

На правах рукописи



Потахов Денис Александрович

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ОПОРНОГО КОНТУРА
И УСТОЙЧИВОСТИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ
КРАНОВ В ПРОЦЕССЕ НЕНОРМИРУЕМОГО
ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Специальность: 05.05.04 – Дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Ватулин Ян Семенович.

Официальные оппоненты: **Емельянова Галина Александровна**
доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», г. Москва, кафедра «Мосты и тоннели», профессор;

Грачев Алексей Андреевич
кандидат технических наук
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа транспорта, доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тулский государственный университет».**

Защита состоится «16» декабря 2021 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета Д 212.223.02 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/potahov-denis-aleksandrovich>

Автореферат разослан «03» ноября 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Е. М. Олещенко

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Стреловые самоходные краны (ССК) являются наиболее распространённым видом грузоподъемного оборудования и в силу своей универсальности применяются во всех отраслях промышленности при производстве погрузочно-разгрузочных работ.

Обеспечение гарантированной устойчивости ССК является приоритетной задачей при совершенствовании процесса погрузочно-разгрузочных работ (особенно при работе аварийно-спасательных служб), так как потеря устойчивости грузоподъемного крана создает угрозу жизни и здоровью людей, приводит к повреждению элементов и разрушению ССК, повреждению близлежащих объектов инфраструктуры и частной собственности.

Особый интерес представляют эксплуатационные режимы работы ССК с ненормируемыми внешними воздействиями, такими как: инерционные нагрузки (раскачивание груза, пуск и торможение устройств крана), неравномерное вдавливание выносных опорных элементов в опорное основание, ошибки организации производства погрузочно-разгрузочных работ, ошибки управления оператора-крановщика, ветровые нагрузки.

Выполнение погрузочно-разгрузочных работ кранами на железнодорожном (ж.-д.) ходу характеризуется определенными особенностями, которые не учтены методиками и инструкциями по эксплуатации пневмоколесных ССК. В частности, устройство опорного контура ж.-д. кранов при производстве работ на насыпях сопровождается вырубкой ниши в зоне земляного полотна и части балластной призмы с возведением шпальной выкладки (клетки), на которой вывешивается грузоподъемный кран. Таким образом, грузоподъемная машина на ж.-д. ходу работает на значительном возвышении, образуемом земляным полотном и шпальными клетями, которое значительно изменяет спектр нагружений, действующего на грузоподъемный кран, добавляя, в том числе, действие ненормируемых внешних воздействий. Степень уплотнения грунта на обочинах насыпи ж.-д. пути существенно ниже, чем в основном теле насыпи, поэтому при динамических нагрузках от опор могут возникать просадки грунта при опирании крана на шпальные выкладки. При этом несущая способность грунтов даже на одной опорной площадке может быть неоднородна, поэтому установка опор пневмоколесных кранов на грунт с использованием штатных подкладок также может приводить к просадке грунта под опорой.

Перечисленные выше ненормируемые воздействия также обуславливают изменение условий нагружения элементов исполнительных устройств кранового оборудования, в частности, свойств материала уплотнений гидравлических устройств, накопление усталостных повреждений сопряженных элементов и, в конечном итоге, появление местных остаточных деформаций стенок гильзы, направляющей втулки, штока, которые сопровождаются разрушением и выдавливанием поясков и манжет в уплотняемый

зор, что приводит к увеличению уплотняемого зазора и снижению герметичности гидроцилиндра выносной опоры грузоподъемной машины. Снижение герметичности гидроцилиндра приводит к утечкам рабочей жидкости через изношенные уплотнения, что может привести к просадке опор при нагрузке. Такие ненормируемые внешние воздействия слабо учтены или совсем не учтены существующими нормативными документами.

Таким образом, неоднородная несущая способность грунтов опорных площадок или утечки рабочей жидкости через уплотнения гидроцилиндров, или их сочетание могут привести к его опрокидыванию при повороте стрелы с грузом в сторону проседающей опоры.

Из чего можно заключить, что в отличие от пневмоколесных ССК методика прочностного анализа несущих элементов ССК на ж.-д. ходу требует дополнительного учета особенностей формирования факторов нагружения опорного контура особенно в режиме динамического нагружения.

Для машиностроительной промышленности важным направлением является работа по усовершенствованию и развитию методов анализа ССК и их систем безопасности, способствующих надежной эксплуатации грузоподъемных кранов. Следовательно, задача повышения безопасности выполнения погрузочно-разгрузочных работ является актуальной.

В диссертации выполнены исследования ж.-д. грузоподъемных кранов; при этом полученные результаты и разработанные математические модели могут распространяться ко всем типам свободно стоящим грузоподъемным машинам, расположенным на грунтовом основании.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам анализа и исследования текущего состояния состояния подъемно-транспортных машин посвящены работы: Абрамовича И. И., Аксенова И. П., Александрова М. П., Бардышева О. А., Вайнсона А. А., Ватулина Я. С., Вышнеградского И. А., Гордиенко В. Е., Гохберга М. М., Дукельского А. И., Емельяновой Г. А., Зарецкого А. А., Зайцева Л. В., Кифера Л. Г., Козьмина П. С., Коровина С. К., Корытова М. С., Попова В. А., Репина С. В., Ряхина В. А., Сальникова В. Г., Семенова Ю. Е., Соколова С. А., Спиваковского А. О., Тимина Ю. Ф., Щербакова В. С.. Тем не менее, вопросы повышения безопасности работы грузоподъемных кранов в динамическом режиме нагружения не получили достаточного развития.

Цель работы заключается в исследовании взаимодействия опор грузоподъемного крана с грунтом опорного основания и работоспособности элементов опор крана, находящегося в динамическом режиме нагружения, и разработки мероприятий по повышению надежности и безопасности работы крана на выносных опорах.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель динамики работы ж.-д. крана при совершении рабочих операций, учитывающую действия сил инерции конструктивных элементов и податливость опорного основания.

2. Определить закономерности изменения кинематических и динамических характеристик в процессе балансирования крана на выносных опорах.

3. Исследовать условия нагружения ж.-д. крана при работе в кривых участках пути.

4. Установить закономерности формирования и влияния нагрузок на гидроцилиндры аутригеров в опорном контуре грузоподъемного крана с учетом деформируемости элементов конструкции, свойств грунта, шпальной выкладки и инерционных нагрузок в трехмерной постановке задачи.

5. Определить зависимости утечек в гидроцилиндре вывешивания от совокупности действующих внешних силовых факторов.

6. Выполнить валидацию виртуального прототипа ССК на основе проведения натурального эксперимента по исследованию процесса трансформации ядра опирания.

7. Разработать систему управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (ANFIS).

Объектом исследования являются стреловые самоходные краны на пневмоколесном и ж.-д. ходу, оснащенные телескопическим стреловым оборудованием, выполняющие производство погрузочно-разгрузочных и монтажных работ в ограниченном пространстве земляного полотна.

Предмет исследования – методы анализа устойчивости грузоподъемных машин, прочности и работоспособности их конструктивных элементов.

