

На правах рукописи



РАБЕЙ ВАДИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

**Исследование процессов наезда грузоподъемных кранов
на тупиковые упоры**

Специальность: **05.05.04** –

Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Астраханский государственный технический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Панасенко Николай Никитович

Официальные оппоненты:

Липатов Анатолий Степанович,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»;
Грачёв Алексей Андреевич,
кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова».

Защита диссертации состоится «20» января 2015 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.24 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая, ул., д.29, корпус 1, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» <https://www.spbstu.ru/science/defences/details-0617.html>.

Автореферат разослан «18» декабря 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

**Бортяков
Данил Евгеньевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Наезд грузоподъемных кранов на тупиковые упоры (ТУП) является аварийной ситуацией которая возникает, как правило, по причине:

- 1) отказа приборов и устройств безопасности;
- 2) нарушения правил технического регулирования (отказа) тормозных систем;
- 3) ошибок в системе «человек-машина», в частности, эксплуатация крана в крайних границах рельсового пути.

Таким образом, можно говорить о существовании ненормированного нагружения грузоподъемных (г/п) кранов при их наезде на ТУП, последствия которого могут непосредственно отражаться на их безопасной эксплуатации.

Актуальность работы обусловлена высокой повреждаемостью демпфирующих устройств (буферов), ударных и безударных ТУП, деформацией металлоконструкций (м/к) кранов, прежде всего, общих изгибных и в местах установки буферов (опорные пластины), что свидетельствует как о частых наездах г/п кранов на ТУП, о существовании высоких ударных динамических нагрузок, а также и о связи с проектными недооценками при конструировании кранов в части учёта ударных нагрузок, возникающих в случае наезда кранов на ТУП. Следует отметить, что, как отечественные, так и зарубежные стандарты, нормы и правила безопасности по г/п кранам не содержат полных рекомендаций об учете нагрузок как на грузоподъемные краны в процессе их наезда на ТУП, так и на их поддерживающие конструкции. При этом методы расчета нагрузок нерабочего состояния кранов, возникающих в их металлоконструкциях и буферных устройствах в процессе наезда на ТУП являются приближенными, не учитывающими различные эксплуатационные состояния г/п кранов, что, в свою очередь, приводит к недооценке реальных ударных нагрузок возникающих при наездах г/п кранов на ТУП.

Актуальность настоящей работы вытекает также из анализа научно-исследовательских работ как отечественных, так и зарубежных авторов, исследования которых не позволили сделать однозначный вывод о влиянии ударного динамического нагружения на состояние и поведение м/к г/п кранов в процессе их наезда на ТУП, что является особенно важным для тех кранов которые исчерпали свой нормативный срок службы по РД 10-112-01-04, либо м/к которых подвергалась неоднократному ремонту с применением электросварки. Вопросу пространственного поведения м/к, прежде всего башенных кранов, при наезде на безударные ТУП, также не уделено должного внимания.

Недостаточное изучение проблемы наезда г/п кранов на ТУП, прежде всего, связано как с чрезмерным упрощением расчетных моделей (РМ) кранов: в основном использовались плоские модели с 2-мя и 3-мя степенями свободы практически не отражающие поведение действительных несущих м/к кранов, так и с упрощением математических моделей: практически во всех научно-исследовательских работах для вывода уравнений движения крана используется уравнение Лагранжа второго рода 2-го и 3-го порядков.

Работа является продолжением исследований процессов наезда г/п кранов на ударные и безударные ТУП изложенных в работах таких ученых, как Петухов П.З., Ковальский Б.С., Комаров М.С., Казак С.А., Черкасов В.Г., Мартынов А.В., Дейнега В.И., Джигкаев Т.С., Поликарпов К.В., Жуков В.Г., Лобов Н.А., Наас Т.Н. и др.

Цель работы:

Обеспечение безопасности эксплуатации грузоподъемных кранов на рельсовом ходу путем установления на основе численных методов анализа влияния процесса взаимодействия кранов с ударными и безударными ТУП на состояние их металлоконструкций, буферных устройств и ТУП.

Для достижения намеченной цели при выполнении диссертационной работы необходимо было решить следующие **задачи**:

1) разработать конечно-элементные расчётные модели (РМ) г/п кранов со многими степенями свободы, отражающие действительную работу м/к мостового, порталного и башенного кранов;

2) провести вычислительные эксперименты по наезду РМ г/п кранов на ударные и безударные ТУП на основе численного метода конечных элементов с учётом различных эксплуатационных состояний кранов;

3) исследовать влияние процессов наезда г/п кранов на ударные и безударные ТУП на напряжённо-деформированное состояние их металлоконструкций;

4) исследовать поведение резиновых буферов в результате взаимодействия кранов с ТУП. Определить расчетные зависимости по выбору резиновых буферов более полно учитывающие их потребную энергоёмкость;

5) провести экспериментальные исследования для подтверждения адекватности выполненных теоретических расчетов.

Научная новизна:

1. Исследовано пространственное поведение, в том числе напряжённо-деформированное состояние (НДС), действительных м/к мостового и порталного кранов в процессе их наезда на ударные ТУП в различных эксплуатационных состояниях. Установлено влияние различных эксплуатационных состояний г/п кранов на результат их взаимодействия с ТУП.

2. Исследовано поведение резиновых буферов марки БР в процессе наезда мостового и порталного кранов на ударные ТУП. Показано, что даже при соблюдении всех требований правил безопасности опасных производственных объектов (ОПО) на которых используются подъемные сооружения кинетическая энергия некоторых типов кранов, воспринимаемая резиновыми буферами в тупиковых участках пути, превышает, по крайней мере в 2 раза, энергоёмкость буферов, что на практике приводит к разрушениям буферов и оказывает неблагоприятное влияние на м/к как г/п кранов, так и на м/к подкрановых конструкций.

3. Предложены расчетные зависимости для выбора резиновых буферов марки БР мостовых и порталных кранов, учитывающие действительные физико-механические и конструкционные свойства резиновых буферов, позволяющие более полно учесть их потребную энергоёмкость.

4. Исследованы характеристики устойчивости положения в пространстве и НДС башенных кранов при наезде на безударные ТУП. Показано, что существующие безударные ТУП являются не достаточно надежным противоаварийным средством гашения остаточной скорости башенных кранов, а также, что наезд на них с номинальной и выше скоростью не безопасен. Установлены рабочие границы эксплуатационных состояний, обеспечивающие безопасную работу башенных кранов вблизи безударных ТУП.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка влияния эксплуатационных состояний мостовых кранов на параметры НДС их металлоконструкций в процессе наезда на ударные ТУП на основе МКЭ.

2. Аналитические зависимости по расчету резиновых буферов грузоподъемных кранов, учитывающие действительные физико-механические и конструкционные свойства буферов, ТУП, а также действительные металлоконструкции кранов.

3. Результаты исследований методом вычислительных экспериментов на основе МКЭ взаимодействия башенных кранов с безударными ТУП.

4. Динамические коэффициенты повышения напряжений учитывающие нагрузки на металлоконструкции грузоподъемных кранов возникающие по причине их наезда на ТУП.

Теоретическая значимость работы:

1. Полученные результаты позволяют скорректировать существующие аналитические зависимости по расчету и выбору резиновых буферов г/п кранов.

2. Предложены значения динамических коэффициентов повышения напряжений в опасных сечениях металлоконструкций г/п кранов возникающих в процессе их наезда на ударные и безударные ТУП.

Практическая значимость работы

Определено влияние динамических процессов взаимодействия г/п кранов с ударными и безударными ТУП на состояние их металлоконструкций, а также на техническое состояние буферов и амортизаторов ТУП методом вычислительных экспериментов на основе МКЭ по РМ кранов, отражающих их действительные металлоконструкции.

Результаты диссертационной работы предложены для использования при проектировании новых конструкций г/п кранов, корректировки решений ОСТ 24.191.37-78 в части методики расчета и выбора резиновых буферов марки БР и должны послужить основой для корректировки существующих и создания новых стандартов и правил по г/п кранам в части установления видов предельных состояний и их расчетных сочетаний нагрузок, а также для разработки технического регламента по расчетному анализу динамических процессов наезда г/п кранов на препятствия (в т.ч. столкновений кранов).

Реализация работы

Полученные в диссертационной работе результаты вычислительных и натурных экспериментов были использованы при совершенствовании методов экспертных обследований, в расчетах остаточных ресурсов г/п кранов проводившихся в экспертной организации ООО «НПП «Подъемные сооружения» и внедрены на ОАО «ССЗ «Красные Баррикады» и ОАО «ПСК «Строитель Астрахани» (г. Астрахань).

Предложена практика освоения метода вычислительного эксперимента в исследовании нелинейных процессов характерных для сложных систем г/п кранов.

Работа выполнялась в соответствии с госбюджетными темами НИР Астраханского государственного технического университета на кафедре «Подъемно-транспортные машины» на 2012-2013 гг. «Расчетно-экспериментальное исследование безопасной эксплуатации мостовых кранов при взаимодействии с тупиковыми упорами», «Расчетно-экспериментальное исследование безопасной эксплуатации порталных кранов при взаимодействии с тупиковыми упорами», «Расчетно-экспериментальное исследование и разработка мер обеспечения безопасной эксплуатации башенных кранов при взаимодействии с безударными тупиковыми упорами», номер государственной регистрации № 01201179194.

Методика разработки расчётно-динамических моделей кранов на основе МКЭ, а также результаты вычислительных экспериментов процесса наезда кранов на ударные и безударные ТУП используются в учебном процессе Астраханского государственного технического университета на кафедре «Техника и технологии наземного транспорта» при подготовке специалистов по специальности 190602.65 «Эксплуатация перегрузоч-

ного оборудования портов и транспортных терминалов», магистров (190100.68) и бакалавров (190100.62) по направлению «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается адекватностью используемых расчётных моделей, современными апробированными численными методами и программными средствами исследований, использованием современных информационных технологий и экспериментальными исследованиями процесса наезда г/п кранов на ТУП, подтверждающими сходимость теоретических и экспериментальных результатов (расхождение составляет около 9 %).

