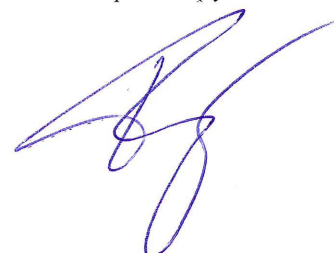


Министерство образования и науки РФ

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

На правах рукописи

Танский Вячеслав Владимирович



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ КРАНА-
ТРУБОУКЛАДЧИКА С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ
КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕМЕЩАЕМОГО ГРУЗА

Специальность 05.05.04 – «Дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

кандидат технических наук,
доцент Р. Ю. Сухарев

Омск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	11
1.1 Анализ тенденций развития кранов-трубоукладчиков	11
1.2 Анализ математических моделей кранов-трубоукладчиков	15
1.3 Оценка влияния тангажа и крена крана-трубоукладчика на изменение высотного положения груза	22
1.4 Анализ инженерных решений, направленных на снижение колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика	31
1.5 Анализ систем автоматического управления грузоподъемным оборудованием крана-трубоукладчика	35
1.6 Цели и задачи исследования	42
Выводы по главе	43
2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА КРАНОМ-ТРУБОУКЛАДЧИКОМ	45
2.1. Общая методика исследования	45
2.2. Методика математического моделирования	46
2.3. Методика экспериментальных исследований	54
Выводы по главе	57
3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА КРАНОМ-ТРУБОУКЛАДЧИКОМ, ОСНАЩЕННЫМ МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ	58
3.1 Модель объекта исследования	58
3.2 Обоснование расчетной схемы крана-трубоукладчика	59
3.3 Выбор и обоснование системы отсчета и обобщенных координат для математического описания крана-трубоукладчика	62
3.4. Уравнения кинематики звеньев динамической системы крана- трубоукладчика	65
3.5 Уравнение кинематики упруго-вязких элементов	77
3.6. Уравнения динамики системы крана-трубоукладчика	82
3.7. Математическое описание микрорельефа	92
Выводы по главе	96
4 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА КРАНОМ-ТРУБОУКЛАДЧИКОМ	97
4.1 Анализ и обоснование критерия эффективности	97

4.2 Влияние горизонтальных колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика на изменение грузового момента	100
4.3 Анализ влияния координат точек крепления уравнивающего каната на колебательность груза	103
4.4 Анализ зависимости координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната на колебательность груза	110
4.5 Аппроксимация зависимостей колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната	117
4.6 Оптимизационный синтез параметров уравнивающего каната	123
Выводы по главе	129
5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНЖЕНЕРНЫЕ РАЗРАБОТКИ	130
5.1 Уравнивающий канат	130
5.2 Демпфирующая рама	132
5.3 Экспериментальные исследования переходной характеристики груза	135
5.4 Инженерная методика оптимизации параметров модернизированного рабочего оборудования крана–трубоукладчика	140
Выводы по главе	143
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	144
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	146
ПРИЛОЖЕНИЯ	157

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Наша страна обладает огромными запасами полезных ископаемых, но практически все они находятся на достаточно большом удалении от промышленных центров, либо заказчиков данного сырья. Грамотным решением данной проблемы является трубопроводный транспорт. Он наиболее экономичен, влияние на него климатических и природных условий незначительно [86].

Развитие трубопроводного транспорта имеет большое влияние на экономику страны. После весьма значительного снижения объемов строительства магистральных трубопроводов в 90х годах, до тысячи километров в год. В настоящее время идет реализация масштабных объектов, таких как «Сила Сибири». Данный объект на первом этапе соединит Якутию Хабаровск и Владивосток, а на втором этапе будет проложен трубопровод от Якутского центра газодобычи до Иркутского центра. Что в сумме составляет 4000 километра магистрального трубопровода. А также: Система транспорта газа с месторождений Северного Каспия, Магистральный газопровод «Южно-Европейский газопровод. Участок «Починки-Анапа», Система транспортировки углеводородов с Ярудейского месторождения, Газопровод Бованенково – Ухта (2-я очередь) и прочие объекты [86].

Для успешного выполнения ныне реализуемых и последующих объектов требуется увеличение темпов строительства при сохранении и возможном повышении качества выполняемых работ. Два этих фактора напрямую зависят, в том числе и от технического парка подрядчика и его слаженной работы на участке.

Основной машиной при строительстве магистральных трубопроводов является кран-трубоукладчик (КТ). Проблема колебаний трубопровода при преодолении краном неровностей микрорельефа, ведет к снижению точности выполняемых работ и как следствие повышение времени на их выполнение, вероятности удара трубы о стрелу или кромку траншеи. Колебания трубопровода,

в ходе изоляционно-укладочных работ приводит к колебанию грузового момента в широком диапазоне, что влечет за собой повышение динамических воздействий на рабочие органы крана и может привести к опрокидыванию колонны. Если проблема сохранения устойчивости КТ в той или иной степени решается за счет соблюдения технологии работ, оснащения машин приборами безопасности, повышением устойчивости машины, то вопрос снижения неуправляемых колебаний перемещаемого груза до настоящего раскрыт не полностью. В связи с этим совершенствование рабочего оборудования КТ с целью снижения неуправляемых колебаний перемещаемого груза является актуальной темой для научных исследования и работ.

Целью диссертационной работы является снижение неуправляемых колебаний груза перемещаемого краном-трубоукладчиком.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать математическую модель процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием.

2. Обосновать критерий эффективности процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком.

3. Выявить функциональные зависимости, устанавливающие связь между критерием эффективности и конструктивными параметрами модернизированного рабочего оборудования.

4. Разработать инженерные решения и методику оптимизации конструктивных параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика.

Степень разработанности темы исследования. Работы: И.П. Петрова и А.Г. Камерштейна [50, 51], А.И. Гальперина и В.А. Славова [12], В.Д. Тарана, Б.А. Аникина [71], Н.Я. Кершенбаума и Н.Е. Перова [22, 49], Р.Д. Габелая [10] и других ученых посвящены оптимизации технологических параметров подъема линейной части трубопровода.

Вопросами исследования динамики взаимодействия трубопровода с трубоукладчиками посвящены работы: А.И. Гальперина [12, 11, 14], И.В. Степанова [66], А.П. Куляшова и И.А. Тютънева [30].

Совершенствованию конструктивных схем и систем управления навесным оборудованием трубоукладчиков посвящены работы: Ю.А. Дудолодова [19, 20], А.Л. Липовича и Ц.С. Хайтовича [32, 33], Е.И. Перчиковского [48] и других ученых.

Совершенствованию систем управления изоляционно-укладочной колонны посвящены труды: Ю.Б. Тихонова [73], В.Ф. Рааца [57], Е.В. Загороднюка [21] и других ученых.

В работах И.П. Петрова и А.Г. Камерштейна впервые были выполнены исследования по определению нагрузок на КТ в изоляционно-укладочной колонне. Изменяя расстояния между опорами и определяя при этом изгибающие моменты и напряжения в опасных сечениях трубопровода, были проведены исследования по взаимному влиянию расстановки КТ в колонне, что позволило дать рекомендации по наиболее выгодным расстояниям между КТ.

В работах А.И. Гальперина и В.А. Славова теоретически и экспериментально определяются динамические нагрузки на грузовую стрелу и канаты механизмов подъема стрелы и груза при работе как со штучным грузом, так и с трубопроводной плетью.

В.Д. Тараном и Е.А. Аникиным [71] по известной грузоподъемности КТ определяются расстояния между монтажными машинами с целью минимизации напряжений изгиба трубопровода при изоляционно-укладочных работах.

В работах Н.Я. Кершенбаума и Ю.Б. Петракова [22] были проведены исследования режимов нагружения КТ в колонне и определения технологических схем изоляционно-укладочных работ, обеспечивающие минимальную суммарную загрузку трубоукладчиков в колонне.

Р.Д. Габеляя в своих работах [10] исследует способы выравнивания грузовых моментов на трубоукладчиках путем группировки КТ в звенья, обеспечивая тем самым их маневренность. Предложены схемы отдельной укладки трубопроводов способом «перехвата» и «перехода», позволяющие повысить безопасность и темпы ведения изоляционно-укладочных работ.

Работы К.В. Степанова [66] посвящены исследованиям источников и форм колебаний трубопровода. Основным источником колебаний трубопровода является микрорельеф трассы.

Вопросы интенсивности изменения грузового момента, собственная и грузовая устойчивость КТ исследуются в работах Ю.А. Дудоладова [20, 19, 18]. На основе анализа рабочего процесса делается попытка осуществить автоматический контроль момента устойчивости трубоукладчика путем автоматического перемещения контргруза под действием изменения рабочей нагрузки на крюке.

Наиболее близкими к выполняемой теме исследований являются работы В.Ф. Рааца, Ю.Б. Тихонова, А.Н. Шабалина. В своих работах они изучили автоматизированный процесс работы трубоукладочной колонны. Основная идея работ указанных исследователей заключается в стабилизации грузовых моментов путем изменения высоты подвеса крюковой обоймы и изменением расстояния между кранами в колонне.

Объектом исследования является процесс перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием.

Предметом исследования являются зависимости, устанавливающие связь между критерием эффективности и конструктивными параметрами модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика.

Научная новизна диссертационной работы.

1. Разработана математическая модель сложной динамической системы процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием.