Научную новизну работы составляют:

1. Разработанная пространственная динамическая модель, включающая численную модель грузоподъемного крана, реологическую модель грунта и модель шпальной выкладки, отражающая физическую картину деформирования системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт» и учитывающая влияние шпальной выкладки, структуры грунта (пластических и упругих свойств) и действия инерционных нагрузок на элементы опорного контура грузоподъемной машины. Разработанная реологическая модель грунта применима ко всем типам свободно стоящим грузоподъемным машинам, расположенным на грунтовом основании.

2. Разработанная математическая модель, адекватно описывающая процесс балансирование грузоподъемной машины на диагонально расположенных выносных опорах при вращении поворотной части крана с грузом и неравномерном внедрении опорных элементов в грунт.

3. Разработанные расчетные схемы и полученные зависимости нагружения элементов ж.-д. крана при работе в кривых участках пути.

4. Полученные закономерности формирования и влияния нагрузок на гидроцилиндр аутригера опорного контура грузоподъемного крана с учетом деформируемости элементов конструкции, свойств грунта, шпальной выкладки и инерционных нагрузок в трехмерной постановке задачи, при учете совместного деформирования поршня, гильзы, штока, направляющей

штулки, опорно-направляющих колец, уплотнений силового гидроцилиндра, свойств рабочей жидкости.

5. Разработанная трехмерная, неравномерная по сечению сопряжения модель износа (радиального зазора) сопряженных элементов уплотнительного узла гидроцилиндра.

6. Разработанная методика оценки герметичности гидроцилиндра, учитывающая взаимосвязь: «нагрузка на гидроцилиндр – число циклов работы уплотнений – неравномерный радиальный зазор сопряжений «поршень – гильза» и «направляющая втулка – шток» – величина перетечек рабочей жидкости – усадка штока»; «усадка штока – удельная утечка рабочей жидкости – класс негерметичности уплотнений».

7. Разработанная система управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (ANFIS).

Теоретическая значимость работы заключается в совершенствовании методов анализа устойчивости грузоподъемных машин, прочности и работоспособности их конструктивных элементов, находящихся в динамическом режиме нагружения с учетом влияния податливости опорного основания.

Практическую ценность представляют:

1. Уточненные методы анализа грузоподъемных машин и прочности их элементов, находящихся в динамическом режиме нагружения с учетом влияния податливости опорного основания, необходимые для создания оптимальных конструктивных исполнений элементов опорного контура грузоподъемных кранов.

2. Методика оценки герметичности гидроцилиндра, которая: позволяет исследовать работу уплотнений любых форм и сечений и определять класс негерметичности уплотнений по величине усадки штока гидроцилиндра; применима к анализу возвратно-поступательного движения штока.

3. Программа контроля и управления грузовой и собственной устойчивостью транспортного средства.

4. Система управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (ANFIS).

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач исследования выполнено путем системного анализа объекта исследования, интеграции аналитических, численных и экспериментальных методов. Теоретические положения исследований основаны на элементах: теории грузовой и собственной устойчивости грузоподъемных машин, теоретической механики, теории механики грунтов, метода конечных объемов, метода конечных элементов, гидродинамики, теории нечетких множеств и теории планирования эксперимента.

В качестве инструментов имитационного моделирования использовались: среды Simulation, Motion и Flow Simulation комплекса SolidWorks; подсистема Simulink и программный пакет Fuzzy Logic Toolbox (пакет нечеткой

логики) программы Matlab. Для проведения анализа и обработки результатов моделирования и экспериментов применялись следующие программные среды: Microsoft Office 2010, MatLab R2014a, Mathcad 15.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Пространственная динамическая модель, включающая численную модель грузоподъемного крана, реологическую модель грунта и модель шпальной выкладки, отражающая физическую картину деформирования системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт».

2. Математическая модель, адекватно описывающая балансирование грузоподъемной машины на диагонально расположенных выносных опорах в процессе вращения поворотной части крана с грузом при неравномерном внедрении опорных элементов в грунт.

3. Расчетные схемы и зависимости нагружения элементов ж.-д. крана при работе в кривых участках пути.

4. Закономерности формирования и влияния нагрузок на гидроцилиндр аутригера опорного контура грузоподъемного крана с учетом деформируемости элементов конструкции, свойств грунта, шпальной выкладки и инерционных нагрузок в трехмерной постановке задачи.

5. Трехмерная, неравномерная по сечению сопряжения модель износа (радиального зазора) сопряженных элементов уплотнительного узла гидроцилиндра.

6. Методика оценки герметичности гидроцилиндра, учитывающая взаимосвязь: «нагрузка на гидроцилиндр – число циклов работы уплотнений – неравномерный радиальный зазор сопряжений «поршень – гильза» и «направляющая втулка – шток» – величина перетечек рабочей жидкости – усадка штока»; «усадка штока – удельная утечка рабочей жидкости – класс негерметичности уплотнений».

7. Система управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (ANFIS).

Область исследования соответствует предметной области знаний, определенной паспортом научной специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъёмно-транспортные машины, а именно п. 2 «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения» и п. 4 «Методы управления машинами, машинными комплектами и системами и контроля качества технологических процессов, выполняемых машинами».

Степень достоверности научных положений и выводов подтверждается: корректным применением положений используемых методов и теорий; адекватностью разработанных математических моделей реальным процессам; применением современного математического аппарата с современными вычислительными методами, апробированных методик планирования и проведения эксперимента, поверенной измерительной и регистрирующей

аппаратуры; подтверждением полученных теоретических результатов данными эксперимента.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Наземные транспортно – технологические комплексы» Петербургского государственного университета путей сообщения (Санкт-Петербург, 2017-2021) и на следующих научно-технических конференциях: IX и X Международный симпозиум «Прорывные технологии электрического транспорта Eltrans'» (г. Санкт-Петербург, 2017 г., 2019 г.); V и VII Международная научно-техническая конференция «Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век» (г. Санкт-Петербург, 2017 г., 2020 г.); Национальная конференция «Перспективы будущего в образовательном процессе» (г. Санкт-Петербург, 2018 г., 2019 г.); LXXVIII и LXXX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (г. Санкт-Петербург, 2018 г., 2020 г.); Научно-практическая конференция, посвященная 100-летию Е.Я. Красковского (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); VIII и IX Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы автоматизированного проектирования на транспорте» (г. Санкт-Петербург, 2019 г., 2021 г.).

Результаты исследования внедрены в процесс проведения лабораторных и практических работ кафедры «Наземные транспортно – технологические комплексы» ФГБОУ ВО ПГУПС.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 печатных научных работ, из них 12 в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, 1 – в Scopus, 1 патент на изобретение №2700312, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018616841.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Диссертационная работа изложена на 190 страницах машинописного текста, в том числе содержит 7 таблиц, 114 рисунков, 117 наименований литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цель и задачи, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе исследовано влияния условий эксплуатации на состояние опорного контура и устойчивость грузоподъемных кранов; выполнен анализ аварийности грузоподъемных кранов; выполнен анализ существующих методов исследования устойчивости ССК и оценки нагруженного состояния элементов опорного контура; обоснована цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе описано создание и настройка численной модели системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт». Путем математического аналитического и численного моделирования проведено

теоретическое исследование процессов формирования и изменения параметров динамического нагружения грузоподъемного крана и его элементов. Представлены результаты математического моделирования; сформулированы закономерности изменения кинематических, динамических, прочностных и гидродинамических характеристик грузоподъемного крана и его элементов.