Апробация работы

Основные научные результаты, изложенные в диссертационной работе, докладывались на следующих конференциях и семинарах: XV Московской международной межвузовской научно-технической конференции «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (Москва, 2011 г.), V сессии научного совета РАН по механике деформируемого твёрдого тела (Астрахань, 2011 г.), XVI Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (Москва, 2012 г.), I Всероссийском конгрессе молодых учёных (Санкт-Петербург, 2012 г.), V Уральском конгрессе подъемно-транспортного оборудования (Екатеринбург, 2012 г.), V Научно-технической конференции молодых специалистов и работников ООО «Газпром добыча Астрахань» «Инновации молодёжи – потенциал развития нефтегазовой отрасли» (Астрахань, 2013 г.), V Международном научном симпозиуме «Ударно-вибрационные системы, машины и технологии» (Орёл, 2013 г.), Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2013» «Инновации в науке – инновации в образовании» (Новочеркасск, 2013 г.), IV Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование» (Санкт-Петербург, 2014 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 21 работа, из них 4 работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, 3 работы опубликованы в зарубежных научных журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus.

Структура и объём диссертации

Диссертация изложена на 219 страницах основного текста, включая 107 рисунков и 14 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования и 2 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена цель работы, поставлены задачи, приведены положения, составляющие научную новизну работы, научные положения, являющиеся предметом защиты, обоснована теоретическая значимость и практическая ценность исследования.

В первой главе «Анализ состояния проблемы и обоснование задач диссертационного исследования» проведён обзор теоретических и экспериментальных работ, посвящённых исследованию процессов наезда г/п кранов на ударные и безударные ТУП, а также анализ отечественных и зарубежных стандартов по расчёту крановых буферных устройств.

Проблемой наезда г/п кранов на ТУП занимались такие ученые, как Петухов П.З., Ковальский Б.С., Комаров М.С., Казак С.А., Черкасов В.Г., Мартынов А.В., Дейнега В.И., Джигкаев Т.С., Поликарпов К.В., Жуков В.Г., Лобов Н.А., Наас Т.Н. и др.

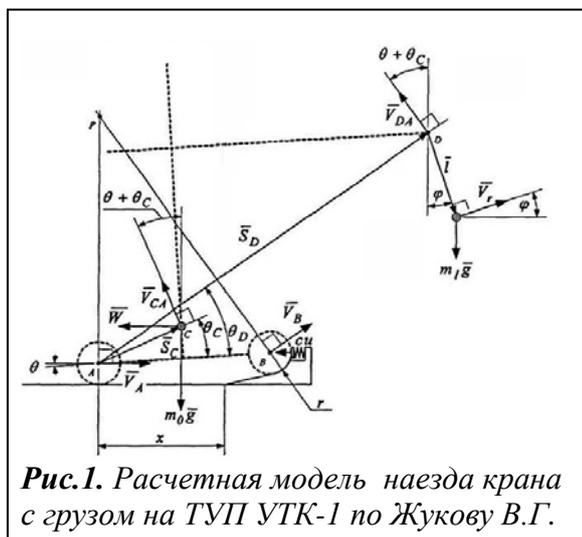
Все существующие научно-исследовательские работы по динамике процесса наезда г/п кранов на ТУП можно условно разделить на работы основанные на РМ кранов с двумя, с несколькими и со многими степенями свободы. К первым, прежде всего, относится работа Петухова П.З., основной целью которой стало рассмотрение методов поглощения кинетической энергии мостового крана (тележки) и полезного груза, перехода её в другие виды энергии. Петухов П.З. сформулировал основные требования к крановым буферам, получил систему дифференциальных уравнений описывающих торможение г/п кранов гидравлическим буфером с постоянным сопротивлением с учётом гибкого подвеса груза. К аналогичным работам относятся исследования Ковальского Б.С., Комарова М.С. и др.

Одной из первых работ посвященных гравитационному торможению кранов стала работа Мартынова А.В., в которой обоснована целесообразность и возможность практического использования гравитационного способа торможения, как средства, обеспечивающего безопасную работу кранов в тупиковых участках кранового пути. Мартыновым А.В. разработаны теоретические основы процесса гравитационного торможения кранов, получена система дифференциальных уравнений движения описывающих двухмассовую расчётную модель крана.

В рассмотренных работах разработаны теоретические основы процесса ударного и безударного (гравитационного) торможения кранов, получены первые системы уравнений движения кранов при наезде на ТУП. При этом были сформулированы основные требования к крановым буферам и определены величины замедлений кранов в процессе их наезда на ТУП. Однако, упрощения РМ кранов с 2-мя степенями свободы не позволили определить полный характер временного процесса ударного нагружения буферов, а также действительную работу м/к кранов при их наезде на ТУП.

К одним из первых работ, рассматривающим РМ кранов с несколькими степенями свободы, относится работа Казака С.А., где рассматривается наезд крана мостового типа в виде четырехмассовой расчетной модели с тремя упругими связями на ударный ТУП.

В работе Жукова В.Г. рассматриваются модели наезда башенного крана на безударный ТУП типа УТК-1 и на ТУП типа СК-2.02 (рис.1), исключая возможность переезда ходовых колес крана через ТУП.



Исследованию процесса наезда г/п кранов на ТУП на основе РМ с несколькими степенями свободы посвящены работы также и других учёных.

Следует отметить, что РМ с несколькими степенями свободы, хотя и являются развитием РМ с 2-мя степенями свободы, они также полностью не решают основные проблемы динамики наезда г/п кранов на ТУП. Так, например, главная проблема применения гравитационных (безударных) ТУП не решена: оценка устойчивости (положения в пространстве) г/п кранов, что является недостатком рассматриваемых расчетных моделей. РМ кранов с несколькими

степенями свободы также не позволили определить полный характер временного процесса ударного нагружения буферов, а также действительную работу м/к кранов при их наезде на ТУП.

Предположительно единственной работой по изучению процесса наезда г/п крана на ТУП на основе метода конечных элементов (МКЭ) является работа Наас Т.Н., в которой представлена конечно-элементная стержневая РМ однобалочного мостового крана г/п 5 т с учётом несущей конструкции поддерживающей кран. Основной целью работы Наас Т.Н. было определения сил ударного взаимодействия полиуретановых буферов мостового крана с ТУП. Несмотря на то, что исследования на основе МКЭ позволили достаточно точно определить силы взаимодействия мостового крана с ТУП, они так и не создали основ теории и методологии полного анализа напряженно-деформированного состояния м/к мостовых кранов при ударных процессах по причине многих упрощений в РМ крана.

Практически все существующие работы, посвященные исследованию взаимодействия г/п кранов с ТУП, рассматривают только краны мостового типа. Исследованиям данной проблемы касательно башенных и козловых кранов уделено недостаточно внимания, а исследования по проблеме наезда порталных типов кранов на ТУП вовсе не были обнаружены при обзоре научной литературы.

В большинстве работ посвященных расчету крановых буферных устройств при наезде грузоподъемных кранов на ТУП основными исходными данными для расчета являются значения полученной кинетической энергии и величины допускаемых замедлений (отрицательное ускорение) крана, которые определяются, прежде всего, прочностными свойствами металлоконструкции крана и подкрановых конструкций, а также работой буферного устройства. При этом расчёт резиновых (полиуретановых) буферов, как в отечественных (ОСТ 24.191.37-78), так и в зарубежных (DIN 15018-2, AS 1418.18 – 2001, EN 1991-3 и др.) стандартах направлен на определение кинетической энергии, которую буфера должны воспринять в момент соударения крана с ТУП. Далее полученное значение энергии сравнивается с известными значениями энергоемкости буферов и, таким образом, выбирается два буфера общая энергоемкость которых должна быть не ниже полученного значения кинетической энергии движения крана. Стоит отметить, что стандарты по расчету буферов г/п кранов (DIN 15018-2, AS 1418.18–2001, EN 1991-3) также приводят различные коэффициенты, например, для учета жесткости м/к крана, основанные на опыте эксплуатации кранов, которые не имеют достаточно обоснованных научных и аналитических подтверждений. Такой подход расчёта буферов не учитывает многих важных эксплуатационных состояний крана, а также работу его действительной м/к, что на практике приводит к недооценке или переоценке реальных ударных нагрузок (рис.2).



Рис.2. Повреждения возникающие в результате ударных взаимодействий г/п кранов с ТУП: а - разрушение резинового буфера мостового крана; б – разрушение резинового буфера порталного крана; в- разрушение ударного ТУП; г-деформация м/к мостового крана в месте установки буферного устройства

ное значение энергии сравнивается с известными значениями энергоемкости буферов и, таким образом, выбирается два буфера общая энергоемкость которых должна быть не ниже полученного значения кинетической энергии движения крана. Стоит отметить, что стандарты по расчету буферов г/п кранов (DIN 15018-2, AS 1418.18–2001, EN 1991-3) также приводят различные коэффициенты, например, для учета жесткости м/к крана, основанные на опыте эксплуатации кранов, которые не имеют достаточно обоснованных научных и аналитических подтверждений. Такой подход расчёта буферов не учитывает многих важных эксплуатационных состояний крана, а также работу его действительной м/к, что на практике приводит к недооценке или переоценке реальных ударных нагрузок (рис.2).

За последние десятилетия накоплен значительный двухсторонний опыт, (а) как

по интенсивному приложению компьютерных технологий в решение научно-исследовательских и проектировочных задач в области изготовления и безопасной эксплуатации г/п кранов, так и (б) по разработке и совершенствованию приложения теории метода пространственных конечных элементов (МКЭ) к численному решению задач и проблем исследовательского характера в области подъемно-транспортной техники. Однако, несмотря на эти достижения, удалось обнаружить незначительное число работ по конечно-элементному исследованию процессов взаимодействия г/п кранов с ТУП.

Таким образом, необходимо более глубокое изучение обозначенной проблемы путём разработки конечно-элементных РМ динамического процесса взаимодействия г/п кранов с ТУП на основе численного метода анализа МКЭ, которые отражали бы пространственное поведение действительных м/к кранов с учётом нелинейных физико-механических характеристик материала буферов и амортизаторов ТУП.

Во второй главе «Методика построения расчетных моделей грузоподъемных кранов» рассмотрены вопросы методологии построения РМ г/п кранов на основе МКЭ.