2. Выявлены зависимости влияния координат точек крепления уравнивающего каната на колебательность груза, позволяющие определить наиболее эффективное расположение уравнивающего каната для соответствующего вылета стрелы.

3. Разработаны инженерные решения и методика оптимизации параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Применение полученных результатов при проектировании КТ позволяет сократить время на разработку машины, снизить неуправляемые колебания груза, перемещаемого КТ, за счет ограничения амплитуды колебаний груза на стреле. Инженерные решения, подтвержденные 3 патентами РФ на полезные модели, которые обеспечивают снижение амплитуды колебания груза на стреле КТ и защиту стрелы от удара об нее груза. Результаты диссертационных исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «СибАДИ». Предложенный в работе способ подвеса груза, на стреле КТ, при помощи уравнивающего каната, внедрен на ООО «Управление механизации №8» (г.Омск).

Методология и методы исследований. При выполнении диссертационной работы использовалась методология системного анализа, был принят комплексный метод исследований, который включил в себя как теоретические, так и экспериментальные исследования; математическое моделирование и регрессионный анализ. Используются следующие программные комплексы: MATLAB (приложения Smulink, SimMechanics, Curve Fitting)

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель процесса перемещения груза краном–трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием.
2. Результаты теоретических исследований математической модели процесса перемещения груза краном–трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием.
3. Инженерные решения, обеспечивающие снижение неуправляемых колебаний груза на стреле и защиту стрелы от удара об нее груза.
4. Инженерная методика оптимизации конструктивных параметров модернизированного рабочего оборудования крана–трубоукладчика.

Степень достоверности научных положений обеспечивается адекватностью математической модели, корректностью принятых допущений,

корректным использованием методов математического моделирования и достаточным объемом экспериментальных данных.

Апробация результатов работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Развитие дорожно–транспортного и строительного комплексов в освоении стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки», Омск, декабрь 2014г; XVI Международная научно-инновационная конференция аспирантов, студентов и молодых ученых с элементами научной школы «Теоретические знания в практические дела», секция «Фундаментальные проблемы современного машиностроения», ФГБОУ ВО «МГУТУ им. К.Г. Разумовского», 10.04.15г.; Международная научно-практическая конференция «АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛЬСТВО, ТРАНСПОРТ» (К 85 – летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ») декабрь 2015 г.; II Этап XIII Научно-техническая конференция молодежи ОАО «АК «Транснефть» декабрь 2015 г.; Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых» 8 февраля 2016 г.; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов «Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых» 9 февраля 2017 г.; Международная научно-практическая конференция «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации» 9 декабря 2016 г.; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов «Архитектурно – строительный и дорожно – транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации» 15-16 ноября 2017 г.

Реализация результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ», а так же на ООО «Управление механизации №8» (г.Омск).

Публикация по работе. По материалам диссертационных исследований опубликованы 16 печатных работ, из них 3 статьи в научно-рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 патента РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы (98 наименований) и приложений. Общий объем диссертации составляет 165 страницы основного текста, 59 рисунков, 18 таблиц, 6 приложений на 7 страницах.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

1.1 Анализ тенденций развития кранов-трубоукладчиков

Укладка трубопровода является достаточно сложным и трудоемким процессом. Данный процесс включает в себя: сварку трубопровода в единую нить, укладку ее на бровку траншеи путем наращивания труб и затем укладку трубы в траншею [86].

Основная машина при строительстве магистральных трубопроводов это КТ. КТ - это самоходная грузоподъемная машина, у которой стрела расположенная сбоку базового трактора и является неповоротной.

В процессе строительства магистральных трубопроводов КТ применяются в следующих видах работ [86]:

- транспортировка, погрузка и разгрузка труб и плетей;
- сварочно-монтажные работы;
- укладка трубопровода в траншею;
- другие подъемно-транспортные операции.

Специфика строительства магистральных трубопроводов предопределила конструкцию схему КТ как крана на самоходном гусеничном ходу с боковой неповоротной в плане стрелой с одной стороны и противовесом другой стороны [57, 86].

Все КТ, производимые отечественной или зарубежной промышленностью, имеют однотипные конструктивные схемы и состоят из базовой машины, навесного оборудования, системы управления (СУ) и приборов безопасности [57, 73, 86].

Работа КТ в тяжелых грунтовых и климатических условиях в совокупности с периодическими перегрузками при работе в изоляционно-укладочной колонне выдвигает более высокие требования к базовым машинам [9].

Базовой машиной для КТ может служить как специальная гусеничная база, так и модернизированные промышленные тракторы на гусеничном ходу, имеющие ряд необходимых отличий, удовлетворяющих предъявленным требованиям [57]:

- удлиненная база и расширенная колея;
- наличие в трансмиссии трактора ходозамедлителя;
- смещение, в целях повышения обзорности, кабины.

Навесное оборудование КТ: верхняя рама, грузовая стрела А-образной формы вместе со стреловой и грузовой обоями, крюковая подвеска, выдвигающийся противовес, механизм выдвижения противовеса, механизм подъема груза и изменения вылета стрелы [57].

В свою очередь к навесному оборудованию предъявляются следующие требования [57]:

- механизм изменения вылета стрелы и подъема груза должен иметь плавный ход и иметь достаточно низкую скорость;
- безынерционная работа системы управления при включении-отключении данных механизмов.

Производством гусеничных трубоукладчиков в России занимаются ОАО «Промтрактор», ООО «Челябинский тракторный завод - Уралтрак», ООО «Березовский ремонтно-механический завод», ОАО Газстроймаш, ОАО «Очерский машиностроительный завод». Основные зарубежные производители это Komatsu (Япония), Caterpillar (США), Pipeline Man (КНР), Liebherr (Германия) [86].

Трубоукладчики классифицируются по номинальной грузоподъемности, типу ходового устройства, типу привода грузоподъемного оборудования (рисунок 1.1) [86].

В ходе анализа конструктивных решений, применяемых инженерами при модернизации КТ, прослеживается тенденция их совершенствования. В конце XX века рассматривались вопросы улучшение привода (плавность хода, тяговые характеристики), параллельно с этим направлением развивались приборы безопасности КТ, затем внимание разработчиков перешло на вопрос оптимизации

управления данными приводами, что привело к их автоматизации. Затем внимание перешло на оператора, удобство управления и снижение утомляемости в ходе рабочего процесса, что в свою очередь привело к решениям вопросов эргономичности кабины (снижение усилий, затрачиваемых при управлении КТ, комфорт самого оператора). В последнее время изучается вопрос автоматизации не отдельной машины, а всей колонны, как единой сложной динамической системы. В тоже время задача снижения неуправляемых колебаний груза, перемещаемого КТ, остается актуальной и по сей день.

