетного строения равный $1 + \mu_{\text{эмпир}} = 1.18$, что меньше расчетного значения $(1 + \mu_{\text{расч}}) = 1.4$ на 18.64%.

Далее приведены данные о строительстве 1170 погонных метров универсальных пролетных строений временных мостов на 18 объектах строительства магистрального газопровода «Сила Сибири» для нужд ПАО «Газпром». Самая протяженная конструкция представляет из себя неразрезное десятипролетное строение по схеме 18+8х21+18 габаритом проезда Г-6.5 под нагрузки класса *К=11* в соответствии с СП 35.13330.2011 Мосты и трубы общей длиной 204 метра.

Приведено разработанное автором решение автоматизации проектных решений в условиях ограниченного времени в виде программы в программной среде Delphi 7 под названием "ТАЙПАН ", которая позволяет по исходным данным (схема, длина, габарит, нагрузка, наличие тротуаров и т.д.) получить перечень необходимых элементов для строительства моста, вплоть до количества метизов.

В конце раздела, на примере расчета строительства временного моста на автомобильной дороге М-4 "Дон" через р. Левая Богучарка на км. 749+150 от Москвы (обратное направление) в Воронежской области, где для организации временного движения был изначально заложен средний автодорожный разборный мост, а после ознакомления Заказчика с техническими и экономическими показателями применена конструкция универсального сборно-разборного пролетного строения и технологии по его монтажу, приведены результаты оценки экономической эффективности такого решения, согласно которой было достигнуто общее снижение стоимости на 18.4% при производстве и монтаже усовершенствованного пролетного строения многократного применения в сравнении с первой заложенной конструкцией, на фоне более высокой скорости строительства и меньших трудозатрат разработанного временного моста.

В составе коллектива автором, были получены патент на изобретение №2578231, два патента на полезную модель №137558 и №156392 и положительное решение ФАУ «Главгосэкспертиза России» № 1445-14/ГГЭ-9555/02 от 20.11.2014 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С учетом действующих нормативных документов для проектирования мостов, положений по их монтажу и опыта эксплуатации временных сооружений, была усовершенствована конструкция сборно-разборных пролетных строений, которая имеет ряд отличительных особенностей в возможности изменения геометрических параметров конструкции, отвечающих за длину, габарит и

грузоподъемность в широких пределах, чего не может обеспечить ни одна из существующих конструкций. Сформулированы принципы проектирования сборно-разборных конструкций многократного применения.

2. Конечно-элементный расчет соединительного цельнолитого металлического элемента с учетом пластических деформаций и сравнение его значений с результатами полученными методом расчета, рекомендованным в СП 35.13330.2011 Мосты и трубы, показали необходимость учета коэффициента шарнирного закрепления $k_{ш}$ при инженерном расчете одноболтового закрепления.

3. С учетом реального уровня существующих мощностей строительных организаций, разработаны два метода монтажа конструкции в проектное положение, один из которых предполагает возможность возведения без применения тяжелой техники. Масса сборочной единицы типового пролетного строения не превышает одной тонны для возможности сборки конструкции машиной с гидроманипулятором.

4. На экспериментальной модели пролетного строения проведены стендовые испытания на статические кратковременные и длительные нагрузки. Работа позволила найти конструктивные и технологические недостатки пролетного строения, что привело к повышению несущей способности и снижению собственного веса в следующем варианте разработки. Результаты испытаний с высокой степенью коррелируют с данными, полученными конечно-элементным расчетом.

5. Были проведены испытания деревоплит в композиционной оболочке, предназначенной для применения в качестве плит проезжей и тротуарной части пролетного строения, на уровень перспективных нагрузок класса $K = 14$, которые доказали принципиальную возможность применения их в мостах, в том числе сборно-разборных, не только в качестве дорожного настила, но и взамен других несущих элементов, так как они позволяют снизить величину постоянной нагрузки на конструкцию при сохранении ее несущей способности.