Аналитические процедуры (в общем случае) конечно-элементного моделирования конструкций кранов, как систем со многими (n) степенями свободы, продиктованы терминами матричного уравнения движения МКЭ:

$$[M]_{n \times n} \left\{ \frac{d^2 v}{dt^2} \right\}_{1 \times n} + [C]_{n \times n} \left\{ \frac{dv}{dt} \right\}_{1 \times n} + [K]_{n \times n} \{v(t)\}_{1 \times n} = \{P_{cm}\}_{1 \times n} + \{P_{дин}\}_{1 \times n} - R \left(\left\{ \frac{dv}{dt} \right\}, \{v(t)\} \right)_{1 \times n}, \quad (1)$$

где $[M, C, K]$ матрицы масс, демпфирования и жесткости; $\{v(t), P_{cm}, P_{дин}, R\}$ - соответственно векторы перемещений, статических, динамических нагрузок и нелинейных сил (трения, нелинейно-деформируемых характеристик материалов и др.).

Согласно МКЭ, компоненты левой части (1) формируются на основе дискретизации действительных континуальных стержневых элементов и сплошных сред кранов, имеющих бесконечное число степеней свободы, аппроксимацией конечными элементами с конечным числом степеней свободы, взаимодействующих между собой только в узловых точках (узлах). Как известно, выбор степеней свободы конечных элементов и соответствующих аппроксимирующих функций полностью определяет скорость сходимости и оценку погрешности результатов расчетного анализа МКЭ.

Прямое численное интегрирование нелинейного уравнения движения (1) проводится неявным методом Ньюмарка- β в сочетании с итерационным модифицированным методом Ньюмарка – Рафсона для уточнения решения уравнения движения (1). Одношаговая схема интегрирования по времени уравнений движения (1) по методу Ньюмарка- β имеет вид:

$$v_{i+1} \approx v_i + h\dot{v}_i + h^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{v}_i + \beta \ddot{v}_{i+1} \right], \quad (2)$$

$$\dot{v}_{i+1} \approx \dot{v}_i + h[(1 - \gamma)\ddot{v}_i + \gamma\ddot{v}_{i+1}]. \quad (3)$$

где β и γ – параметры интегрирования Ньюмарка, h - временной шаг интегрирования.

После решения матричного уравнения (1) и вычисления вектора неизвестных перемещений $\{v(t)\}_{1 \times n}$ в общей системе координат OXYZ определяются узловые внутренние усилия и параметры НДС.

В частности, вектор деформаций определяется по формуле

$$\{\varepsilon\} = [L_d] \left(\{v(t)\}_{1 \times n} [T]_{n^* \times n^*} \right) = \left\{ \varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{zz} \quad \varepsilon_{yz} \quad \varepsilon_{xz} \quad \varepsilon_{xy} \right\}^T, \quad (4)$$

где $[L_d]$ - матрица дифференциальных операторов в частных производных; $[T]_{n^* \times n^*}$ - матрица преобразования «МСК→ОСК»; n^* - число степеней свободы отдельного КЭ, а вектор напряжений определяется по формуле

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = \{\sigma_{xx} \quad \sigma_{yy} \quad \sigma_{zz} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz} \quad \tau_{xy}\}^T. \quad (5)$$

Задавшись IV-той гипотезой прочности, определяется эквивалентное напряжение в любом узле РМ крана:

$$\sigma_{\text{экр}}^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}. \quad (6)$$

Для решения контактной задачи взаимодействия г/п кранов с ударными и безударными ТУП использовался метод множителей Лагранжа преимущество которого перед другими методами заключается в том, что в данном методе кинематические условия контакта выполняются точно, несмотря на то, что введение множителей Лагранжа приводит к усложненной формулировке уравнения движения (1). Потенциал контактных сил имеет вид:

$$W_c = - \int_c t \cdot (x^1 - x^2) dc, \quad (7)$$

где c – поверхность контакта между телами B^1 и B^2 ; t – вектор поверхностных контактных сил, действующих на поверхности c .

Согласно поставленной задачи, в диссертационной работе для изучения процессов наезда действительных м/к г/п кранов на ТУП были разработаны РМ кранов на основе трёх базовых конечных элементов (рис. 3), представляющие собой пространственные модели мостового, порталного и башенного кранов со множеством степеней свободы (рис. 4).

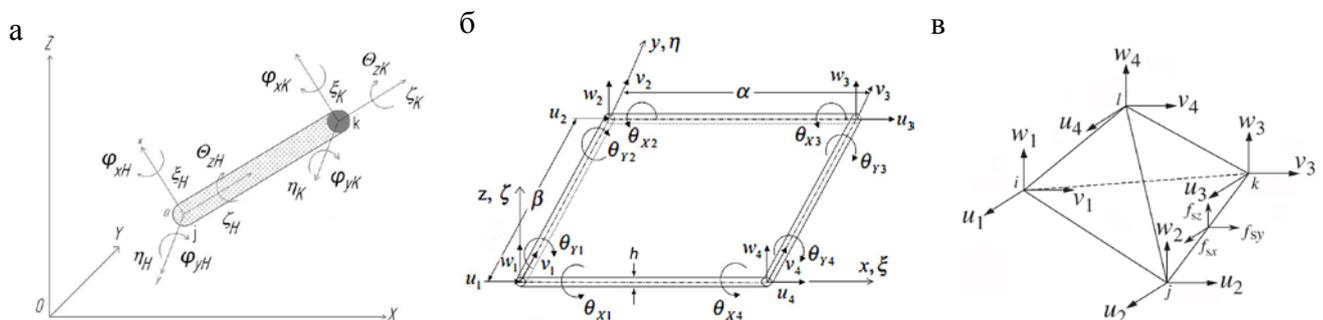


Рис.3. Конечные элементы используемые при разработке РМ кранов: стержень (а), тонкая пластина (б) и объёмный КЭ (в)

По причине сложных конструкционных систем реальных г/п кранов в их РМ были приняты некоторые упрощения для уменьшения расчетного времени. В частности, из РМ были исключены вращательные массы механизмов. При этом нелинейные взаимодействия между ходовыми колесами г/п кранов (тележек) и подкрановыми (подтележечными) рельсами моделировались согласно закону Кулона поверхностью трения с соответствующими коэффициентами трения качения и скольжения. Помимо этого, из конечно-элементной модели мостового крана исключено влияние на работу крана поддерживающих конструкций, несущих надземные крановые рельсовые пути.

Физико-механические свойства каждого конечного элемента РМ кранов приняты в соответствии с паспортными данными кранов о материалах их несущих элементов м/к. Резиновые буфера г/п кранов смоделированы объемными нелинейными КЭ с

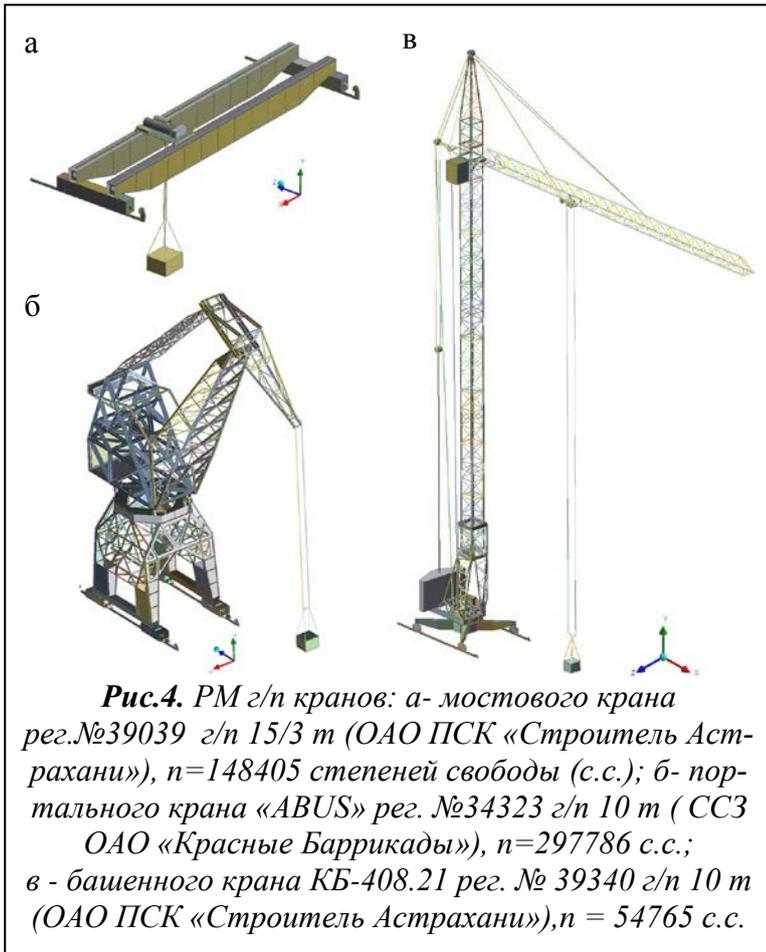


Рис.4. РМ г/п кранов: а- мостового крана рег.№39039 г/п 15/3 т (ОАО ПСК «Строитель Астрахани»), $n=148405$ степеней свободы (с.с.); б- портального крана «ABUS» рег. №34323 г/п 10 т (СЗЗ ОАО «Красные Баррикады»), $n=297786$ с.с.; в - башенного крана КБ-408.21 рег. № 39340 г/п 10 т (ОАО ПСК «Строитель Астрахани»), $n = 54765$ с.с.

соответствующими нелинейно-упругими и демпфирующими характеристиками, полученными в результате натурных экспериментов по определению физико-механических свойств буферов. Нелинейное поведение резиновых буферов подчиняется несжимаемой нелинейно-упругой модели Муни-Ривлина.