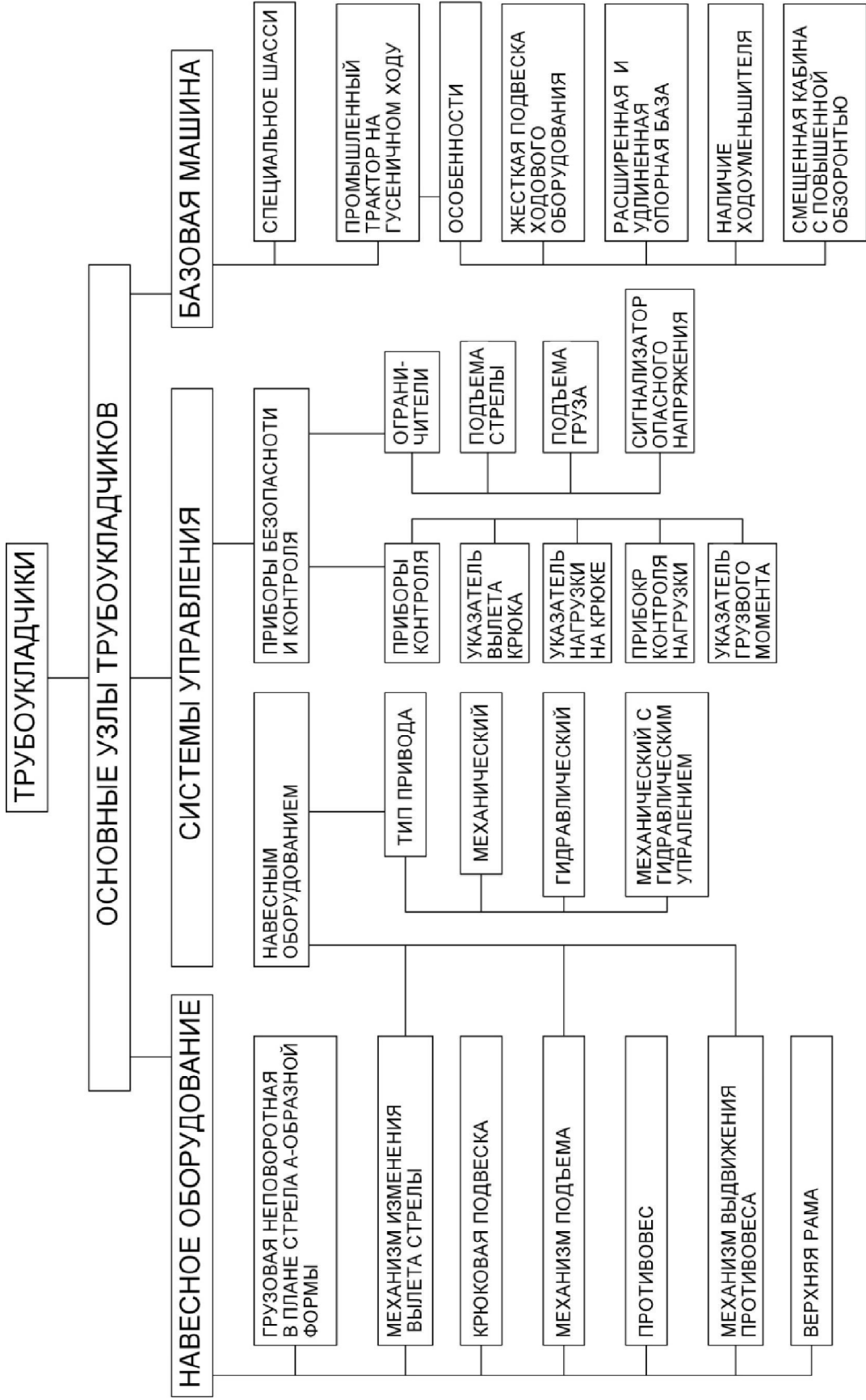


Рисунок 1.1 – Классификация трубоукладчиков по конструктивным особенностям

1.2 Анализ математических моделей кранов-трубоукладчиков

Большое влияние на процесс укладки трубы оказывают динамические свойства КТ. Исследованиями в области динамики грузоподъемных кранов занимались такие ученые как: Д.П. Волков, М.С. Комаров, Ю.А. Дудолодов, Лобов Н.А. и др. [18].

Динамическую модель КТ можно представить в виде статистически уравновешенной системы в сумме с совокупностью динамических расчетных схем, набор которых зависит от типа поставленной задачи. При построении модели статистического равновесия следует принять во внимание не только деформацию стрелового полиспаста (рисунок 1.2), но и деформацию ходовой части КТ (рисунок 1.3). [73].

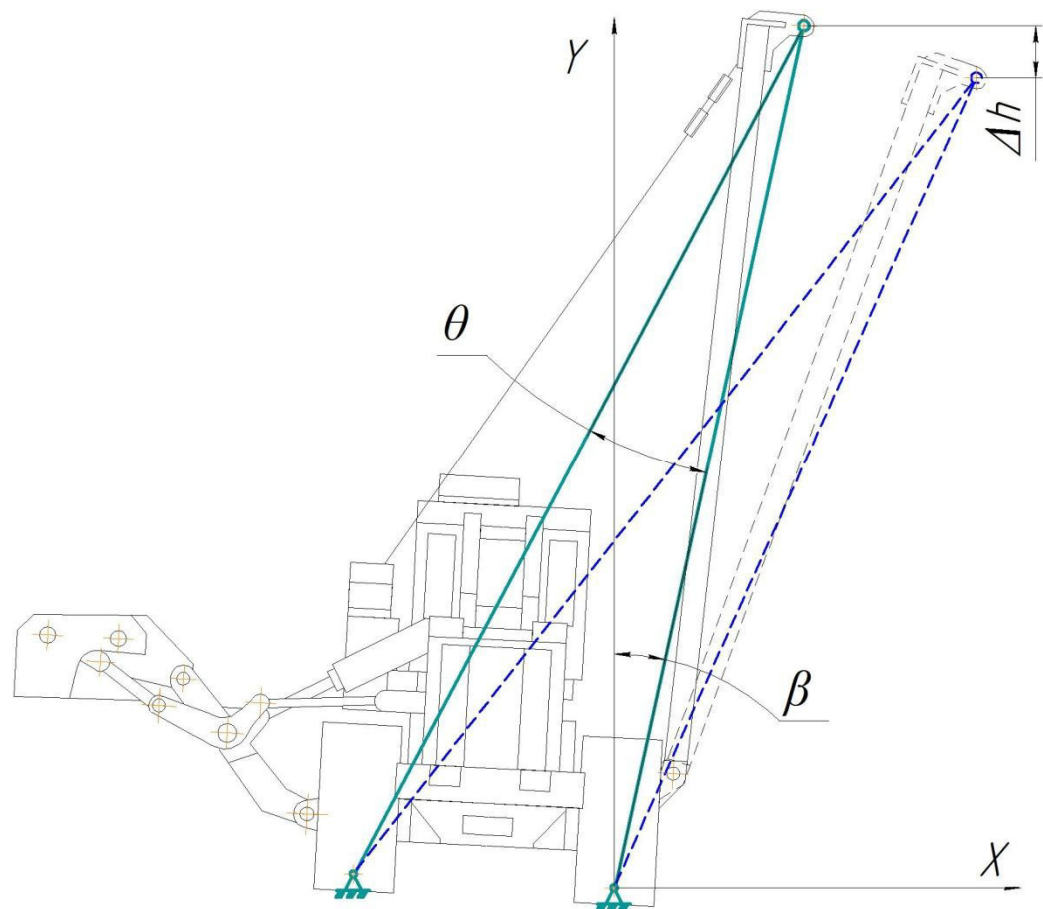


Рисунок 1.2 – Схема определения смещения точки крепления подвесной обоймы от деформации каната стрелового полиспаста

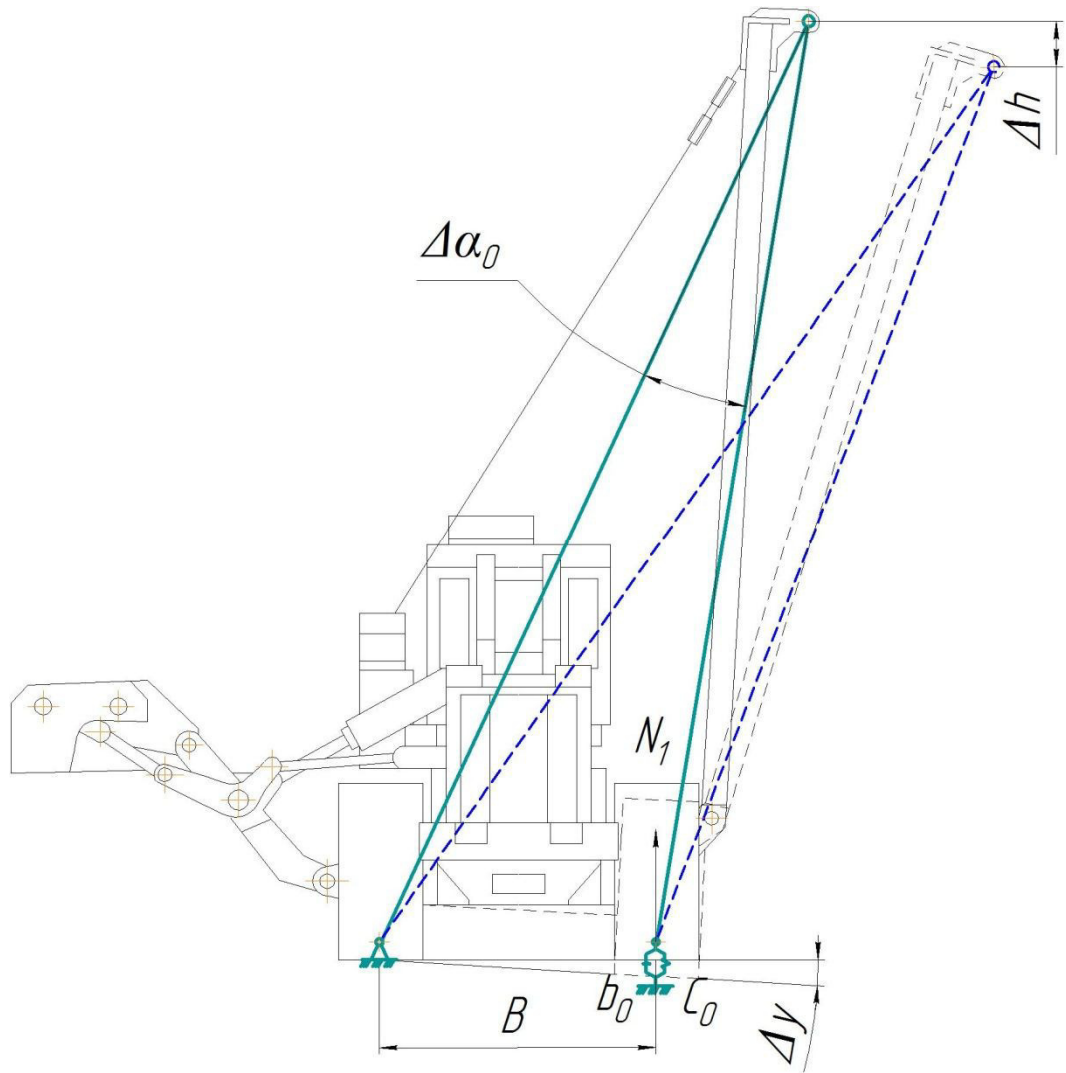


Рисунок 1.3 – Схема определения смещения точки крепления подвесной обоймы от осадки основания под элементами ходового оборудования

Вид динамической модели КТ прежде всего зависит от задачи, поставленной в данном исследовании. При решении задачи определения динамических нагрузок в элементах грузоподъемного оборудования, при условии, что кран работает с грузами, масса которых далека от предела грузоподъемности при данном вылете стрелы, расчетная схема может иметь вид двух массовой модели (рисунок 1.4) [18, 73].