В третьей главе приведены экспериментальные исследования динамического нагружения грузоподъемного крана. Рассмотрен процесс трансформации опорного контура грузоподъемного крана. Показана сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований на численном прототипе и натурном ССК. Экспериментально подтверждена адекватность разработанной концепции математического моделирования работы грузоподъемного крана, находящегося в динамическом режиме нагружения.

В четвертой главе представлена разработка системы управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (ANFIS), позволяющей непрерывно контролировать и прогнозировать изменения параметров технического состояния грузоподъемного крана во времени, управлять исполнительными механизмами крана.

В заключении изложены основные результаты проведенного исследования и показаны перспективы его развития.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Пространственная динамическая модель, включающая численную модель грузоподъемного крана, реологическую модель грунта и модель шпальной выкладки, отражающая физическую картину деформирования системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт».

С целью установления характера взаимодействия элементов опорного контура ж.-д. грузоподъемного крана с грунтовой опорной поверхностью разработанная численная модель системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт», которая настраивается согласно: системе дифференциальных уравнений, решение которой описывало бы с достаточной точностью свободные колебания конструктивных элементов грузоподъемного крана; реакциям опор; геометрическому соответствию конструктивной структуры элементов, деталей и узлов крана; жесткостным и прочностным параметрам элементов, деталей и узлов крана и шпальных выкладок; теории механики грунтов (рисунок 1, а).

Численная модель ж.-д. крана основана на конструктивной структуре ж.-д. крана Сокол 80.01.

Компьютерное моделирование осуществляется в среде специализированного функционала Simulation (метод конечных элементов (МКЭ))

и Motion (построение системы дифференциальных уравнений движения с последующим решением путем их интегрирования) программного комплекса SolidWorks.

С целью достижения адекватности поведения модели в Motion SolidWorks вводится специальный элемент – «фиктивный» шарнир, представляющий собой шарнир Гука, оснащенный группой упругих элементов и демпфером (рисунок 1, б). Введение в конструкцию подобных элементов (два в телескопическую стрелу, по одному в каждую выносную опору) позволяет моделировать собственную изгибную деформацию сопряженных элементов конструкции под действием инерционных нагрузок. Настройка параметров «фиктивного шарнира» осуществляется по результатам статических испытаний и частотных исследований.

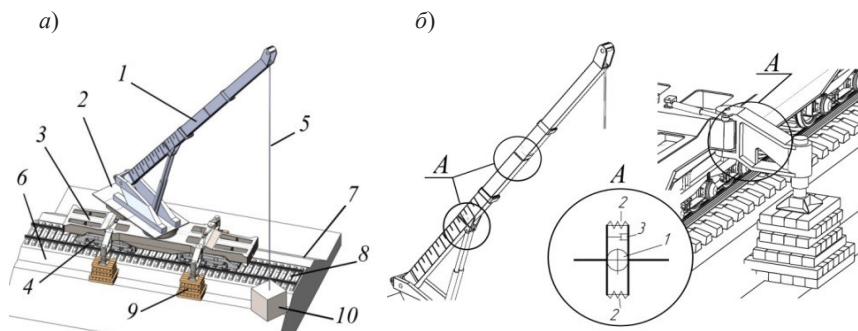


Рисунок 1 – Численное моделирование: а – Численная модель системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт». Численная модель грузоподъемного крана: 1 – телескопическая стрела; 2 – поворотная платформа; 3 – подкрановая платформа; 4 – ходовая тележка; 5 – грузовой канат. Модель участка ж.-д. пути: 6 – балластная призма; 7 – земляное полотно; 8 – рельсошпальная решётка. Прочие элементы: 9 – шпальная клеть; 10 – груз; б – Схема реализации «фиктивного» шарнира: 1 – сферический шарнир; 2 – пружина; 3 – демпфер

Реологическая модель шпальной выкладки представляет собой систему из двух элементов, между которыми расположен сферический шарнир, один из которых имеет контакт с грунтом, а другой имеет вязкоупругую связь в двух плоскостях посредством моделей Кельвина-Фойгта, параметры которых соответствуют жесткости шпальной клетки в заданных направлениях.

В качестве основы математической модели грунта для описания поведения основания при нагружении применяется нелинейно-деформируемая модель С.Н. Клепикова.

Единая схема взаимодействия каждого аутригера ж.-д. крана со шпальной клетью и шпальной клетки с грунтом опорной поверхности, состоящая

из реологической модели грунта и модели шпальной выкладки, представлена на рисунке 2.

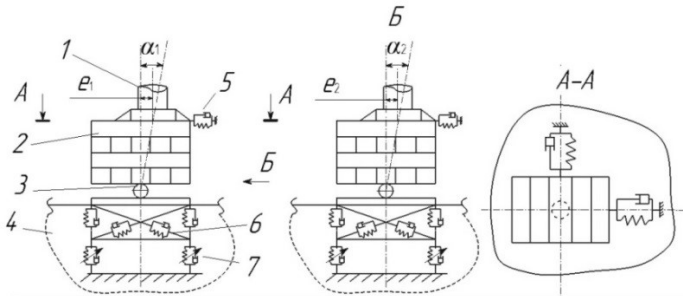


Рисунок 2 – Система «выносная опора – шпальная выкладка – грунт»:

1 – выносная опора; 2 – шпальная клетка; 3 – сферический шарнир;

4 – реологическая модель грунта; Модели Кельвина-Фойгта;

5 – вертикальные, 6 – наклонные, 7 – специальные; α_1, α_2 – углы деформации шпальной выкладки; e_1, e_2 – смещение опорной плиты аутригера

В результате исследований динамического нагружения системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт» получены: временные зависимости сил противодействия между выносными опорами и шпальными выкладками по осям X, Y, Z ; временные зависимости величины осадки грунта под шпальными выкладками ($h = f(t)$), углов наклона платформы крановой установки ($\alpha = f(t)$), шпальных выкладок, опорных плит и др.

2. Математическая модель, адекватно описывающая балансирование грузоподъемной машины на диагонально расположенных выносных опорах в процессе вращения поворотной части крана с грузом при неравномерном внедрении опорных элементов в грунт.

В четырехопорном контуре грузоподъемного крана ребро опрокидывания в общем случае может не совпадать с линией опорного контура; чаще всего имеет место трехопорная схема опирания. В процессе вращения поворотной платформы при диагональном расположении стрелового оборудования в течение определенного промежутка времени опирание крана осуществляется только на две диагональные опоры. Приращение потенциальной энергии, получаемое в процессе качения крановой установки вокруг оси, проходящей через эти опоры, преобразуется в кинетическую энергию удара штока гидродомкрата о подпятник, вследствие чего происходит внедрение опорной плиты (клетки) в грунт. Циклически повторяющийся процесс трансформации схемы опирания (балансирование) нарушает равновесие уплотненного состояния грунта, вызывая прогрессирующую осадку диагонально расположенных опор, что влечет за собой увеличение угла наклона платформы, и, следовательно, снижает устойчивость грузоподъемного крана.