Следует указать на отличительную особенность РМ кранов, как систем с переменными параметрами внешних эксплуатационных состояний – массы полезного груза, положения на мосту грузовой тележки, либо верхнего строения порталных и башенных кранов относительно кранового рельсового пути (КРП), высоты подъема груза и др., расчетный анализ предельного состояния которых следует проводить на основе предварительного анализа РМ с целью

определения наиболее невыгодного эксплуатационного состояния, которое должно быть установлено, не исключено, расчетными методами анализа. В частности, при расчетной оценке процессов наезда мостового крана г/п 15/3 т на ТУП анализу подвергались 10 эксплуатационных состояний (ЭС), порталного крана «ABUS» г/п 10 т - 4 ЭС, башенного крана КБ-408.21 г/п 10 т – 4 ЭС.

РМ кранов (см. рис. 4) построены для проведения вычислительных экспериментов по изучению процессов наезда г/п кранов на ударные и безударные ТУП.

В третьей главе «Численное исследование динамических процессов наезда грузоподъемных кранов на тупиковые упоры» представлены результаты вычислительных экспериментов процесса взаимодействия г/п кранов с ТУП.

1. Исследования процессов наезда г/п кранов на ударные ТУП.

Последствия ненормированного нагружения м/к мостовых кранов в процессе их наезда на ударные ТУП, следуя анализу существующих научных работ по данной проблеме, остается практически неизвестным. Очевидно поэтому НДС м/к мостовых кранов при их наезде на ТУП остается определенным лишь приближенными методами. При этом в процессе экспертных обследований мостовых кранов г/п от 10 т до 100 т были выявлены многочисленные остаточные поперечные деформации главных балок м/к мостовых кранов в горизонтальной плоскости, которые могли носить отпечаток ударного взаимодействия мостовых кранов с ТУП. Для определения влияния ударного нагружения на м/к двухбалочного мостового крана г/п 15/3 т (см. рис. 4а) в процессе его наезда на ТУП была выполнена серия вычислительных экспериментов в программе ANSYS, в результате которых была получена полная картина НДС его м/к (рис.5). Было установлено, что наезд мостовых кранов на ТУП вносит дополнительный вклад в накопление остаточных деформаций не только главных балок мостов, но также и концевых балок.

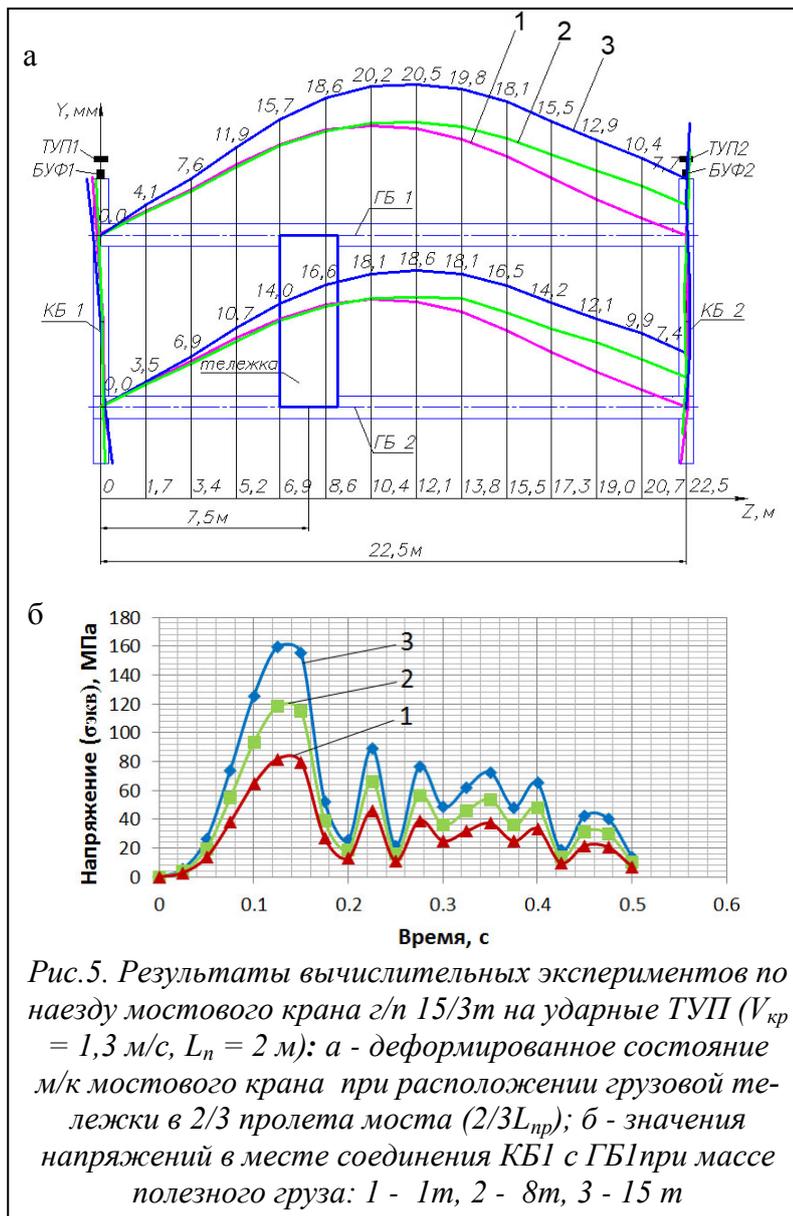


Рис.5. Результаты вычислительных экспериментов по наезду мостового крана г/п 15/3т на ударные ТУП ($V_{кр} = 1,3$ м/с, $L_n = 2$ м): а - деформированное состояние м/к мостового крана при расположении грузовой тележки в $2/3$ пролета моста ($2/3L_{пр}$); б - значения напряжений в месте соединения КБ1 с ГБ1 при массе полезного груза: 1 - 1т, 2 - 8т, 3 - 15 т

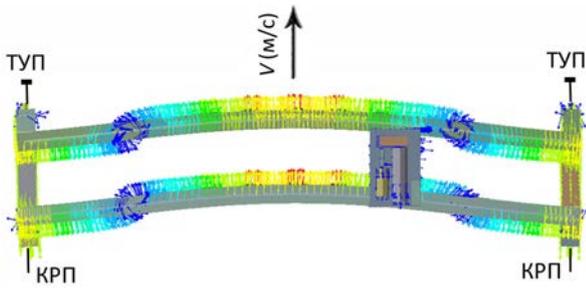
Согласно результатам вычислительных экспериментов наибольшее влияние на НДС м/к мостового крана оказывает скорость с которой кран наезжает на ТУП. Уменьшение скорости наезда на 20 % (с $V_{кр} = 1,3$ м/с до $V_{кр} = 1,1$ м/с) приводит к уменьшению напряженного состояния м/к мостового крана в процессе удара с ТУП на 39%. Установлено, что эксплуатационными состояниями оказывающими наиболее неблагоприятное воздействие на НДС м/к мостовых кранов в процессе их наезда на ТУП следует считать: $V_{кр} = \max$; $m_{гр} = \max$; $L_{п} = \min$, а также наибольшее смещение грузовой тележки от центра моста крана.

Помимо мостового крана, исследованы процессы ударного взаимодействия портального крана «ABUS» г/п 10 т с ТУП (см. рис. 4б). Установлено, что наиболее неблагоприятными эксплуатационными состояниями вызывающими наибольшую силу ударного взаимодействия портального крана с ТУП следует считать: $V_{кр} = \max$; $m_{гр} = \max$; $L_{в} = \min$; расположение стрелы крана под 90° по отношению к направлению движения крана.

Также проанализированы собственные частоты и формы колебаний кранов для оценки и анализа динамического поведения м/к мостового и портального кранов в процессе наезда на ТУП (рис.6). Установлено, что резонансного колебательного процесса м/к кранов после наезда на ТУП можно ожидать: для мостового крана на частотах выше 10 Гц (10,35 Гц); для портального – выше 1 Гц (1,24 Гц).

При этом напряжения возникающие в местах соединений главных балок с концевыми, вследствие ударного наезда мостовых кранов на ТУП, могут быть причиной возникновения повреждений (трещин) в этих местах. Таким образом, результаты вычислительных экспериментов подтвердили вклад ударного взаимодействия мостовых кранов с ТУП в общее НДС их м/к. Результаты вычислительных экспериментов показали, что наезд мостового крана на ТУП с различными эксплуатационными параметрами по разному влияет на конечное значение НДС м/к крана. Так, смещение положения грузовой тележки на 33% ($2/3 L_{пр}$) от центра моста крана ($1/2 L_{пр}$) увеличивает напряженное состояние в месте соединения главной балки с концевой, к которому ближе расположена грузовой тележки, на 8%. Увеличение длины подвеса с $L_{п} = 2$ м до $L_{п} = 6$ м приводит к уменьшению напряженного состояния в месте соединения главных балок с концевыми на 9%.

а



б

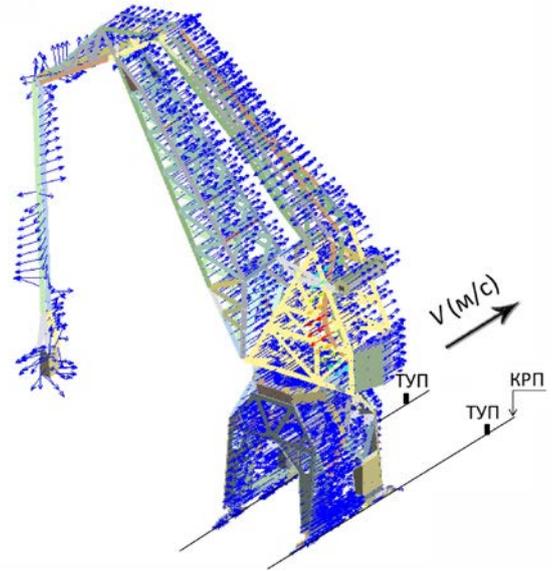


Рис.6. Оценка влияния собственных частот м/к мостового (а) и портального крана (б) на результат ударного взаимодействия с ТУП

2. Расчет резиновых буферов г/п кранов методом вычислительного эксперимента.