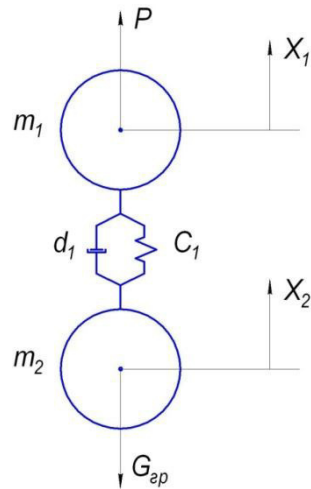


Рисунок 1.4 – Двух массовая расчетная динамическая схема для определения усилий в канатах механизма подъема груза и стрелы

В данном случае дифференциальное уравнение движения масс имеет вид.

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{X}_1 + d_1(\dot{\alpha}_1 - \dot{X}_2) + C_1(X_2 - X_1) = P; \\ m_2 \cdot \ddot{X}_2 + d_1(\dot{\alpha}_2 - \dot{X}_1) + C_1(X_2 - X_1) = -G_{гр}, \end{cases} \quad (1.1)$$

где m_1 и m_2 – приведенные массы механизма подъема и массы груза с грузозахватным органом соответственно;

X_1 и X_2 - приведенные координаты механизма и груза соответственно;

d_1 и C_1 – коэффициент вязкости и жесткости подвески груза соответственно;

P – приведенное движущие (тормозное) усилие;

$G_{гр}$ – сила тяжести груза [86].

При решении задачи определения динамических нагрузок в механизме подъема стрелы к уже имеющейся двух массовой модели добавляется масса стрелы m_0 , которая связана с основанием жесткой вязкостью, C_2 и d_2 соответственно. Данное изменение модели описывается новым уравнением в системе уравнений (1.1)., которое учитывает взаимодействие масс стрелы и груза [73].

При решении задачи динамической устойчивости крана совершающего движение с грузов применяются трех массовые модели (рисунок 1.5). Данная

модель включает в себя массу груза, стрелы и металлоконструкции крана, при этом одна из опор считается неразрывной, вторая упругая опора заменяется шарнирным соединением [73, 63, 75].

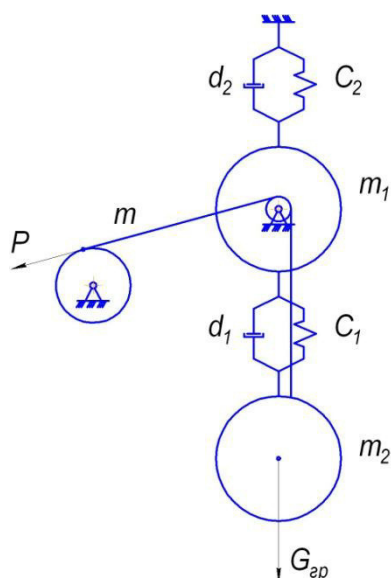


Рисунок 1.5 – Трех массовая расчетная динамическая схема для определения усилий в канатах механизма подъема груза и стрелы

При определении динамической устойчивости кранов, работающих с грузами близкими к предельной грузоподъемности при данном вылете, в динамическую расчетную схему вводится масса груза и стрелы [34, 73]. Решением систем дифференциальных уравнений, описывающих взаимоотношение соответствующих масс можно получить траектории движения этих масс при разных режимах работы крана, и с помощью полученных данных оценить устойчивость, как собственную, так и грузовую [86].

Однако постановка более сложных задач требует более детального подхода. В работе [86] автор, решая задачу повышения грузовой устойчивости трубоукладочной колонны, обосновал объемную расчетную схему КТ (рисунок 1.6).

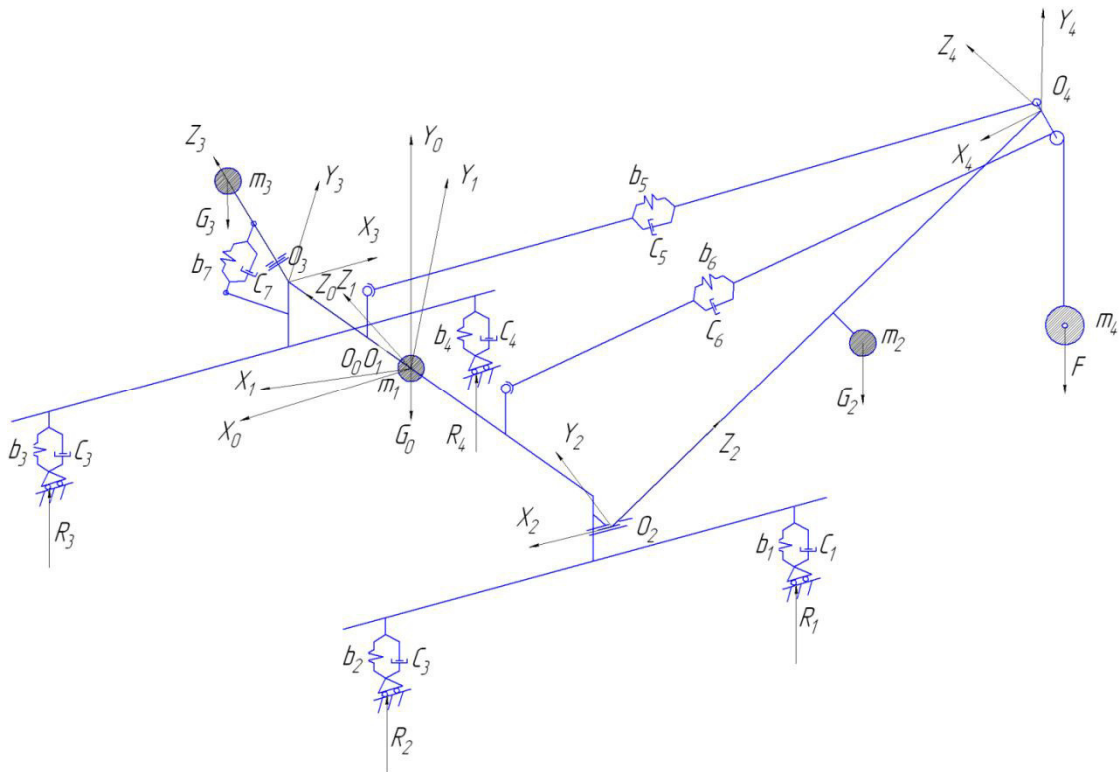


Рисунок 1.6 – Расчетная схема крана-трубоукладчика

Положение звеньев модели в пространстве описывалось по методу однородных координат. Динамика подвижных звеньев модели описывалась системой уравнений Лагранжа второго рода [28, 86, 89, 82, 65]:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l \text{tr}[U_{ij} H_i U_{iv}^T] q_j'' + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^l \text{tr}[M_{uj} B_u M_{uv}^T] q_j' + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^l \text{tr}[M_{uj} N_u M_{uv}^T] q_j + \sum_{i=1}^k m_i g G^T U_{iv} \vec{R}_i = \vec{F}_r U_{iv} \vec{R}_{ir}, \quad (1.2)$$

где k – количество звеньев, l – количество степеней свободы, n – количество упруго-вязких элементов, U_{ij} – матрица скорости центра масс i -го звена по j -ой координате, H_i – матрица инерционности i -го элемента, M_{uj} – матрица деформации u -го упруго-вязкого элемента по j -ой координате, N_u – матрица упругости, B_u – матрица вязкости u -го упруго-вязкого элемента, G^T – вектор сил тяжести звеньев системы, \vec{R}_i – радиус вектор центра масс i -го звена, m_i – масса i -го звена, M_{uv}^T – транспонированная матрица деформации u – упруго-вязкого

элемента, q_j - обобщенная координата по степени свободы j , \vec{F}_r - внешняя сила, приложенная к i -ому звену расчетной схемы, U_{iv} - матрица скорости i -го элемента, U_{iv}^T - транспонированная матрица скорости i -го элемента, \vec{R}_{ir} - вектор в локальной системе координат звена точки приложения силы.

Моделирование КТ, реализация и решение полученных уравнений, производилось при помощи программного продукта Matlab SimMechanics. Продукт Matlab SimMechanics используется для решения задач многотельного моделирования объемных систем [93, 96, 95]. Полученная модель, представлена на Рисунок 1.7.