С целью установления динамических параметров грузоподъемного крана в условиях нарушения опорного контура составляется и решается система дифференциальных уравнений балансирования грузоподъемного крана на выносных опорах. В конечном виде уравнение балансирования выглядит следующим образом:

$$m_2 \cdot g \cdot (l_3 \cdot \sin \varphi_2) - (J_1 + m_2 [(l_3 \cdot \sin \varphi_2)^2 + l_2^2]) \cdot \frac{2 \cdot \varphi_1 \cdot \omega_2^2}{\varphi_2^2} = 0, \quad (1)$$

где m_2 – масса поворотной платформы с грузом; g – ускорение свободного падения; l_3 – расстояние от оси вращения поворотной платформы до центра тяжести; φ_2 – угол поворота поворотной платформы; J_1 – момент инерции подкрановой платформы относительно оси балансирования; l_2 – проекция на вертикальную ось расстояния от оси балансирования до центра тяжести; φ_1 – угол наклона подкрановой платформы; ω_2 – угловая скорость поворотной платформы.

Согласно полученному уравнению, которое выведено впервые, определены зависимости: $v = f(h, \omega_2)$, $m = f(h, \omega_2)$ (v – скорость выносной опоры; h – величина просадки; m – масса грузоподъемной машины, задействованная в процессе удара) (рисунок 3).

С целью определения ударной нагрузки применяется приближенная теория удара. Задавшись конструктивными параметрами элементов, определены зависимости составляющих ударной нагрузки ($F_{уд}^в$ – продольная, $F_{уд}^г$ – поперечная) в плоскости балансирования: $F_{уд}^в = f(m, h)$, $F_{уд}^г = f(m, h)$ (рисунок 4). В случае мгновенной просадки грунта под опорой анализ ведется аналогичным образом.

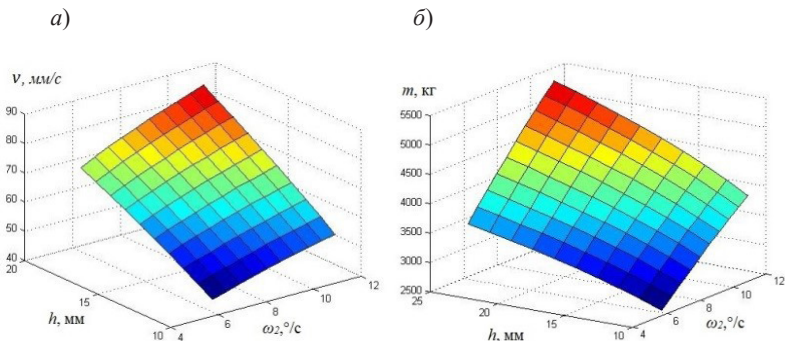


Рисунок 3 – Зависимости $v = f(h, \omega_2)$ (а) и $m = f(h, \omega_2)$ (б)

Определив скорость и массу грузоподъемной машины, задействованную в процессе удара, установлено влияние удара выносной опоры о шпальную клеть на состояние грунта опорной площадки согласно теории удельных импульсов профессора Н.Я. Хархуты.

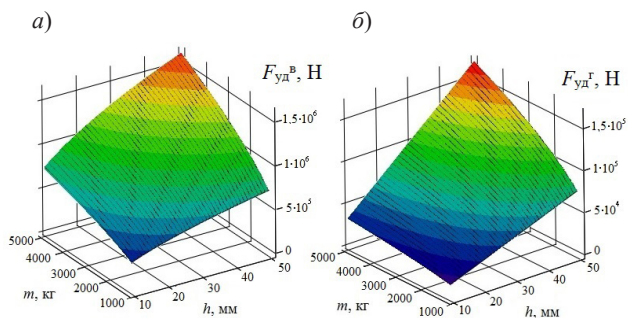


Рисунок 4 – Зависимости $F_{уд}^в = f(m, h)$ (а) и $F_{уд}^г = f(m, h)$ (б)

Валидация виртуального прототипа ССК на основе проведения натуральных экспериментальных исследований

С целью исследования процесса трансформации ядра опирания грузоподъемного крана и подтверждения адекватности разработанной концепции математической модели динамики работы грузоподъемного крана проведены натурные экспериментальные исследования динамического нагружения грузоподъемного крана типа КС-45717 и аналогичные динамические испытания на трехмерной численной модели данного грузоподъемного крана (рисунки 5, 6).

В качестве меры адекватности математической модели выбраны реакции выносных опор грузоподъемного крана, которые в проводимом эксперименте получены из значений радиальной деформации стенки гидроцилиндра по аналитическим зависимостям.



Рисунок 5 – Проведение эксперимента: а – Грузоподъемный кран типа КС-45717; б – размещение тензорезисторов на опоре; в – измерительная и регистрирующая аппаратура

В результате проведенных экспериментальных исследований получены временные зависимости реакций опор, действующих напряжений наружной поверхности гидроцилиндра и балки выносной опоры в процессе вращения поворотной платформы крана (рисунок 6). В соответствии с полученными

данными реакций опор можно сделать вывод, что в результате вращения платформы в проводимом эксперименте происходила трансформация опорного контура грузоподъемного крана.

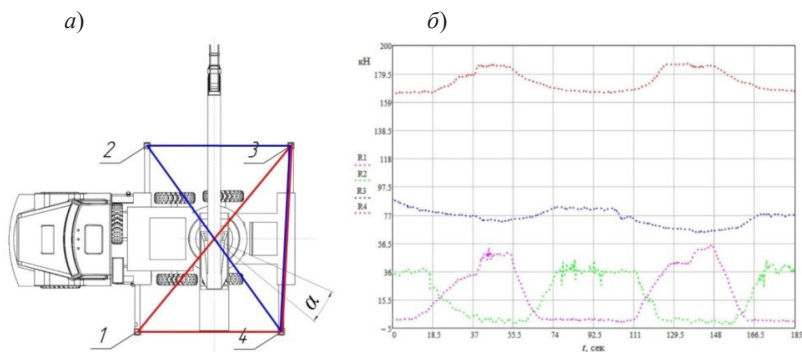


Рисунок 6 – Результаты эксперимента: а – Расчетная схема; б – Временные зависимости экспериментальных значений реакций опор 1, 2, 3, 4 – номера опор (гидроцилиндров вывешивания)

Сравнительный анализ полученных результатов (реакций опор, полученных экспериментальным и численным методом) показал, что полученная погрешность вычислений доказывает адекватность разработанной математической модели.

3. Расчетные схемы и зависимости нагружения элементов ж.-д. крана при работе в кривых участках пути.

Основной особенностью кривых участков ж.-д. пути является возвышение наружной рельсовой нити над внутренней, что накладывает некоторые ограничения на эксплуатацию ж.-д. крана в кривых участках пути. Так согласно данным ОАО «РЖД» при выполнении работ ж.-д. грузоподъемными кранами в кривых участках пути существует опасность не попадания колесной пары ходовой тележки на рельсовую колею после выполнения работ и снятия крана с выносных опор

В работе теоретически выделено четыре варианта установки грузоподъемного крана в кривых участках ж.-д. пути; для них составлены расчетные схемы, решены уравнения и определены зависимости смещения колес ходовой тележки относительно головки рельса.