Точное определение усилий возникающих в буферах при наезде г/п кранов на ударные ТУП затруднено по причинам указанным в гл.1. Для уточнения влияния ударного нагружения на состояние буферов было проведено исследование поведения резиновых буферов марки БР в процессе наезда двухбалочного мостового крана г/п 15/3 т и портального крана «АВУС» г/п 10 т на ударные ТУП с учётом действительных физико-механических и конструкционных характеристик буферов и ТУП. В результате проведённых вычислительных экспериментов удалось определить действительную поглощаемую кинетическую энергию г/п кранов буферами БР-200 в процессе их взаимодействия с ТУП в различных эксплуатационных состояниях (рис.7). На основе полученных значений были определены коэффициенты учитывающие влияние скорости движения кранов и транспортируемого груза на гибком подвесе на конечную величину поглощённой кинетической энергии при наезде кранов на ТУП, в результате чего предложена корректировка формулы из ОСТ 24.191.37-78 по расчету и выбору резиновых буферов:

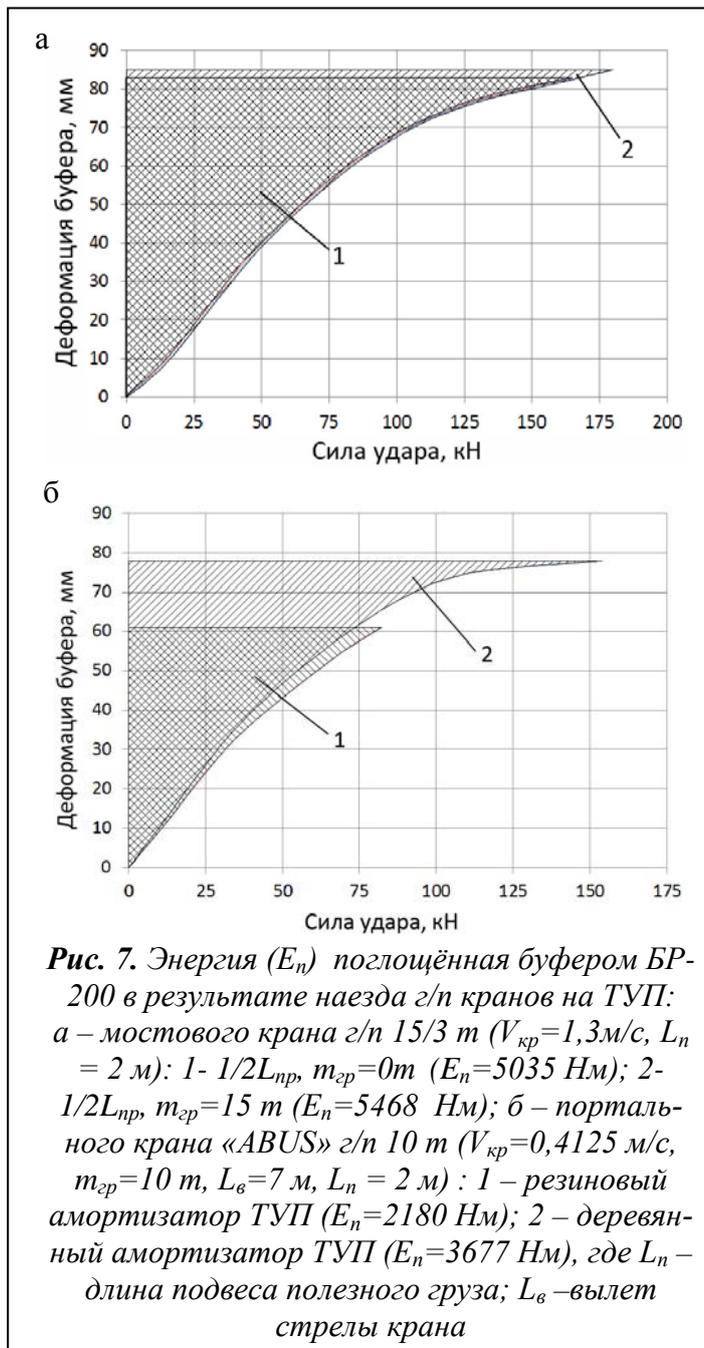
а) для мостового крана:

$$nE_1 < \frac{(m_{кр} + 0,15 \cdot m_{гр}) \cdot (0,68 \cdot V_{кр})^2}{2} < nE_2, \quad (8)$$

где E_1 и E_2 – максимальные рабочие энергоёмкости буферов; n – число буферов, одновременно воспринимающих кинетическую энергию крана; $M_{кр}$ – масса крана; $m_{гр}$ – масса транспортируемого груза; $V_{кр}$ – номинальная скорость крана.

б) для портального крана:

$$nE_1 < \frac{(m_{кр} + 0,22 \cdot m_{гр}) \cdot (0,7 \cdot V_{кр})^2}{2} < nE_2. \quad (9)$$



му анализу при наезде башенного крана со стрелой вдоль КРП на безударные ТУП резонансной частотой ожидается частота более 1 Гц (1,4 Гц), а при стреле 90° к КРП резонансная частота понижается до 1,05 Гц (рис.8).

Результаты вычислительных экспериментов показали, что после наезда башенного крана на безударные ТУП при некоторых эксплуатационных состояниях возникает отрыв задних колес ходовых тележек крана, что обусловлено накопленной кинетической энергией крана, когда при наезде на ТУП происходит недостаточно плавное торможение крана, при котором верхнее строение башенного крана продолжает движение вперёд наклоня при этом всю м/к крана (рис. 9).

Получено деформированное состояние и характеристики устойчивости положения в пространстве башенного крана КБ-408.21 г/п 10 т в зависимости от различных эксплуатационных состояний его наезда на безударные ТУП.

Результаты вычислительных экспериментов показали, что даже при соблюдении всех требований правил безопасности опасных производственных объектов на которых используются подъёмные сооружения кинетическая энергия некоторых типов г/п кранов, воспринимаемая резиновыми буферами в тупиковых участках пути превышает, по крайней мере в 2 раза, энергоёмкость буферов, что на практике приводит к разрушениям буферов, ТУП и оказывает неблагоприятное влияние на м/к г/п кранов (рис.2). При этом важно отметить, что точное определение усилий возникающих в буферах при наезде г/п кранов на ударные ТУП, как показал вычислительный эксперимент, возможно только при условии учёта как действительных физико-механических и конструктивных характеристик буферов, так и действительных металлоконструкций г/п кранов с учётом всех возможных эксплуатационных состояний.

3. Исследования процессов наезда г/п кранов на безударные ТУП

Изучение процессов взаимодействия башенных кранов с безударными ТУП проводилось на примере башенного крана КБ-408.21 г/п 10 т. Предварительно необходимо было подвергнуть анализу собственные колебания крана КБ-408.21 в различных эксплуатационных состояниях. Согласно проведённому

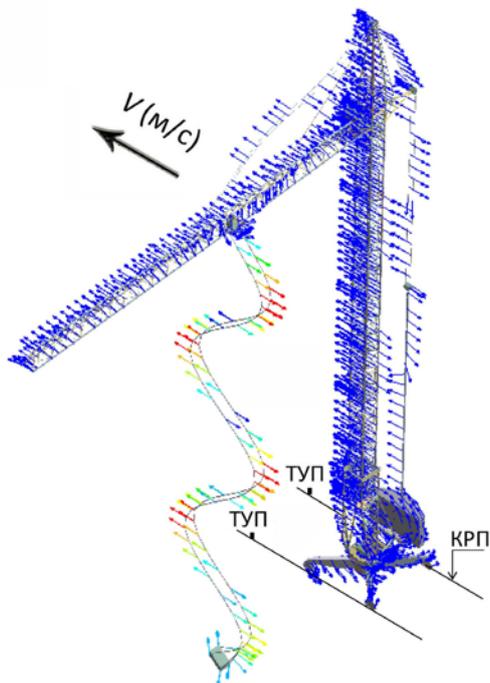


Рис. 8. Оценка влияния собственных частот м/к башенного крана на результат взаимодействия с безударными ТУП

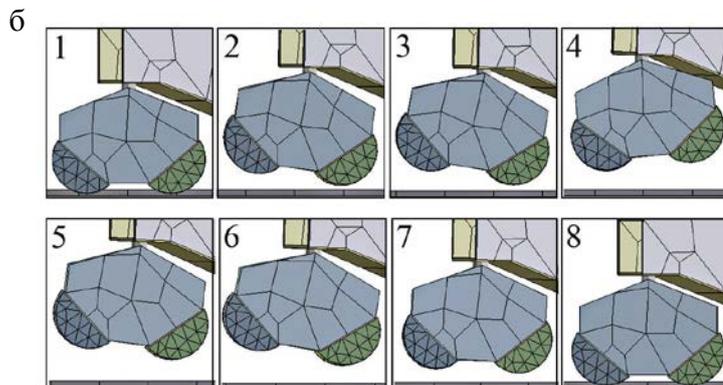
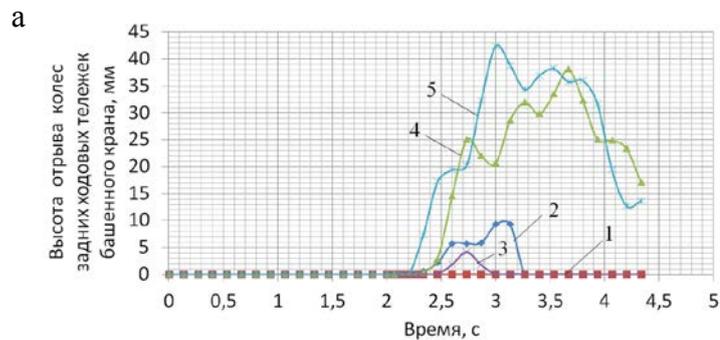


Рис. 9. Полученная в результате вычислительного эксперимента высота отрыва колёс задних ходовых тележек башенного крана КБ-408.21 г/п 10т при наезде крана на безударные ТУП: а- графики: 1- $V_{кр}=0,3$ м/с, $m_{эр}=1$ т, $L_в=16$ м; 2- $V_{кр}=0,3$ м/с, $m_{эр}=10$ т, $L_в=16$ м; 3- $V_{кр}=0,3$ м/с, $m_{эр}=1$ т, $L_в=40$ м; 4- $V_{кр}=0,3$ м/с, $m_{эр}=3$ т, $L_в=40$ м; 5- $V_{кр}=0,9$ м/с, $m_{эр}=10$ т, $L_в=16$ м; б-анимация

Результаты вычислительных экспериментов показали важность учета действительных м/к башенных кранов в задаче их наезда на безударные ТУП. Установлено что, динамические процессы наезда башенных кранов на безударные ТУП не могут быть отражены упрощенными моделями с несколькими степенями свободы. Показано, что существующие безударные ТУП являются не достаточно надежным противоаварийным средством гашения остаточной скорости башенного крана, а также, что наезд на них с номинальной и выше скоростью не безопасен. Исследовано НДС несущих элементов безударных ТУП.