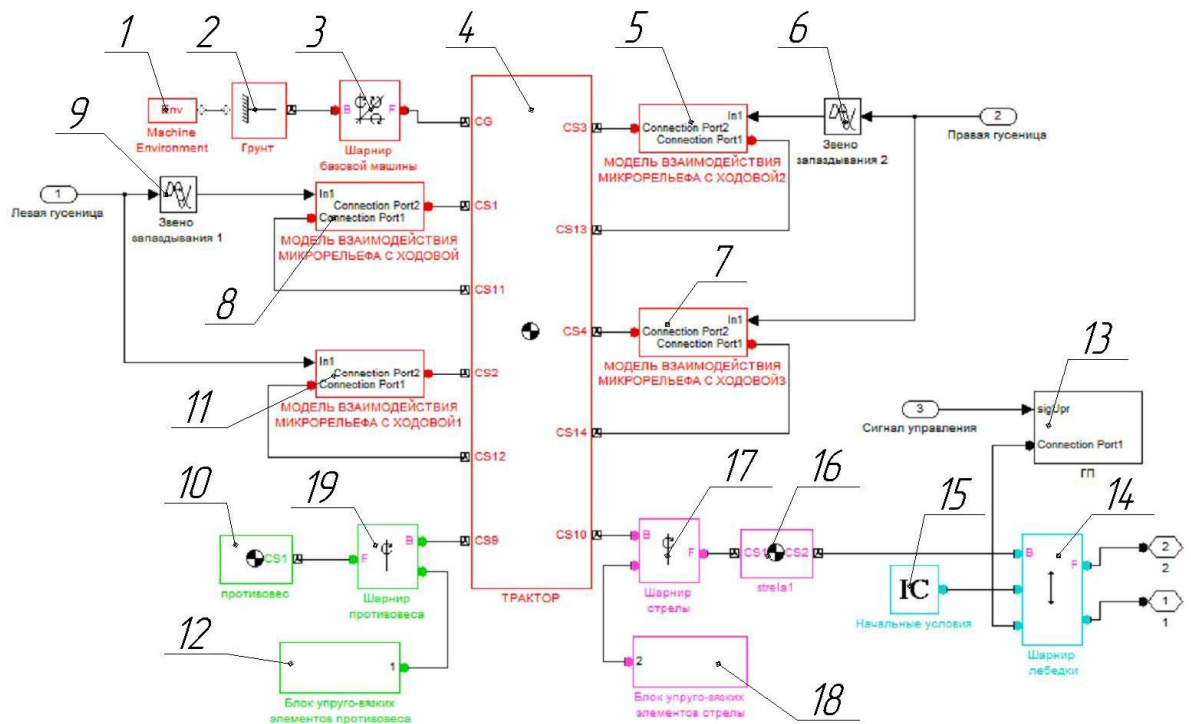


Рисунок 1.7 – Блок схема крана-трубоукладчика в программном продукте Matlab SimMechanics

Где блок 1 (Machine Environment) задает направление вектора ускорения свободного падения и его значение, вводимый параметр вектор ускорения свободного падения ($[0;-9,81;0]$);

блок 2 – (Ground) представляет собой неподвижную, инерциальную систему координат;

блок 3, 17, 19 (Bushing (3), Revolute (17, 19)) – шарниры, 3-ий соединяет КТ с блоком 1, инерциальной системой координат не накладывая каких либо ограничений, шарниры 17 и 19, оставляют лишь одну вращательную степень свободы, согласно схеме, изображенной на рисунке 1.6.;

блок 4 – (Body) трактор, базовая машина, данный блок отвечает за габариты и массово инерционные показатели тела. Вводимые параметры: масса, тензор инерции, координаты точек, описываемого тела;

блоки 5, 7, 8, 11 (Subsystem) – представляют собой совокупность блоков, отвечающих за взаимодействие микрорельефа с ходовой частью трактора, ходовая часть представлена характерными точками в блоке 4. Более подробно модель взаимодействия ходовой части и микрорельефа описана в работах [81, 77];

блоки 6, 9 (Time Delay) – звенья запаздывания, позволяющие сообщать один и тот же сигнал (изменение высоты неровности микрорельефа) сначала на передний край машины и с определенным запаздыванием на задний край;

блок 10 – (Body) противовес, отвечает за массово инерционные характеристики противовеса;

блок 12, 18 (Subsystem) – совокупность блоков отвечающих за упруго вязкие свойства шарниров 17 и 19, эмитирующих упруго вязкие свойства гидроцилиндра выдвижения противовеса (шарнир 19) и упруго вязкие свойства стрелового каната (шарнир 17), более подробно система, отражающая упруго вязкие свойства элемента или же шарнира описана в [81];

блок 13 (Subsystem) – совокупность блоков реализующих грузоподъемный механизм [81];

блок 14 (Prismatic) – шарнир поступательного движения, вдоль грузового каната;

блок 15 (Install Condition) – задает изначальное высотное положение груза;

блок 16 – (Body) стрела, блок, отвечающий за массово инерционные характеристики стрелы.

на вход 1 и 2 подается изменение высоты неровности микрорельефа, на вход 3 управляющий сигнал, (включить/выключить лебедку подъема груза);

к выходу 1 крепится груз, с выхода 2 снимается его положение.

Полученная модель позволяет в полной мере отразить свойства КТ, проводить исследования, как в статическом, так и динамическом режимах. Однако с целью снижения неуправляемых колебаний груза, перемещаемого КТ, требуется проведение модернизации рабочего оборудования крана и, как следствие, возникает необходимость написания новой математической модели, отражающей свойство нового КТ, оснащенного модернизированным рабочим оборудованием.

1.3 Оценка влияния тангажа и крена крана-трубоукладчика на изменение высотного положения груза

Для анализа работы КТ в трубоукладочной колонне необходима оценка влияния рельефа, по которому передвигается кран, на колебания груза на стреле.

Неровности поверхности условно можно разделить на 3 основные составляющие: макропрофиль, микропрофиль и шероховатость. Макропрофиль состоит из длинных плавных неровностей (длина волны от 100 м и более) и фактически не вызывает колебаний машины. Микропрофиль состоит из неровностей длиной от 0,1 до 100 м и вызывает существенные колебания машины. Шероховатости (длина волны менее 0,1 м) сглаживаются гусеницами и не вызывают ощутимых колебаний машины [86, 73, 68, 27].

Важно проследить зависимость изменения высоты подвеса груза от высоты помехи, на которую наехал кран, связав высоту помехи с углами тангажа и крена. Учитывая жесткую подвеску базового трактора и отсутствие деформации со стороны грунта, рассмотрим процесс преодоления препятствия как три возможных этапа.

Первый этап это тангаж машины в отсутствии крена. На рисунке 1.8 схематично показан первый этап, где β_1 – угол тангажа, ε_2 – угол наклона стрелы, $h_{\text{п}}$ – высота препятствия, R_2 – длина стрелы, $h_{\text{т}}$ – вертикальное смещение точки А,

стрелкой задано направление движения КТ. Этап заключается в повороте точек EG базовой машины вокруг оси FD на угол β_1 , что дает вертикальное смещение конца стрелы на расстояние h .

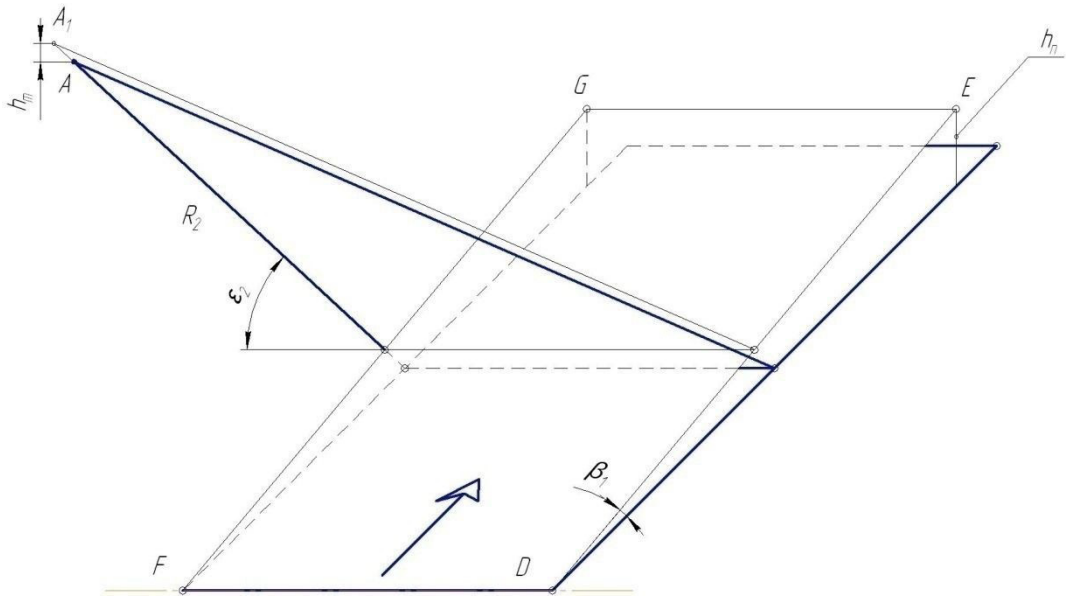


Рисунок 1.8 – Схематичное изображение тангажа КТ на угол β_1

В данном случае расчетная схема будет иметь вид согласно рисунка 1.9, где: L – длина базы КТ, H – высота подвеса груза, R – радиус поворота точки A , b – горизонтальная составляющая перемещения точки A , h_T – искомая вертикальная составляющая перемещения точки A , h_3 –гипотенуза, h_{II} – высота препятствия.