4. Закономерности формирования и влияния нагрузок на гидроцилиндра аутригера опорного контура грузоподъемного крана с учетом деформируемости элементов конструкции, свойств грунта, шпальной выкладки и инерционных нагрузок в трехмерной постановке задачи.

Анализ НДС реальных конструкций со сложной геометрической формой, механической разнородностью, нагружаемых по сложному термосиловому

закону, возможен только при использовании численных методов, ориентированных на ЭВМ. Поэтому анализ НДС элементов опорного контура грузоподъемного крана выполняется в модуле Simulation (МКЭ) SolidWorks.

Рассматривается аутригер ж.-д. крана в трехмерной постановке. В анализе учитывается совместное деформирование компонентов гидроцилиндра вывешивания: поршень, направляющая втулка, шток, гильза, опорно-направляющие кольца (пояски) и др.

Исследуются три теоретических возможных варианта контактирования сопряженных элементов гидроцилиндра (в зависимости от величин зазоров «поршень – гильза» (Z_1), «направляющая втулка – шток» (Z_2)), находящихся в штатном и нештатном режиме нагружения. Первый вариант контактирования – контакт «поршень – гильза» ($Z_1 \ll Z_2$); второй – контакт «направляющая втулка – шток» ($Z_2 \ll Z_1$); третий – одновременный контакт «поршень – гильза» и «направляющая втулка – шток» ($Z_1 = Z_2$ или $Z_1 \approx Z_2$). Штатному режиму нагружения соответствует действие продольной осевой нагрузки (F_B). В нештатном режиме нагружения к действию продольной силы добавляются силовые факторы, образующиеся при вращении платформы и неравномерном внедрении шпальной выкладки в грунт (горизонтальные составляющие реакции между выносной опорой и шпальной выкладкой $F_{Г1}$, $F_{Г2}$ и др.).

Исследование гидроцилиндра, находящегося в статическом режиме нагружения

Результаты представлены эпюрами НДС поршня, направляющей втулки, гильзы гидроцилиндра для всех вариантов контактирования штатного и нештатного режима нагружения (рисунок 7). При этом на эпюрах приводятся отдельные элементы со скрытием других для более наглядного представления нагружения рассматриваемых объектов.

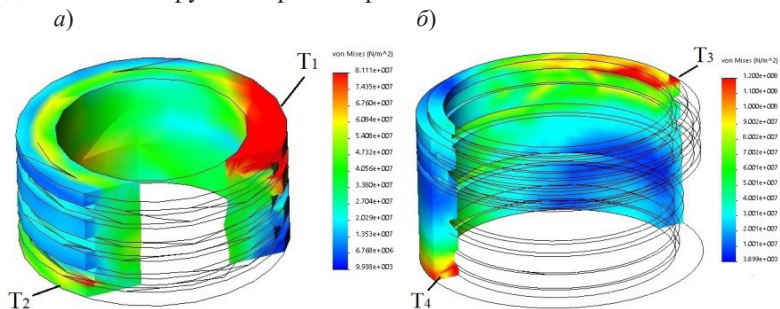


Рисунок 7 – Эпюры напряжений (σ) поршня ($Z_1 \ll Z_2$) (а) и направляющей втулки ($Z_2 \ll Z_1$) (б); нештатный режим нагружения; $Z_1 \neq 0$, $Z_2 \neq 0$

* в областях, отмеченных красным цветом, $\sigma \geq 81,11$ (а) и $\geq 120,0$ (б) МПа

Изгибающие моменты, возникающие на оголовке штока гидроцилиндра, вызывают сосредоточенные воздействия высокой интенсивности в зоне контакта сопряжений. Сопряженные элементы имеют явно выраженный неравномерный характер взаимодействия – контакт осуществляется не по всей поверхности трения (точки T_1, T_2, T_3, T_4 (рис. 7)).

Таким образом, в результате неравномерного внедрения опорной площадки в грунт и действия инерционных нагрузок под опорой образуется значительный изгибающий момент, приложенный к оголовку штока гидроцилиндра, при котором наблюдается рост амплитуд напряжений в сопрягаемых элементах гидроцилиндра, что приводит к появлению деформаций данных элементов, что в свою очередь влечет за собой потерю герметизирующей способности гидроцилиндра.

Исследование гидроцилиндра, находящегося в динамическом режиме нагружения

Влияние неоднородности полей напряжений и деформаций элементов конструкции целесообразно учитывать, рассматривая достаточно большое число наиболее напряженных точек и узлов, т.е. увеличивая размерность задачи. Поэтому исследуется деформирование элементов силового гидроцилиндра, находящегося в динамическом режиме нагружения, во времени. С этой целью проводится нелинейное динамическое исследование аутригера, в котором к выносным опорам прикладываются нагрузки, представляющие собой временные зависимости проекции реакций выносных опор по осям X, Y, Z .

В результате исследований получена временная зависимость НДС аутригера ж.-д. крана в процессе динамического нагружения с учетом инерции и податливости грунта под выносными опорами (рис. 8).

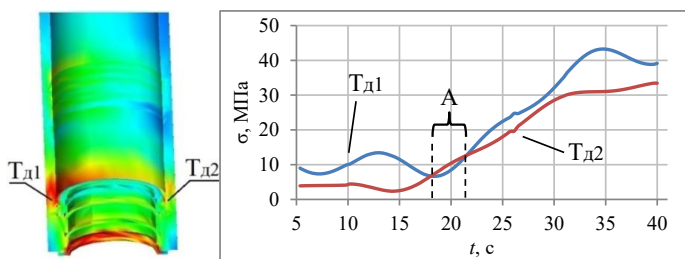


Рисунок 8 – Сравнение временных зависимостей НДС противоположных точек T_{d1} и T_{d2} гильзы гидроцилиндра

Анализ изменения напряженного состояния конструкции (рисунок 8) показывает, что максимальное нагружение гильзы гидроцилиндра

для произвольного момента времени происходит в разных точках сопряжения «втулка – гильза» в процессе динамического нагружения. Интервал времени А (рис. 8) в текущем анализе соответствует смене опорного контура при вращении поворотной платформы, что характеризуется изменением интенсивности контакта сопряженных элементов. По результатам проведенных исследований получены зависимости напряжений и перемещений штока гидроцилиндра вывешивания во времени (рисунок 9).

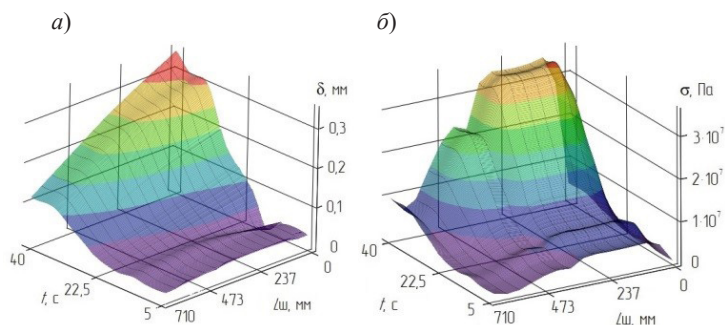


Рисунок 9 – Зависимости (по продольной оси)

$$\delta = f(t, L_{ш}) \text{ (а)}, \sigma = f(t, L_{ш}) \text{ (б)}$$

* 0 мм $L_{ш}$ (длина штока) соответствует оголовку штока

В результате анализа так же определена пространственная траектория точки контакта с наибольшими контактными напряжениями сопряжения «втулка – гильза». Аналогичные результаты исследования контактного взаимодействия сопряженных элементов получены для гидроцилиндров всех вариантов контактирования.