Полагаясь на результаты вычислительных экспериментов по наезду башенного крана КБ-408.21 г/п 10 т на безударные ТУП, были установлены приближенные рабочие границы допускающие возможность работы крана вблизи безударных ТУП приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Ограничения на рабочие параметры наезда башенного крана КБ-408.21 г/п 10 т на безударные ТУП

Скорость крана, м/с	Масса груза, т	Вылет стрелы, м	Расположение стрелы относительно КРП, град	Допуск к работе крана вблизи безударных ТУП
$\leq 0,3$	≤ 1	< 40	≥ 0	допускается
$< 0,3$	< 10	< 20	≥ 0	допускается
0,3	> 1	≤ 40	≥ 0	запрещается

Также было проведено сравнение НДС м/к грузоподъемных кранов полученного по *IIIb* и *IIIд* расчетным комбинациям нагрузок с НДС полученного в результате динамического анализа процесса наезда кранов на ударные и безударные ТУП. Проведёнными исследованиями установлено, что для учета нагрузок на металлоконструкции г/п кранов возникающих в результате их наезда на ТУП при оценке предельного состояния кранов по *IIIb* и *IIIд* расчетным комбинациям нагрузок, предлагается введение дополнительного динамического коэффициента повышения напряжений в опасных сечениях м/к грузоподъемных кранов, в частности, до 4 для мостовых кранов, до 1,4 для порталных и до 1,22 для башенных кранов.

В четвертой главе «Экспериментальное исследование динамических процессов при наезде грузоподъемных кранов на ударные и безударные тупиковые упоры» представлены результаты серии натурных экспериментов по наезду мостового и башенного кранов на ударные и безударные ТУП. Изучены физико-механические свойства резинового буфера марки БР, получены важные характеристики процесса наезда г/п кранов на ТУП: значения скоростных параметров процесса наезда г/п кранов на ТУП, значения деформаций резинового буфера БР-200 при ударном наезде мостового крана г/п 15/3 т на ТУП и значения пройденного пути башенным краном КБ-408.21 по безударным ТУП. Проведено сравнение полученных значений натурных и вычислительных экспериментов.

Для исследования ударных процессов наезда г/п кранов на ТУП на основе конечно-элементных РМ кранов необходимо было точно смоделировать поведение резиновых буферов, для чего была выбрана модель гиперупругого материала Муни-Ривлина наиболее точно описывающая нелинейные физико-механические свойства при деформировании резинового буфера. Потенциальная функция W (потенциал или функция энергии деформации) гиперупругого материала Муни – Ривлина с двумя параметрами C_1 и C_2 определяется в терминах независимых инвариантов I_1, I_2, I_3 тензора деформаций Коши-Грина как

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) + 0,5k(I_3 - 1)^2, \quad (10)$$

где C_1 и C_2 - константы Муни – Ривлина; $0,5k$ – параметр несжимаемости материала, где $k = E / [3(1 - 2\mu)]$; E, μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.

Для одноосного растяжения (сжатия) величина напряжения в материале с учетом двух неизвестных параметров C_1 и C_2 будет определяться как:

$$\sigma_{xx} = 2(\lambda_{xx}^2 - \lambda_{xx}^{-1})(C_1 + C_2\lambda_{xx}^{-1}), \quad (11)$$

где $\lambda = d / d_0$ - степень деформации; d - размер деформированного образца; d_0 - размер недеформированного образца.

Константы Муни-Ривлина для гиперупругого материала определяются путем минимизации среднеквадратичного отклонения между диаграммой напряжения - деформации, полученной экспериментально и определенной по уравнению (11). Для вычисления значений коэффициентов Муни-Ривлина необходимо располагать экспериментальными данными.

Путем многократного (5 раз) статического сжатия буфера на прессе (рис.10) с максимальным усилием до 125 т была получена характеристика зависимости деформаций буфера от внешне приложенной нагрузки. Напряжения были определены как отношения сил осадки к фактической площади поверхности контакта рабочего инструмента с буфером, которая так же подвергалась измерению в ходе выполнения эксперимента. На основе полученных данных была построена графическая зависимость напряжений возникающих в буфере БР-200 от деформаций сжатия, представленная на рис.11.



Рис.10. Электрический пресс с максимальным усилием до 125 т в лаборатории неразрушающего контроля ОАО ПСК «Строитель Астрахани»

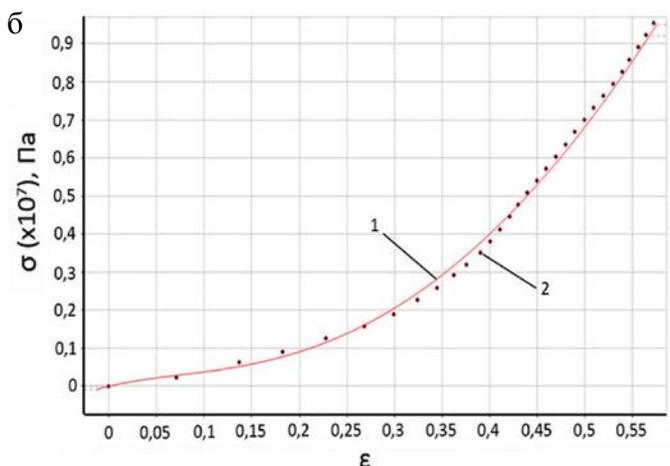
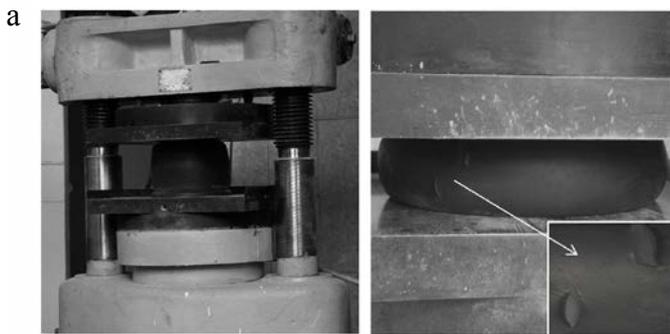


Рис.11. Экспериментальное исследование механических свойств буфера БР-200: а- процесс статического сжатия буфера: зона появления трещин; б – сравнение зависимостей напряжений (σ) от деформаций (ϵ) полученных теоретически и экспериментально: 1 - аппроксимирующая кривая; 2 – график полученный в результате эксперимента

Для определения параметров материала (констант Муни-Ривлина) использовалась программа ANSYS, которая располагает графическим инструментом подбора аппроксимирующих кривых, опираясь на данные экспериментальных исследований. На рис. 11 представлено сравнение аппроксимирующей кривой, полученной путем подсчета констант гиперупругого материала, с графиком полученным в результате эксперимента. Из рис. 11 видно, что теоретическая и экспериментальная кривые хорошо совпадают на всем диапазоне изменения деформаций. Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбранная функция энергии деформации Муни-Ривлина (10) с найденными константами достаточно точно описывает гиперупругий материал резинового буфера и может использоваться для процесса моделирования наезда г/п кранов с резиновыми буферами на ТУП.

Для проверки адекватности деформационного поведения резиновых буферов в конечно-элементной модели наезда мостового крана на ударные ТУП были проведены серии натуральных экспериментов в условиях ОАО ПСК «Строитель Астрахани» на мостовом кране г/п 15/3 т зав. №6860 рег. №39039 в пролете №1 склада готовой продукции (СГП).

Мостовой кран наезжал на ТУП со скоростью $V_k = 1,3$ м/с без транспортируемого груза ($m_{гр} = 0$ т) при расположении грузовой тележки в середине пролета моста крана ($1/2L_{пр}$). Перемещение движущегося мостового крана фиксировалось с помощью видеокамеры (SONY HXR-NX5E) в режиме высокоскоростной киносъемки (100 кадров/сек.). Для измерения скорости движения крана и величины деформации резинового буфера использовалась