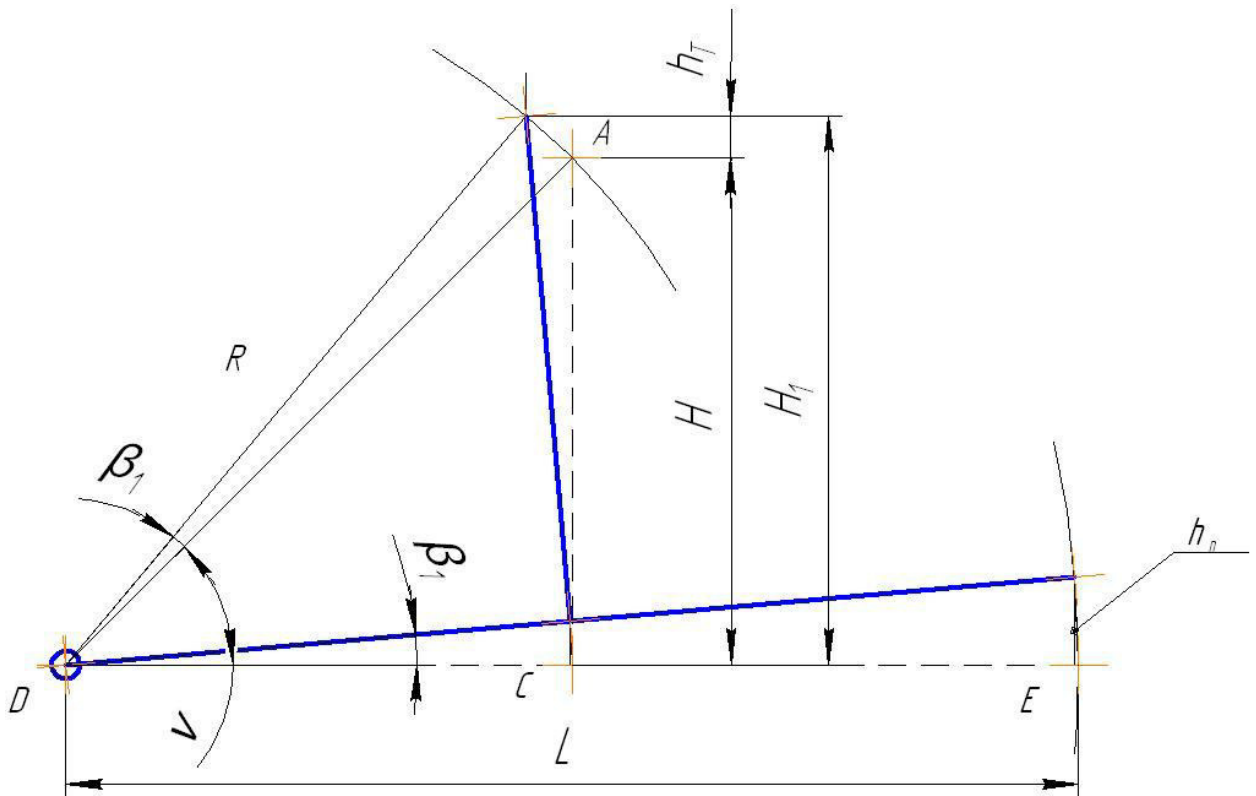


Рисунок 1.9 – Расчетная схема вертикального перемещения стрелы при тангаже

Допустим, что мы уже знаем значение угла тангажа β_1 , получив его с датчика крена, установленного в кабине КТ и значение угла наклона стрелы ε_2 (рисунок 1.8), получив его с маятникового датчика угла, установленного на основании стрелы. Для нахождения искомой вертикальной составляющей h_T , как разности вертикальных проекций радиуса поворота R , формула (1.3).

$$h_T = H_1 - H, \quad (1.3)$$

где: H – вертикальная проекция стрелы до наезда на препятствие, H_1 – вертикальная проекция стрелы после наезда на препятствие, формулы (1.4) и (1.5) соответственно:

$$H = R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2); \quad (1.4)$$

$$H_1 = R \cdot \sin(\nu + \beta_1). \quad (1.5)$$

Для нахождения высоты H_1 потребуется определить радиус поворота точки А, R и угла ν . R найдем как гипотенузу прямоугольного треугольника ADC со сторонами. В нашем случае примем сторону DC равной половине длины КТ. В ином случае её можно принять как отдельную, заранее известную, переменную.

$$R = \sqrt{H^2 + \frac{L^2}{2}}; \quad (1.6)$$

Угол ν найдем из того же треугольника ADC.

$$\nu = \arctg \frac{H}{L/2}. \quad (1.7)$$

Подставив уравнения (1.4), (1.5), (1.6), (1.7) в формулу (1.3) получим:

$$h_T = \sqrt{(R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2))^2 + \frac{L^2}{2}} \cdot \sin\left(\arctg \frac{H}{L/2} + \beta_1\right) - R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2). \quad (1.8)$$

Определение вертикального перемещения в обратном случае, когда машина съезжает в углубление или же наезжает на препятствие, двигаясь назад, аналогично, за исключением того, что угол проекции H_1 будет находиться не из суммы, а из разности углов ν и β_1 . Формула нахождения h_T будет иметь вид (1.9):

$$h_T = \sqrt{(R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2))^2 + \frac{L^2}{2}} \cdot \sin\left(\arctg \frac{H}{L/2} - \beta_1\right) - R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2). \quad (1.9)$$

Рассмотрим вариант крена КТ. На рисунке 1.10 показан крен на угол α_1 при наезде на препятствие высотой $h_{\text{п}}$, что приводит к вертикальному смещению $h_{\text{кр}}$.

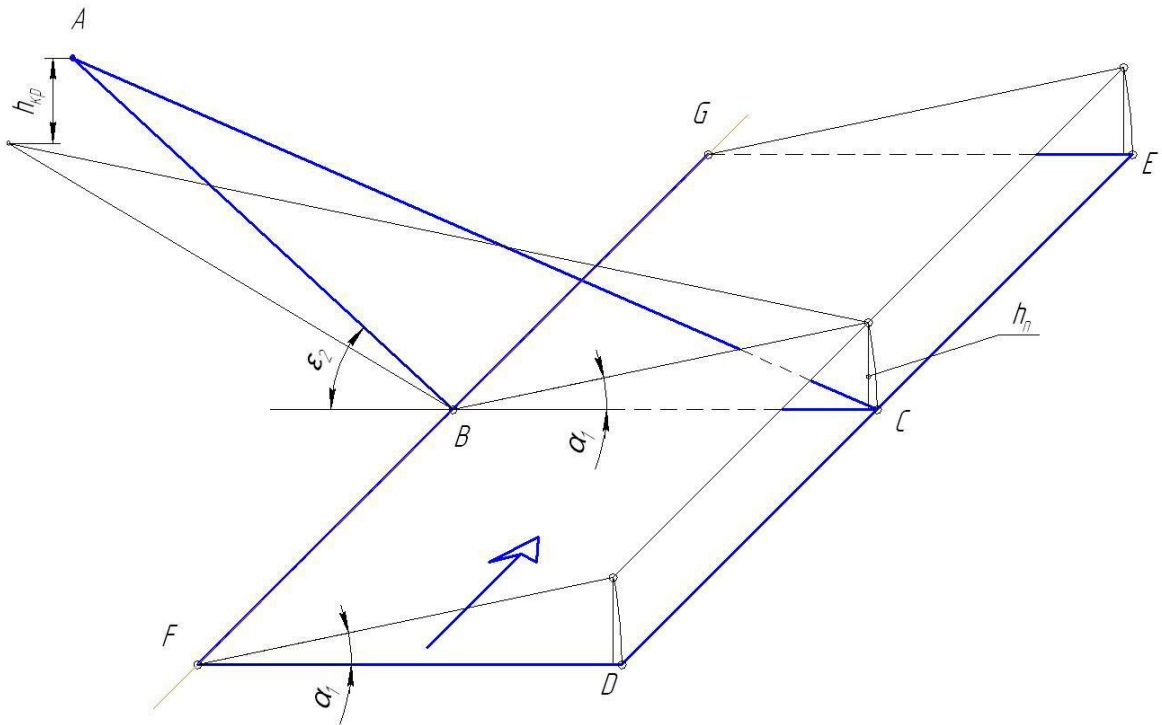


Рисунок 1.10 – Схематичное изображение крена КТ на угол α_1

В случаи крена точки DCE базовой машины совершают поворот относительно оси FG на угол α , что приводит к вертикальному смещению $h_{\text{кр}}$ точки A. Что бы определить смещение $h_{\text{кр}}$ воспользуемся расчетной схемой представленной на рисунке 1.11, где R_2 —длина стрелы, H —вертикальная проекция стрелы до наезда на препятствие, H_1 — вертикальная проекция стрелы после наезда на препятствие, $h_{\text{п}}$ — высота препятствия, ϵ_2 — угол наклона стрелы, α_1 — угол крена.

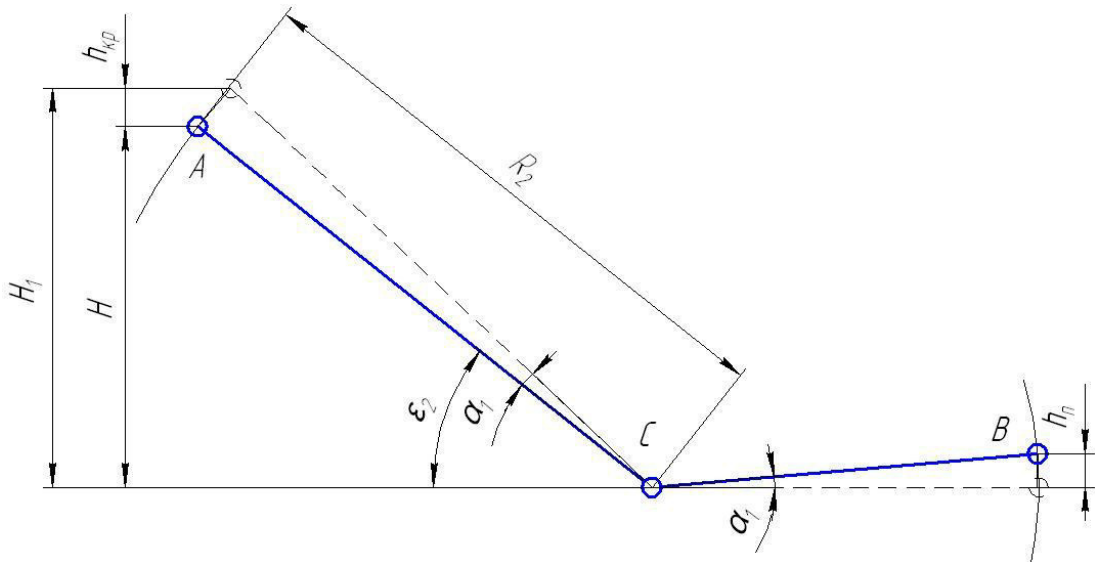


Рисунок 1.11 – Расчетная схема вертикального перемещения стрелы при крене

Вертикальную составляющую $h_{кр}$, найдем как разность вертикальных проекций стрелы до и после наезда на препятствие формула (1.10):

$$h_{кр} = H_1 - H. \quad (1.10)$$

Зная длину стрелы R_2 , угол наклона стрелы ε и угол крена КТ α , найдем H и H_1 .