По аналогии с представленными результатами (рис. 8; 9) можно отобразить (в сечении и в пространстве) временные зависимости НДС любой произвольно выбранной точки конструкции опорного контура грузоподъемного крана в динамическом режиме нагружения.

Определение влияния зазоров сопряженных элементов на НДС гидроцилиндра

Зазоры сочлененных элементов гидроцилиндра в узлах «поршень – гильза» и «шток – направляющая втулка» являются одной из причин несоосности продольных осей гильзы и штока гидроцилиндра. Несосоосность сопряженных элементов приводит к уменьшению площади контактирующих тел; в связи с этим возникает значительная радиальная нагрузка. Это ведет к перераспределению действующих полей напряжений в элементах гидроцилиндра; появляются концентраторы напряжений, обусловленные

как контактными напряжениями, так и геометрической формой взаимодействующих тел. В связи с этим возрастают местные пластические деформации контактирующих поверхностей втулки и гильзы гидроцилиндра, происходит смятие направляющих поверхностей, возникает односторонний усталостный износ уплотнительных элементов и изгиб штока. Что приводит к снижению надежности работы гидроцилиндра как по несущей, так и по герметизирующей способности.

По результатам численных экспериментов получены графические зависимости максимальных напряжений поршня и направляющей втулки гидроцилиндра в точке контакта с гильзой (T_1, T_3) в зависимости от сочетаний продольной силы (F_B) и величины зазоров Z_1 и Z_2 с учетом действия поперечной нагрузки ($F_{Г1} = \text{const} \neq 0, F_{Г2} = \text{const} \neq 0, F_{Г1} \perp F_{Г2}$) (рисунки 7; 10). Для обработки полученных численных данных применяется полный факторный эксперимент типа 2^k с целью получения функций $\sigma_{\Pi} = f(Z_1, F_B), \sigma_B = f(Z_2, F_B)$:

$$\sigma_{\Pi} = 38,3 - 11,8Z_1 + 0,237R_B + 0,237Z_1R_B, \quad (2)$$

$$\sigma_B = 20,7 + 39,2Z_2 + 0,256R_B + 0,247Z_2R_B.$$

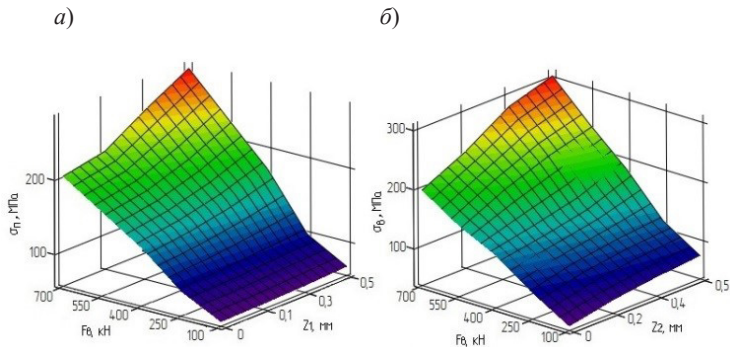


Рисунок 10 – Зависимости максимальных напряжений:

- a* – поршня гидроцилиндра вывешивания в месте контакта с гильзой в точке T_1 ($Z_1 \ll Z_2$);
- б* – втулки гидроцилиндра вывешивания в месте контакта с гильзой в точке T_3 ($Z_2 \ll Z_1$)

В результате исследований также получены: эпюры вектора контактных напряжений и результирующие горизонтальные силы контакта контактирующих поверхностей поршня и втулки гидроцилиндров всех вариантов контактирования.

Таким образом, увеличение зазоров в сочленениях силового гидроцилиндра приводит к преобразованию характера и условий взаимодействия

между элементами, что способствует снижению надежности функционирования силовых гидроцилиндров.

5. Трехмерная, неравномерная по сечению сопряжения модель износа (радиального зазора) сопряженных элементов уплотнительного узла гидроцилиндра.

Трехмерная, неравномерная по сечению сопряжения модель износа (радиального зазора) сопряженных элементов уплотнительного узла гидроцилиндра представлена на рисунке 11. Радиальный зазор сопряжения «поршень – гильза» и «направляющая втулка – гильза» моделируется совокупностью последовательно соединенных кольцевых дросселей, образованный круглыми трубкой и вставкой, которая может быть размещена с эксцентриситетом.

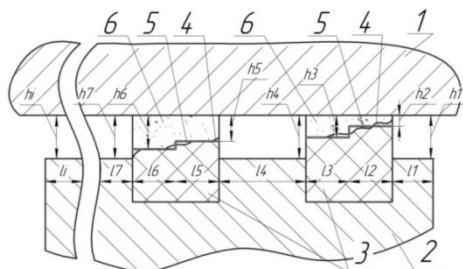


Рисунок 11 – Схема моделирования износа (радиального зазора) сопряженных элементов уплотнительного узла гидроцилиндра:
 1 – гильза гидроцилиндра (направляющая втулка); 2 – поршень (шток);
 3 – уплотнение; 4 – кривая износа уплотнения; 5 – упрощенное представление кривой износа уплотнения; 6 – разрушение уплотнений;
 h_1, \dots, h_i – радиальный зазор; l_1, \dots, l_i – длина зазора

Параметры модели радиального зазора настроены по результатам усталостного анализа уплотнений гидроцилиндра. Расход через кольцевой дроссель определяется согласно уравнению Хагена-Пуазейля:

$$q = \frac{\pi R(R-r)^3}{6\nu\rho L} \cdot \left(1 + \frac{3}{2}\varepsilon^2\right) \cdot p, \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \frac{e}{R-r}, \quad (3)$$

где q – расход потока; p – перепад давления; R – радиус отверстия; r – радиус вставки; L – длина перекрытия; ε – коэффициент эксцентриситета; e – эксцентриситет; ρ – плотность жидкости; ν – кинематическая вязкость жидкости.

6. Методика оценки герметичности гидроцилиндра, учитывающая взаимосвязь: «нагрузка на гидроцилиндр – число циклов работы уплотнений – неравномерный радиальный зазор сопряжений

«поршень – гильза» и «направляющая втулка – шток» – величина перетечек рабочей жидкости – усадка штока»; «усадка штока – удельная утечка рабочей жидкости – класс негерметичности уплотнений».

Исследование уплотнительного узла опорного гидроцилиндра грузоподъемного ж.-д. крана состоит из следующих этапов:

1. Анализ усталостной долговечности уплотнений гидроцилиндра в Simulation SolidWorks.

2. Анализ влияния утечек рабочей жидкости между полостями гидроцилиндра в: пакете Flow Simulation (метод конечных объемов (МКО)) SolidWorks, с целью исследования гидродинамики и теплообмена процесса утечки; подсистеме Simulink программы Matlab с целью исследования гидродинамических процессов.