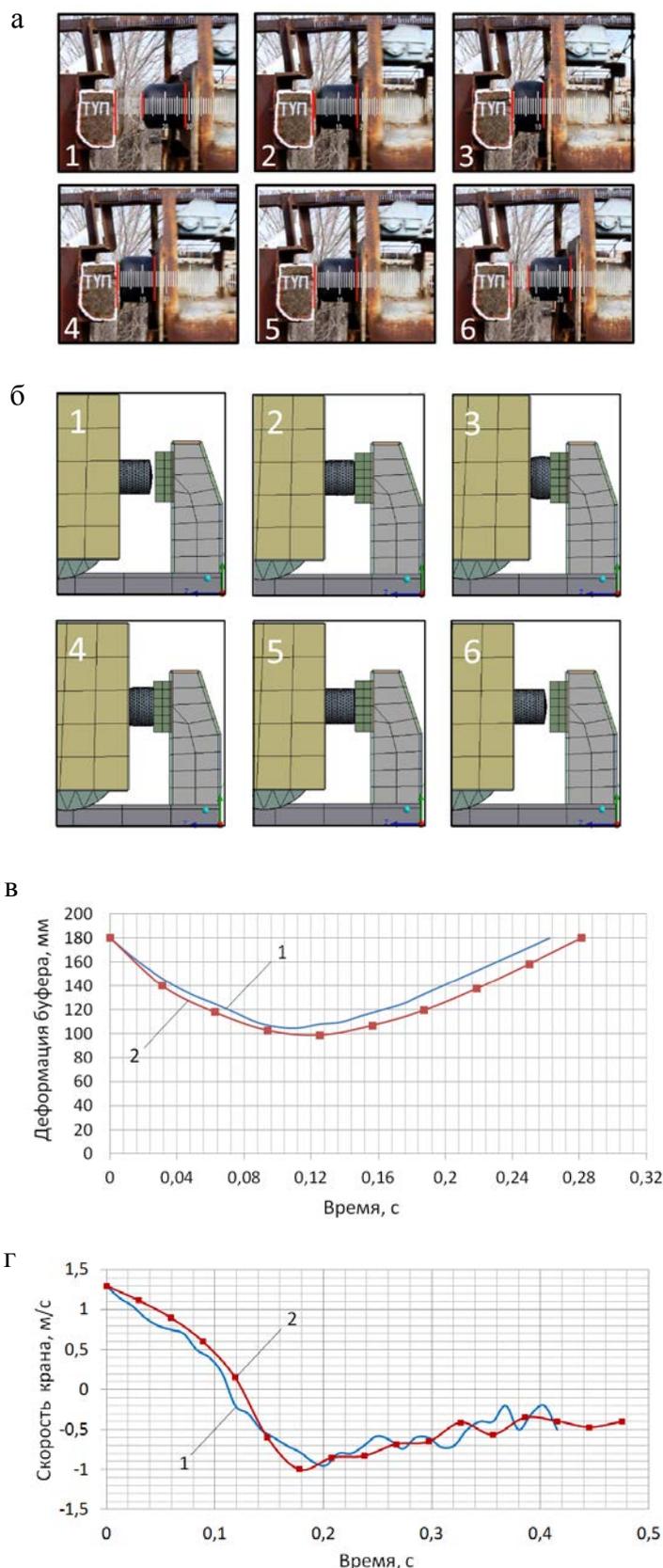


Рис. 12. Деформация буфера БР-200 (в) и изменение скорости мостового крана г/п 15/3 т (г) в процессе наезда на ТУП ($V_k = 1,3$ м/с, $m_{сп} = 0$ т): 1 – результат натурального эксперимента (а); 2 – результат вычислительного эксперимента (б)

измерительная линейка установленная за ТУП, значения на которой в каждую долю секунды фиксировались видеочамерой (рис. 12).

Сравнение полученного графика деформации резинового буфера БР-200 с результатами вычислительных экспериментов даёт основание утверждать о хорошей сходимости вычислительного эксперимента с натурным – расхождение полученных значений деформаций буфера составило в среднем менее 9%, при этом наибольшая сходимость вычислительного эксперимента оказалась в фазе сжатия по сравнению с фазой восстановления буфера. Такое расхождение экспериментального и теоретического значений объясняется, прежде всего, расхождением демпфирующих характеристик буфера в действительной и в конечно-элементной модели буфера крана, а также с возможными дефектами и неоднородностями в материале буфера, которые трудно учесть при моделировании.

В результате серии проведенных натуральных экспериментов по наезду башенного крана на безударные ТУП удалось получить среднее значение тормозного пути пройденного башенным краном по безударным ТУП и сравнить его со значениями полученными в вычислительном эксперименте (рис. 13). Результаты натурального эксперимента показали достаточно неустойчивый характер торможения башенного крана, что говорит о существовании больших динамических нагрузок, генерируемые башней с противовесом и стрелой, оказываемых на м/к башенного крана в процессе наезда на безударные ТУП. При этом график вычислительного эксперимента показал

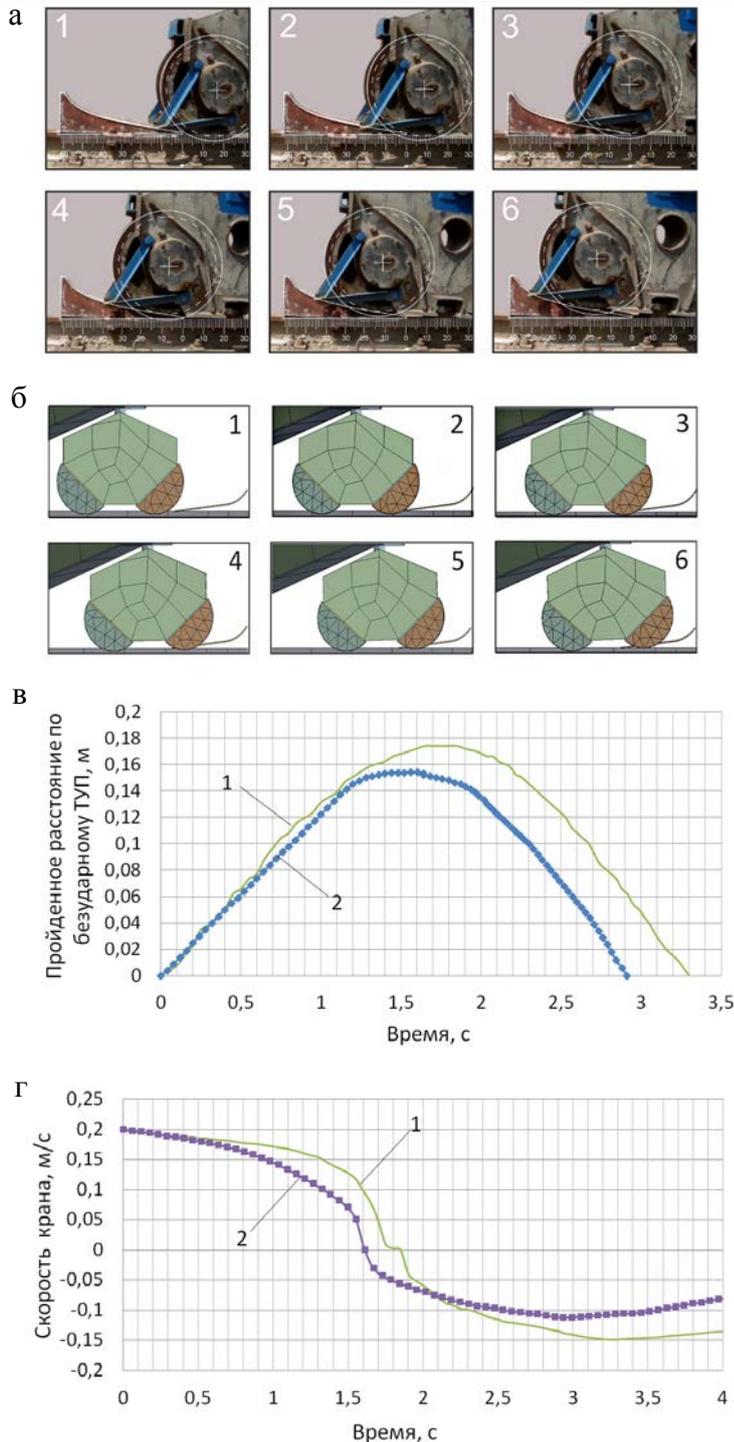


Рис.13. Значение тормозного пути (в) и изменение скорости башенного крана КБ-408.21 г/п 10 т (г) в процессе наезда на безударные ТУП ($V_k = 0,2$ м/с, $m_{гр} = 0$ т): 1-результат натурального эксперимента(а); 2- результат вычислительного эксперимента(б)

более быстрое гашение скорости башенного крана во время наезда на безударные ТУП и развитие меньшей скорости во время съезда с безударных ТУП по сравнению с графиком натурального эксперимента. Расхождение результатов вычислительного и натурального экспериментов объясняется введением в РМ ряда упрощений, прежде всего, исключением вращательных масс колёс ходовых тележек и замена их поверхностью трения с соответствующими коэффициентами трения качения и скольжения.

Результаты экспериментальной проверки показали, что разработанная методика моделирования процессов наезда г/п кранов на ТУП в среде МКЭ даёт расхождение с экспериментом в среднем около 9%. Таким образом, результаты физической верификации позволяют утверждать, что разработанные конечно-элементные РМ кранов с достаточной для инженерной практики точностью отражают физическую действительность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований получены следующие основные выводы и результаты:

1. Показано, что проблема пространственного поведения грузоподъемных кранов в процессе наезда на тупиковые упоры изучена недостаточно, прежде всего, как по причине чрезмерного упрощения расчётных моделей кранов – использовались, в основном, расчётные модели с 2-3 степенями свободы, практически не отражающие работу действительных металлоконструкций грузоподъемных кранов, так и по причине упрощения математических моделей – для вывода уравнений движения крана использовалось в основном уравнение Лагранжа второго рода 2-го и 3-го порядков.

2. Установлено, что как отечественные, так и зарубежные стандарты приводят различные методы расчета и определения энергоемкости буферов, которые не имеют достаточно обоснованных научных и аналитических подтверждений. Такие расчёты, практически не учитывающие действительную работу металлоконструкций кранов, а также их переменные эксплуатационные состояния, приводят к неточной оценке действительных ударных нагрузок возникающих при наездах кранов на тупиковые упоры.

3. Разработаны конечно-элементные расчётные модели грузоподъемных кранов со многими степенями свободы, отражающие поведение действительных металлоконструкций мостового, порталного и башенного кранов в процессе их наезда на ударные и безударные тупиковые упоры.

4. В результате проведённой серии вычислительных экспериментов по наезду мостового и порталного кранов на ударные тупиковые упоры установлено:

4.1. Полная картина пространственного напряжённо-деформированного состояния металлоконструкции двухбалочного мостового крана г/п 15/3т в процессе его наезда на ударные тупиковые упоры. Результаты вычислительных экспериментов показали, что наезд мостовых кранов на ударные тупиковые упоры вносит вклад в накопление остаточных деформаций как главных, так и концевых балок кранов. Установлено, что наибольшее значение напряжений при наезде мостовых кранов на тупиковые упоры возникают в местах соединения главных балок с концевыми. При этом, эксплуатационным состоянием оказывающим наибольшее влияние на результат напряженного состояния следует считать скорость с которой кран наезжает на тупиковые упоры. Согласно результатам вычислительных экспериментов увеличение скорости наезда на 20% приводит к увеличению напряженного состояния в местах соединения главных балок с концевыми на 39%.

4.2. Исследовано поведение резиновых буферов марки БР в процессе наезда грузоподъемных кранов на ударные тупиковые упоры. По результатам вычислительных экспериментов предложены расчетные зависимости для выбора резиновых буферов мостовых и порталных кранов. Установлено, что резиновые буфера грузоподъемных кранов должны рассчитываться на поглощение кинетической энергии крана движущегося со скоростью в среднем не менее 70% от номинальной.