$$H = R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2); \quad (1.11)$$

$$H_1 = R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2 + \alpha_1). \quad (1.12)$$

Подставив данные формул (1.11) и (1.12) в формулу (1.10) получим:

$$h_{кр} = R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2 + \alpha_1) - R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2). \quad (1.13)$$

Формула (1.13) справедлива при условии наезда правой гусеницей, если же КТ совершает наезд левой гусеницей, то расчетная схема имеет вид (рисунок 1.12):

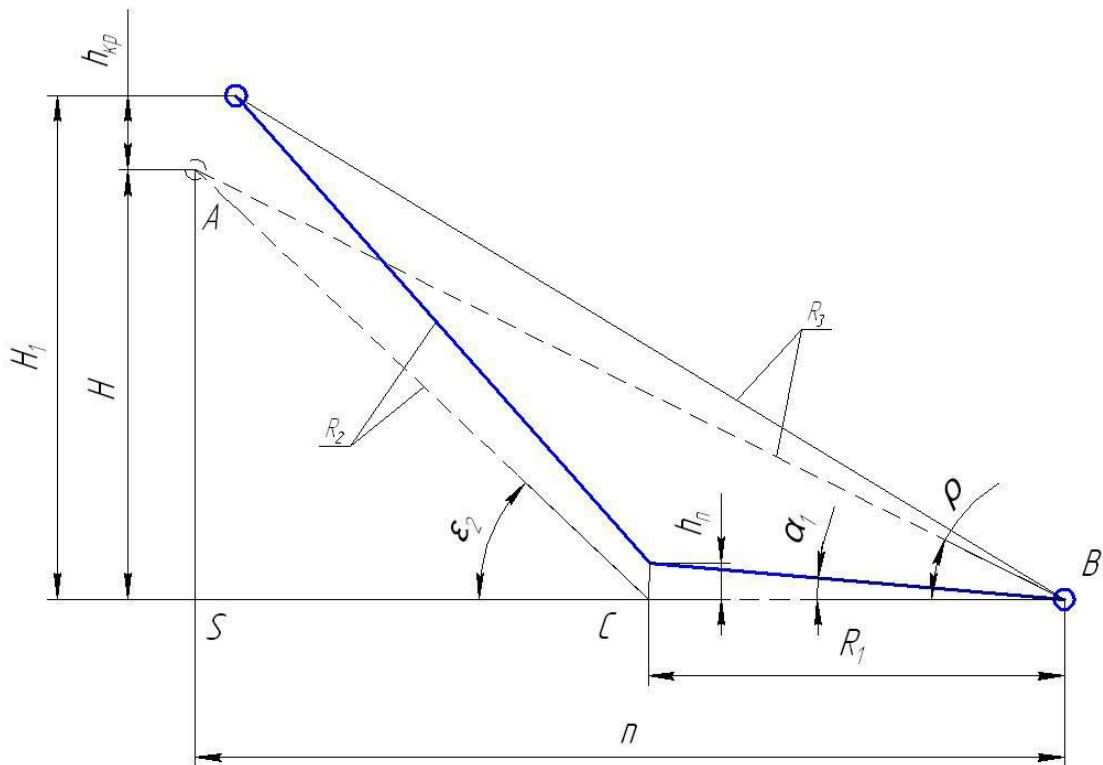


Рисунок 1.12 – Расчетная схема вертикального перемещения конца стрелы при наезде на препятствие левой гусеницей

Как и в предыдущем случае, вертикальная смещение равно разности H и H_1 , формула (1.10). Разница заключается в радиусе поворота. Из рисунка 1.12 видно, что точка A совершает поворот на угол α_1 относительно точки B , следовательно и радиус поворота точки будет отличаться от предыдущей расчетной схемы. Следовательно, и H_1 будет находиться как проекция R_3 , формула (1.14). В целях упрощения расчета и нахождения радиуса поворота точки A , R_3 , введем точку S . Таким образом, R_3 найдем из прямоугольного треугольника ABS , формула (1.15), предварительно посчитав расстояние SC , формула (1.16), как горизонтальную проекцию R_2 . Расстояние n найдем как сумму длин R_1 и SC , формула (1.17).

$$H_1 = R_3 \cdot \sin(\rho + \alpha_1); \quad (1.14)$$

$$R_3 = \sqrt{SC^2 + n^2}; \quad (1.15)$$

$$SC = R_2 \cdot \cos(\varepsilon_2); \quad (1.16)$$

$$n = R_1 + R_2 \cdot \cos(\varepsilon_2), \quad (1.17)$$

где угол ρ найдем из прямоугольного треугольника ABS формула (1.18):

$$\rho = \operatorname{arctg} \frac{H}{n}. \quad (1.18)$$

Подставив формулы (1.11), (1.14), (1.15), (1.16), (1.17), (1.18) в формулу (1.10) получим:

$$h_{\text{кр}} = \sqrt{(R_2 \cdot \cos(\varepsilon_2))^2 + (R_1 + R_2 \cdot \cos(\varepsilon_2))^2} \cdot \sin\left(\operatorname{arctg} \frac{H}{n} + \alpha_1\right) - R_2 \cdot \sin(\varepsilon_2). \quad (1.19)$$

Рассмотрим случай определения вертикальной составляющей при одновременном крене и тангаже машины (рисунок 1.13). В таком случаи КТ совершает вращение с радиусом FE на угол γ с. Поиск угла γ и радиуса поворота FE затруднителен. Целесообразно представить данное вращение, как последовательность вращений, крена на угол α_1 и тангажа на угол β_1 , которые, в свою очередь, считаются по выше указанной методике. С последующим сложением или же вычитанием, в зависимости от схемы наезда на препятствие, вертикальных составляющих от крена и тангажа.

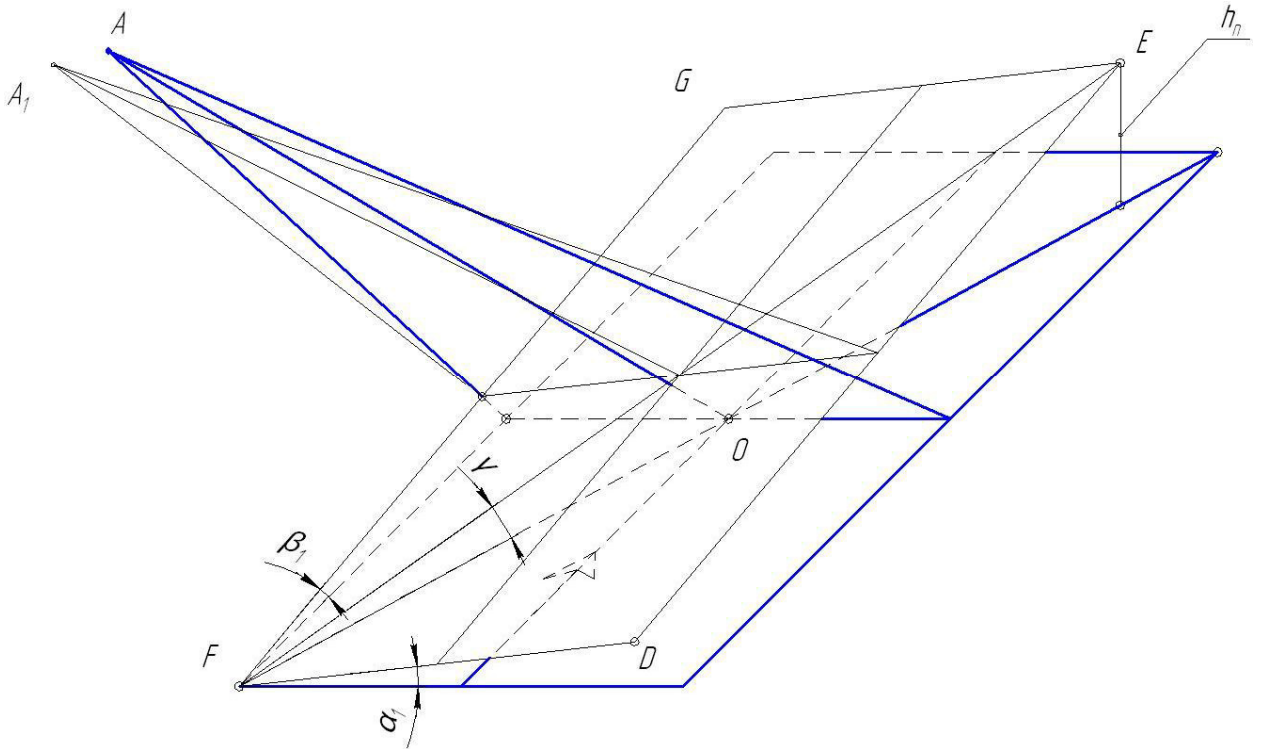


Рисунок 1.13 – Схематичное изображение сложного вращения КТ

В итоге получим, что суммарная вертикальная составляющая h , в случае наезда на препятствие правой гусеницей, определяется как сумма вертикальных составляющих от крена и тангажа соответственно, формула (1.20):

$$h = h_{кр} + h_T, \quad (1.20)$$

где $h_{кр}$ находится по формуле (1.13), h_T формула (1.8).