Численный анализ проводится согласно следующей гипотезе: циклическая нагрузка, которой подвержен гидроцилиндр в процессе работы, приводит к постепенному усталостному разрушению уплотнительного узла гидроцилиндра, что является причиной появления неравномерного радиального зазора в сопряжениях «поршень – гильза цилиндра» и «направляющая втулка – шток», через который происходят перетечки рабочей жидкости, что в свою очередь вызывают усадку штока гидроцилиндра.

В исследовании радиальный зазор между гильзой и поршнем моделируется трехмерным, неравномерным по сечению согласно результатам анализа усталостной долговечности уплотнений гидроцилиндра. При этом одновременно моделируется неравномерный износ всех уплотнений. Вследствие этого данный анализ принципиально отличается от ряда других исследований, рассматривающих зазор как постоянную величину по сечению сопряжения.

Результаты исследований гидроцилиндра в случае радиального зазора в Flow Simulation представлены эпюрами гидродинамических и тепловых процессов: распределение температуры твердых тел, текучей среды; распределение линий тока и скорости движения рабочей жидкости в зазоре; траектории потока текучей среды.

Численный анализ утечек рабочей жидкости гидроцилиндра в Matlab проводится на разработанной Simulink – модели гидропривода выносных опор грузоподъемного крана, которая учитывает: трение между подвижными частями в гидроцилиндре, потери в трубопроводе, сжимаемость и инерцию жидкости, внутренние перетечки жидкости. Simulink – модель включает в себя разработанную модель износа сопряженных элементов уплотнительного узла гидроцилиндра (рисунок 11). Параметры модели радиального зазора настроены по результатам усталостного анализа уплотнений гидроцилиндра. Результаты анализа утечек рабочей жидкости в Simulink представлены временными зависимостями: давления, расхода жидкости через радиальный зазор, усадки штока гидроцилиндра, скорости движения жидкости в зазоре.

Приведенный анализ позволяет исследовать работу уплотнений любых форм и сечений; а блочная модель-структура нагружения гидроцилиндра вывешивание применим и к анализу возвратно-поступательного движения.

7. Система управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (ANFIS).

Система управления и анализа текущего состояния грузоподъемным краном основана на адаптивной системе нейро-нечеткого вывода (ANFIS, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), реализованной в пакете Fuzzy Logic Toolbox программы Matlab. Перед разработкой нейро-нечеткой сети выполнена серия исследований на разработанной ранее динамической модели (рисунок 1) при различных сочетаниях действующих нагрузок, в том числе предельных (таблица 1).

Таблица 1. Фактор – реакция – анализ системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт»

1	Факторы, влияющие на систему	Не изменяемые факторы (F_{const})	Свойства, исполнение узлов и элементов грузоподъемного крана.
		Изменяемые (варьируемые) факторы (F_{var})	Скорость вращения поворотной платформы, вылет, масса груза, высота подвеса груза, угол наклона стрелы, угол поворота поворотной платформы, свойства грунта опорного основания.
2	Реакция (отклик) системы R_i	Угол наклона платформы, составляющие реакции выносных опор, просадка опор, перемещение оголовка телескопической стрелы, усадка штока гидроцилиндра, отклонение от прямолинейности оси стрелы (в / из плоскости стрелы), изменение положения груза, НДС узлов и элементов и др.	
3	Анализ текущего состояния системы	Оценка устойчивости грузоподъемного крана в целом; прочности и устойчивости отдельных узлов и элементов конструкции в частности. Прогнозирование параметров рассматриваемой системы.	

Анализ текущего состояния грузоподъемной машиной включает в себя: оценку устойчивости грузоподъемного крана в целом; оценку прочности и устойчивости отдельных узлов и элементов конструкции в частности; прогнозирование наиболее полной качественной динамики системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт».

Оценка устойчивости грузоподъемного крана осуществляется на основе определения текущего положения центра тяжести грузоподъемного средства, реализованная при помощи «Программы контроля и управления грузовой и собственной устойчивостью транспортного средства».

Совокупность соответствий «1 – 2 – 3» таблицы 1 представляет собой базу данных обучения системы программного управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины, включающую штатный и внештатный режим нагружения. При этом система программного управления краном основывается на экспериментальной информации и результатах численных экспериментов.

При описанном подходе возможно: определение оптимальных режимов работы объекта, предельных значений параметров системы, прогнозирование внештатных ситуаций, разработка сценариев принятия оптимальных решений в сложных производственных условиях в текущий момент времени.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по решению научной задачи анализа взаимодействия опор грузоподъемного крана с грунтом опорного основания и обеспечения работоспособности конструктивных элементов крана, находящегося в динамическом режиме нагружения. При этом полученные результаты и разработанные математические модели могут распространяться ко всем типам свободно стоящим грузоподъемным машинам, расположенным на податливом основании.

Тем не менее, значительное многообразие факторов динамического нагружения рабочих органов дорожных, колесных, строительных, гусеничных, подъемно-транспортных и горных машин и взаимодействия их конструктивных элементов между собой и с контактной средой в трехмерной постановке задачи требует проведения отдельных дополнительных комплексных исследований, что в совокупности позволит расширить и повысить степень достоверности результатов исследований.

Основными результатами исследований, выполненных в диссертационной работе, являются:

1. Разработана пространственная динамическая модель, включающую численную модель грузоподъемного крана, реологическую модель грунта и модель шпальной выкладки, отражающая физическую картину деформирования системы «грузоподъемный кран – шпальная выкладка – грунт», учитывающая влияние шпальной выкладки, структуры грунта (пластических и упругих свойств) и действие инерционных нагрузок на элементы опорного контура грузоподъемной машины. По результатам

исследований разработанной динамической модели получены графические и аналитические зависимости взаимодействия элементов данной системы между собой. Разработанная реологическая модель грунта применима ко всем типам свободно стоящим грузоподъемным машинам, расположенным на грунтовом основании.

2. Предложена математическая модель балансирования грузоподъемной машины на диагонально расположенных выносных опорах в процессе вращения поворотной части крана с грузом и неравномерном внедрении опорных элементов в грунт.

3. Исследована работа ж.-д. грузоподъемных кранов в кривых участках пути. Выделены четыре варианта установки грузоподъемного крана в кривых участках ж.-д. пути; составлены расчетные схемы, решены уравнения и определены зависимости смещения колес ходовой тележки платформы относительно головки рельса.

4. Установлены закономерности комплексного формирования нагрузок и влияния силовых и геометрических параметров элементов гидроцилиндра вывешивания аутригеров в опорном контуре грузоподъемного крана на несущую способность и герметичность гидроцилиндра с учетом деформируемости элементов конструкции, свойств грунта, шпальной выкладки и инерционных нагрузок в трехмерной постановке задачи.

5. Предложена трехмерная, неравномерная по сечению сопряжения модель износа (радиального зазора) сопряженных элементов уплотнительного узла гидроцилиндра, позволяющая исследовать процесс утечки рабочей жидкости.