4.3. Показано, что использование резиновых амортизаторов тупиковых упоров, в частности, вместо деревянных, снижает рабочую нагрузку на материал буфера крана на 40 - 45 %.

4.4. На основе выполненных экспериментальных исследований получены диаграммы $\sigma - \epsilon$ для резиновых буферов марки БР, необходимые для расчетов в сфере конечно-элементного проектирования грузоподъемных кранов.

4.5. Установлено влияние различных эксплуатационных состояний грузоподъемных кранов на работу резиновых буферов и металлоконструкций кранов в процессе их наезда на тупиковые упоры.

4.6. Результаты вычислительных экспериментов показали, что даже при соблюдении всех требований правил безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъёмные сооружения, кинетическая энергия кранов воспринимаемая резиновыми буферами в тупиковых участках рельсового пути превышает, по крайней мере в 2 раза энергоёмкость буферов на мостовых кранах и в 1,3 раза энергоёмкость буферов на порталных кранах, что на практике приводит к разрушениям буферов, тупиковых упоров и оказывает неблагоприятное влияние на металлоконструкции как грузоподъёмных кранов, так и подкрановых несущих конструкций.

5. В результате проведённой серии вычислительных экспериментов по наезду башенных кранов на безударные тупиковые упоры установлено, что существующие тупиковые упоры являются не достаточно надёжным противоаварийным средством гашения остаточной скорости башенного крана, а также, что наезд на них с номинальной и выше скоростью не безопасен; конструкции безударных тупиковых упоров имеют сечение не обеспечивающее их прочность при наезде на них башенных кранов. В работе предложено сечение обеспечивающее прочность конструкции безударных тупиковых упоров.

6. Определен динамический коэффициент повышения напряжений при сравнении напряжённно-деформированных состояний металлоконструкций кранов полученных по расчетным случаям IIb и IIд с напряжённно-деформированными состояниями полученными в результате динамического анализа наезда кранов на тупиковые упоры, который в опасных сечениях металлоконструкций мостовых кранов равен 4, для порталных кранов - 1,4 и башенных кранов – 1,22.

7. Результаты экспериментальной проверки показали, что разработанная методика моделирования процессов наезда грузоподъёмных кранов на тупиковые упоры в среде МКЭ даёт расхождение с экспериментом в среднем около 9%. Таким образом, результаты физической верификации позволяют утверждать, что полученные количественные результаты метода вычислительного эксперимента на основе МКЭ процесса наезда кранов на тупиковые упоры с достаточной для инженерной практики точностью отражают физическую действительность.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Рабей, В.В.** Анализ повреждаемости буферов мостовых кранов / **В.В. Рабей**// Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2012. - №2(18). - С.59 – 66.
2. **Рабей, В.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций мостовых кранов в процессе их наезда на тупиковые упоры / **В.В. Рабей** // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. - 2013. - №4(173). - С.42-46.
3. **Рабей, В.В.** Расчет резиновых буферов мостовых кранов грузоподъемностью до 50 т / **В.В. Рабей** // Безопасность труда в промышленности. - 2013. - №8. - С. 45-50.
4. Панасенко, Н.Н. Математическая модель процесса наезда башенных кранов на безударные тупиковые упоры/ Н.Н. Панасенко, **В.В. Рабей** // Механизация строительства. - 2014. - № 8. - С. 50-53.

Статьи в других научных изданиях и материалах конференций:

5. **Рабей, В.В.** Математическая модель взаимодействия кранов с тупиковыми упорами на основе теории МКЭ / **В.В. Рабей**// Материалы XV Московской международной межвузовской научно-технической конференции «Подъемно-транспортные, строитель-

- ные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». - М: Изд. МГАВТ, 2011. - С. 116-118.
6. Панасенко, Н.Н. Динамика ударного взаимодействия грузоподъемных кранов с препятствиями / Н.Н. Панасенко, **В.В. Рабей** // V сессия научного совета РАН по механике деформируемого твёрдого тела. – Астрахань: Изд. АГТУ, 2011. - С.57-59.
7. Панасенко, Н.Н. Состояние научно-исследовательских работ по динамике процесса наезда грузоподъёмных кранов на тупиковые упоры и препятствия/ Н.Н. Панасенко, **В.В. Рабей** // Инновационные технологии в машиностроении: сборник научных трудов. – Орск: Изд. ОГУ, 2012. - С. 186-192.
8. **Рабей, В.В.** Расчетно-динамические модели грузоподъемных кранов в задаче динамики их наезда на тупиковые упоры /**В.В. Рабей**// Труды XVI Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». - М.: Изд. МИИТ, 2012. - С. 26.
9. **Рабей, В.В.** Исследование процессов наезда грузоподъемных кранов на тупиковые упоры / **В.В. Рабей** // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых.- СПб.: Изд. НИУ ИТМО, 2012.- Вып. 3. - С.34-35.
10. **Рабей, В.В.** Изучение состояния буферов мостовых кранов /**В.В. Рабей**// Вестник АГТУ. - 2012. - 1(53). - С.49-53.
11. Панасенко, Н.Н. Математическая модель процесса ударного взаимодействия грузоподъемных кранов с препятствиями / Н.Н. Панасенко, **В.В. Рабей**// Сборник докладов и сообщений V Уральского Конгресса подъемно-транспортного оборудования. – Екатеринбург, 2012. - С. 213-218.
12. **Рабей, В.В.** Исследование процессов наезда башенных кранов на тупиковые упоры / **В.В. Рабей** // Сборник тезисов докладов V научно-технической конференции молодых специалистов и работников ООО «Газпром добыча Астрахань» «Инновации молодежи - потенциал развития нефтегазовой отрасли». – Астрахань: Изд. «Март», 2013. - С. 251-252.
13. **Рабей, В.В.** Анализ проблемы взаимодействия башенных кранов с безударными тупиковыми упорами / **В.В. Рабей** // материалы V международного научного симпозиума «Ударно-вибрационные системы, машины и технологии».- Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. - С.279-283.
14. **Рабей, В.В.** Математическая модель процесса наезда грузоподъемных кранов на тупиковые упоры / **В.В. Рабей** // Материалы Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2013» «Инновации в науке-инновации в образовании». – Новочеркасск: Изд. ЮРГТУ (НПИ), 2013. - С. 178-182.
15. Панасенко, Н.Н. Математическая модель напряженно-деформированного состояния главной балки однобалочного мостового крана на основе теории тонкостенных стержней / Н.Н. Панасенко, В.П. Юзиков, **В.В. Рабей**// Материалы Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2013» «Инновации в науке-инновации в образовании». – Новочеркасск: Изд. ЮРГТУ (НПИ), 2013. - С. 167-171.
16. Панасенко, Н.Н. Конечно-элементная модель демпфирования колебаний несущих металлоконструкций грузоподъемных кранов / Н.Н. Панасенко, **В.В. Рабей**, Л.С. Синельщикова // Вестник АГТУ. - Астрахань: Изд-во АГТУ, 2013. - 2(56). - С.41-49.
17. **Рабей, В.В.** Математическая модель взаимодействия грузоподъёмных кранов с тупиковыми упорами /**В.В. Рабей** // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 757-767.

18. Панасенко, Н.Н. Конечно-элементные компьютерные модели подъёмных сооружений/ Н.Н. Панасенко, А.В. Синельщиков, **В.В. Рабей**, Л.С. Синельщикова// Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Современное машиностроение. Наука и образование». - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 743-756.

Статьи в зарубежных изданиях (Scopus):

19. **Rabey, V.V.** The Study of a Stress-Strain State of Bridge Cranes' Metal Constructions in the Process of a Collision with the End Stops /**V.V. Rabey** // FME Transactions. - 2013. - V.41. - №3. – P.195-201.

20. **Rabey, V.V.** A Study of Run onto the Wheel Contact Crane Stops of Tower Cranes / **V.V. Rabey** // International Journal of Mechanics. - 2013. - V.7. - №4. - P. 379-384.

21. Panasenko, N.N. The Calculated Justification of Seismic Stability of Load-Lifting Cranes / N.N. Panasenko, A.V. Sinelshchikov, **V.V. Rabey** // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. - 2014. - V.9. - P. 104-123.

Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах:

В работе [4] автору принадлежит разработка расчетно-динамической модели башенного крана КБ-408.21 г/п 10 т и проведение на её основе вычислительных экспериментов по наезду крана на безударные тупиковые упоры. В работе [6] автору принадлежит анализ проблемы наезда г/п кранов на тупиковые упоры, обобщение эксплуатационного состояния буферов различных типов кранов - мостовых, козловых, порталных. В работе [7] автору принадлежит обзор и анализ состояния научно-исследовательских работ по проблеме наезда г/п кранов на тупиковые упоры. В работе [11] автору принадлежит анализ существующих стандартов, норм и правил в которых приведены методы расчета и выбора буферных устройств, а также проведение вычислительных экспериментов по наезду расчетных моделей мостового и порталного кранов на ударные тупиковые упоры. В работе [15] автору принадлежит непосредственное участие в разработке математической модели напряженно-деформированного состояния главной балки однобалочного мостового крана на основе теории тонкостенных стержней. В работе [16] автору принадлежит апробирование разработанной конечно-элементной модели демпфирования колебаний несущих металлоконструкций грузоподъемных кранов путем разработки конечно-элементных расчетных моделей кранов и проведения на их основе вычислительных экспериментов. В работе [18] автору принадлежит разработка конечно-элементных расчетных моделей мостового двухбалочного крана г/п 15/3 т и порталного крана «ABUS» г/п 16 т. В работе [21] автору принадлежит разработка конечно-элементных расчетных моделей мостовых кранов г/п 160/32 т, 16/3,2 т и 15/3 т.

Подписано в печать 12.11.2014г.
Формат А5, Усл. печ. л. 1,0 цифровая печать.
Тираж 100 экз.

Отпечатано в ЦОП «Василеостровский»
Россия, г. Санкт-Петербург,
В.О., 6-я линия, д. 29.
тел./факс: 328-61-84
e-mail: vs@copy.spb.ru