6. При испытаниях нескольких серий полимерных плит, на возможность применения их в конструкциях усовершенствованного пролетного строения временного моста в качестве проезжей части и тротуарного настила, выявлена деградация прочности и жесткости материала по мере эксплуатации. С целью исключения этого фактора при расчетах, был вычислен коэффициент циклического нагружения $k_{цикл}$. Результаты экспериментов хорошо коррелируют с результатами конечно-элементных расчетов, учитывающих вязкопластические свойства материала.

7. На дороге М4-Дон смонтировано пролетное строение неразрезной схемой 21.31+30.31+21.31 на период ремонта основного капитального моста. Проведены приемочные испытания конструкции, которые показали высокую корреляцию результатов натурных измерений и расчетной схемы пролетного строения. В настоящее время, помимо построенного временного мостового перехода на дороге М4-Дон, с применением новой конструкции пролетного строения ведется строительство 18 мостов на объектах магистрального газопровода Сила Сибири, общей протяженностью 1170 погонных метров.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Бокарев С.А., Проценко Д.В. О предпосылках создания новых конструкций временных мостовых сооружений / С.А. Бокарев, Д.В. Проценко // Интернет-журнал «Науковедение» (электронный журнал). Выпуск №5. – 2014.
2. Бокарев С.А., Проценко Д.В. Экспериментально-теоретические исследования пролетного строения сборно-разборного моста ТАЙПАН / С.А. Бокарев, Д.В. Проценко // Известия высших учебных заведений. Строительство. Выпуск №8. – 2017. С. 28-33. ***Издание входит в международную базу данных CA (pt) (Chemical Abstracts).***

Патенты, полученные на полезные модели и изобретения:

3. Патент №137558 Российская Федерация, МПК E01D 15/133 (2006.01). Сборно-разборный универсальный мост / А.А. Абакумов, Д.В. Проценко, Р.А. Шаршов. Патентообладатели: Забарский А.А, Пахомов Д.Н, Проценко Д.В. – Опубл. 23.09.2013.
4. Патент №156392 Российская Федерация, МПК E01D 15/12 (2006.01). Сборно-разборный универсальный мост / А.А. Абакумов, Д.В. Проценко, О.А. Кольцова и др. Патентообладатели: Пахомов Д.Н, Проценко Д.В. – Опубл. 17.12.2014.
5. Патент №2578231 Российская Федерация, МПК E01D 15/133 (2006.01). Сборно-разборный универсальный мост / А.А. Абакумов, Д.В. Проценко, О.А. Кольцова и др. Патентообладатели: Пахомов Д.Н, Проценко Д.В. – Опубл. 17.12.2014.

Публикации в журналах, научных сборниках и других научных изданиях:

6. Проценко Д.В., Шаршов Р.А., Пахомов Д.Н. Сборно-разборный мост ТАЙПАН многократного применения / Д.Н. Пахомов, Д.В. Проценко, Р.А. Шаршов // «Вестник мостостроения». – 2014. – №1. – С. 60-68.
7. Проценко Д.В. Особенности конструкции и технологии монтажа сборно-разборных мостов ТАЙПАН многократного применения / Д.В. Проценко // Материалы VIII Международной конференции «Политранспортные системы», Новосибирск. – 2015. – С. 125-130.
8. Проценко Д.В. Мосты ТАЙПАН / Д.В. Проценко // «Дороги. Инновации в строительстве. Мосты и время. Спецвыпуск», Санкт-Петербург. – Выпуск №2. – 2017. – С. 108-109.
9. Проценко Д.В. Экспериментальное исследование деревокомпозиционных настилов применительно к мостовым конструкциям / Д.В. Проценко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – Выпуск №2. – 2017. – С. 83-91.

Проценко Дмитрий Владимирович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ УНИВЕРСАЛЬНОГО СБОРНО-РАЗБОРНОГО ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ С БЫСТРОСЪЕМНЫМИ ШАРНИРНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Специальность 05.23.11 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 25.04.2018 г.
1,0 печ.л. Тираж 100 экз. заказ № 3293
Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191. Тел. (383) 328-03-81. e-mail: bvu@mail.ru