6. Предложена методика оценки герметичности гидроцилиндра, учитывающая взаимосвязь: «нагрузка на гидроцилиндр – число циклов работы уплотнений – неравномерный радиальный зазор сопряжений «поршень – гильза» и «направляющая втулка – шток» – величина перетечек рабочей жидкости – усадка штока»; «усадка штока – удельная утечка рабочей жидкости – класс негерметичности уплотнений».

7. Выполнена валидация виртуального прототипа ССК на основе проведения натурального эксперимента по исследованию процесса трансформации ядра опирания.

8. Разработана система управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода (ANFIS).

9. Рассмотрены вопросы управления и анализа текущего состояния грузоподъемной машины; даны рекомендации по анализу устойчивости, прочности и работоспособности конструктивных элементов грузоподъемных машин.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Ватулин, Я. С. Безопасное применение мобильных подъёмников с рабочими платформами на основе результатов натуральных и виртуальных экспериментов / Я. С. Ватулин, С. К. Коровин, М. С. Коровина, С. В. Орлов, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – Т. 13. № 2 (47). – С. 255–268.

2. Ватулин, Я. С. Моделирование потери устойчивости свободно стоящих стреловых самоходных кранов / Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – №4 (36). – С. 60–66.

3. Ватулин, Я. С. Численное моделирование предельных состояний стреловых самоходных кранов / Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 4 (697). – С. 19–27.

4. Потахов, Д. А. Численный расчет утечек рабочей жидкости через радиальный зазор сопряженных элементов гидроцилиндра вывешивания грузоподъемного крана / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16. № 1 (65). – С. 18–30.

5. Ватулин, Я. С. Моделирование взаимодействия элементов опорного контура железнодорожного грузоподъемного крана с грунтовой опорной поверхностью / Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16. № 1 (58). – С. 59–67.

6. Потахов, Д. А. Взаимодействие железнодорожного крана с опорной поверхностью участка железнодорожного пути / Д. А. Потахов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – № 2 (57). – С. 43–50.

7. Потахов, Д. А. Определение напряженно-деформированного состояния силового гидроцилиндра в режиме динамического нагружения / Д. А. Потахов // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – №3 (55). – С. 104–110.

8. Потахов, Д. А. Влияние зазоров сопряженных элементов на напряженно-деформированное состояние гидроцилиндра вывешивания / Д. А. Потахов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2020. – Т. 17. № 1 (71). – С. 44–56.

9. Ватулин, Я. С. Контроль и управление устойчивостью стрелового самоходного крана в режиме динамического нагружения / Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов // Вестник машиностроения. – 2020. № 4. – С. 31–36.

10. Потахов, Д. А. Динамика работы грузоподъемного железнодорожного крана в условиях нарушения опорного контура / Д. А. Потахов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2020. – №3. – С. 426–433.

11. Потахов, Д. А. Численный анализ нестационарного сопряженного теплообмена силового гидроцилиндра при возвратно-поступательном движении / Д. А. Потахов // Строительные и дорожные машины. – 2021. – №4. – С. 21–32.

12. Потахов, Д. А. Система стабилизации платформы железнодорожного грузоподъемного крана / Д. А. Потахов // Вестник ВНИИЖТ. – 2021. – Т. 80. №3. – С. 160–167.

Публикации в периодических научных изданиях, входящих в Scopus

13. Vatulin, Y. S. Stability Control of a Self-Propelled Crane in Dynamic Loading / Y. S. Vatulin, D. A. Potakhov // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40, No. 7. – P. 545–550.

Патенты

14. Пат. №2700312 Российская Федерация, МПК В66С 23/88. Способ повышения безопасности и система безопасности стрелового грузоподъемного крана / Ватулин Я. С., Потахов Е. А., Потахов Д. А.; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения Императора Александра I. – №2018129511; заявл. 13.08.2018; опубл. 16.09.2019.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018616841. Программа контроля и управления грузовой и собственной устойчивостью транспортного средства / Ватулин Я. С., Ватулина Е. Я., Поляков Б. О., Потахов Д. А., Потахов Е. А. – Заявка №2018614084 от 25.04.2018; дата государственной регистрации 07.06.2018.

Публикации в прочих изданиях, индексируемых в РИНЦ

16. Шкроба, С. П. Новый взгляд на метод наименьших квадратов / С. П. Шкроба, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2014. С.346–352.

17. Мигров, А. А. Исследование надежности поршневого дизель-молота в системе Matlab/Simulink / А. А. Мигров, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: сборник материалов VI Междунар. науч. – практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ФГБОУ ВПО ПГУПС, 2015. – С.91–96.

18. Ватулин, Я. С. Моделирование динамики грузоподъемных машин / Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сборник трудов LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. С. 273–277.

19. Ватулин, Я. С. Обеспечение безопасного выполнения путевых работ с использованием железнодорожного крана ЕДК 500/1 / Я. С. Ватулин, С. Н. Чуян, Д. А. Потахов, Е. А. Потахов // Инновационный транспорт. – 2017. – №1 (23). – С. 48–54.

20. Потахов, Д. А. Влияние просадок на режим нагружения железнодорожного крана / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: материалы VII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. С. 171–174.

21. Ватулин, Я. С. Моделирование предельного состояния железнодорожного крана при потере грузовой устойчивости / Я. С. Ватулин, Д. А. Потахов // Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век: материалы V Международной научно-технической конференции, посвященной 180-летию железных дорог России. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. С. 413–416.

22. Потахов, Д. А. Моделирование потери устойчивости железнодорожного крана / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин // Тезисы. IX Международный симпозиум «Прорывные технологии электрического транспорта Eltrans'2017». – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. С. 64–65.

23. Потахов, Д. А. Нагружение опорного контура стреловых самоходных кранов в процессе вращения стрелового оборудования / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы Сборник трудов LXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. С. 81–84.

24. Потахов, Д. А. Особенности режима нагружения опорного контура грузоподъемных кранов в условиях опирания на бровку железнодорожного пути / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин // Тезисы. Национальная конференция «Перспективы будущего в образовательном процессе». – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. С. 163–165.

25. Потахов, Д. А. Повышение безопасности опорных контуров стреловых самоходных кранов / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин // Е. Я. Красковский: организатор, учитель, ректор: сб. трудов международной научно-практической конференции / под общей ред. А. Ю. Паньчева, П. К. Рыбина – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. С. 52–56.

26. Потахов, Д. А. Влияние герметичности узлов уплотнения на продольную жесткость силового гидроцилиндра / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин // Тезисы. Национальная конференция «Перспективы будущего в образовательном процессе». – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. С.139–142.

27. Потахов, Д. А. Фазовый портрет реакций выносных опор железнодорожного крана / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин, М. Н. Козлов // Системы автоматизированного проектирования на транспорте: тезисы докладов VIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под ред. Я. С. Ватулина. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. С.120–123.

28. Потахов, Д. А. Анализ динамического нагружения силового гидроцилиндра / Д. А. Потахов, Я. С. Ватулин // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы Сборник трудов LXXX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. С.50–54.

29. Потахов, Д. А. Формирование карты распределения напряжений металлоконструкции грузоподъемного крана / Д. А. Потахов // Локомотивы. Электрический транспорт – XXI век: материалы VII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 10–12 ноября 2020 г. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. С. 22–26.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 14.10.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 102.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.