При наезде на препятствие левой гусеницей формула h имеет вид:

$$h = h_{кр} - h_T. \quad (1.21)$$

В данном случае $h_{кр}$ считается по формуле (1.19).

Полученные формулы позволяют сделать вывод, что по причине большого радиуса поворота оголовка стрелы даже малые, допустимые углы тангажа и крена КТ значительно влияют на изменение высотной координаты подвеса груза.

1.4 Анализ инженерных решений, направленных на снижение колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика

Неровности микрорельефа, один из наиболее важных факторов, отрицательно сказывающихся на рабочем процессе КТ. Наличие неровностей на пути перемещения крана с грузом на весу приводит к раскачиванию груза на стреле [80], что влечет за собой следующие негативные факторы: дополнительные динамические нагрузки на элементы крана, возможное повреждение элементов крана, повреждение самого груза [55].

Для решения данной проблемы, в предшествующих работах, были предложены инженерные решения. Рассмотрим варианты наиболее близкие теме работы.

На рисунке 1.14 представлена схема инженерного решения «Кран-трубоукладчик», патент № 131371.

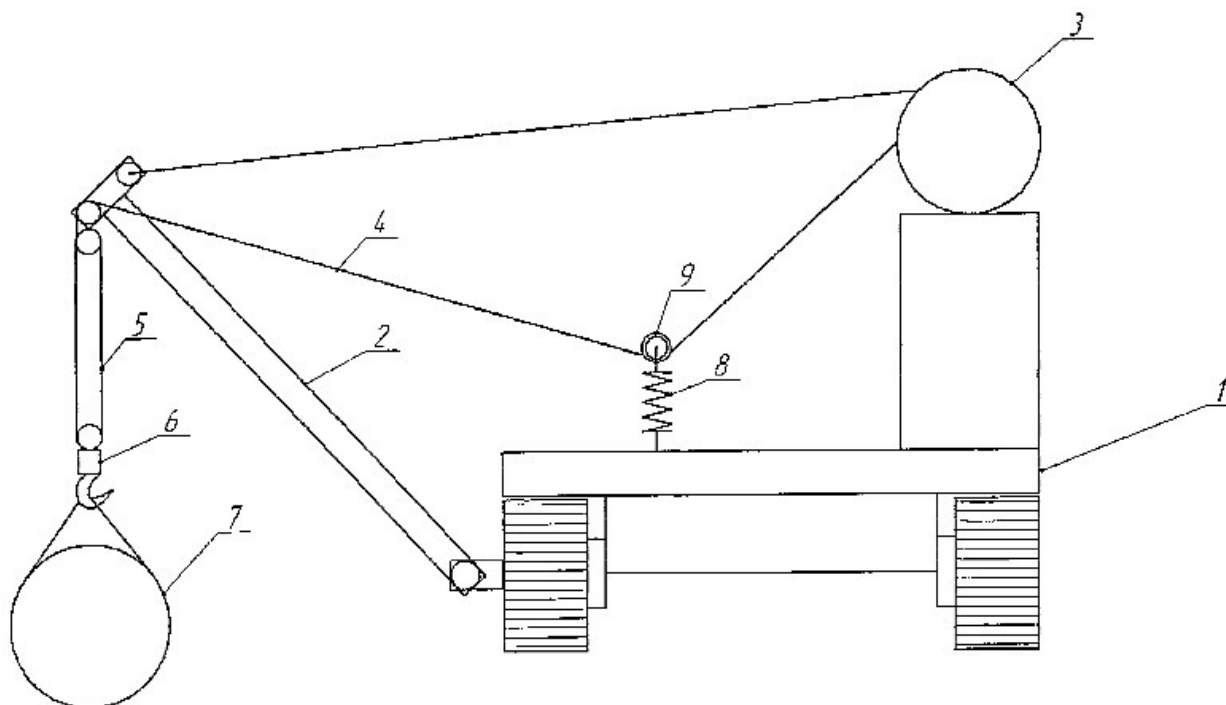


Рисунок 1.14 – Патент на полезную модель № 131371 [41]

Полезная модель относится к подъемно-транспортному машиностроению и предназначено для снижения влияния микрорельефа на поперечную устойчивость КТ, работающего в трубоукладочной колонне. Задачей полезной модели - снижение влияния кратковременных неуправляемых колебаний груза на устойчивость КТ [41].

КТ содержит базовый трактор 1, стрелу 2, лебедку 3, грузовой канат 4, полиспаг 5, крюковую обойму 6, груз 7, пружину 8, шкив 9. Принцип работы устройства заключается в следующем: КТ, работающий в колонне, двигается по неровностям микрорельефа. Установка на типовой КТ пружины со шкивом позволяет снизить влияние неровностей микрорельефа на изменение опрокидывающего момента и на устойчивость единичных КТ и трубоукладочной колонны в целом. При резком возрастании допустимого значения силы на крюке, пружина растягивается. Что приводит к удлинению грузового каната и как следствие опусканию груза и разгрузки КТ за счет соседних кранов. По мере разгрузки сила на крюке возвращается к допустимому диапазону, и пружина принимает исходное положение [41].

Использование новых элементов пружины и шкива, при достаточно простом техническом исполнении обеспечивает поперечную устойчивость КТ и трубоукладочной колонны в целом [41].

Аналогичную цель преследует полезная модель патент № 140144 [42], схема которого представлена на рисунке 1.15.

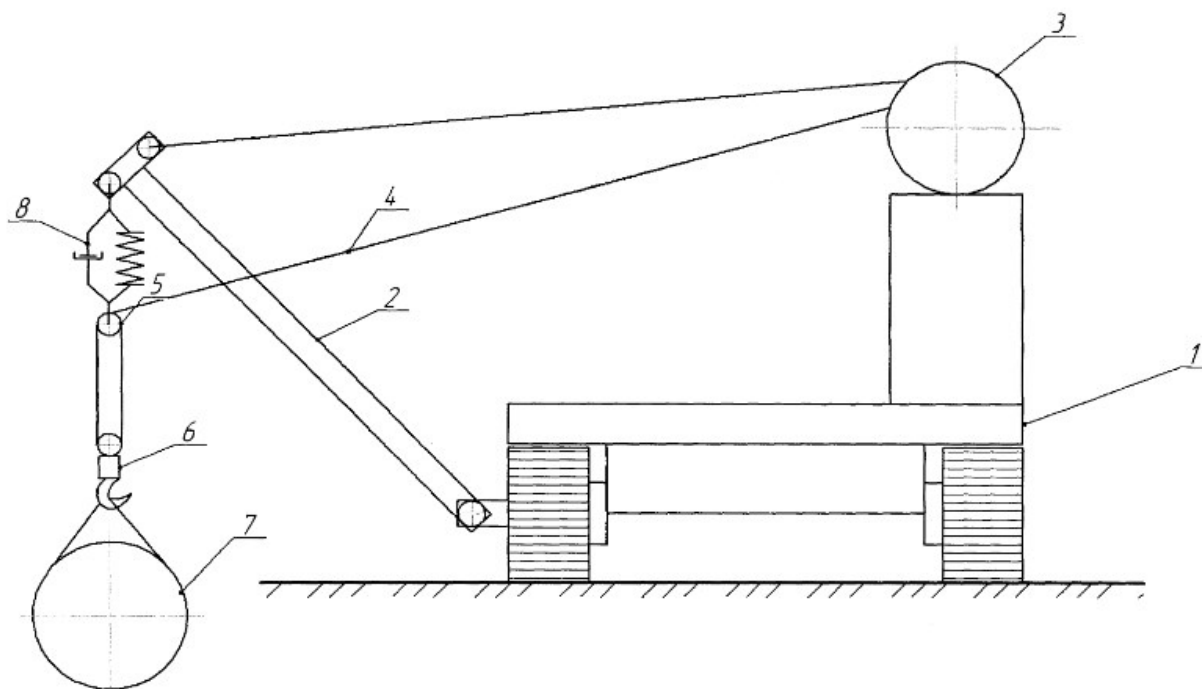


Рисунок 1.15 – Патент на полезную модель № 140144 [42]

КТ содержит базовый трактор 1, стрелу 2, лебедку 3, грузовой канат 4, полиспасть 5, крюковую обойму 6, трубу 7, упруго-вязкий элемент 8 [42].

Принцип работы схож с первым рассмотренным случаем. Постоянное изменение высотного положения крюковой обоймы, вследствие движения КТ по неровностям микрорельефа, нивелируется за счет упруго вязкого элемента 8. Что позволяет снизить влияние неровностей микрорельефа и колебаний трубопровода на изменение опрокидывающего момента и на устойчивость единичных КТ и трубоукладочной колонны в целом [42].

Схожим по цели и принципу действия с ранее рассмотренными решениями является полезная модель патент № 146007 (рисунок 1.16).

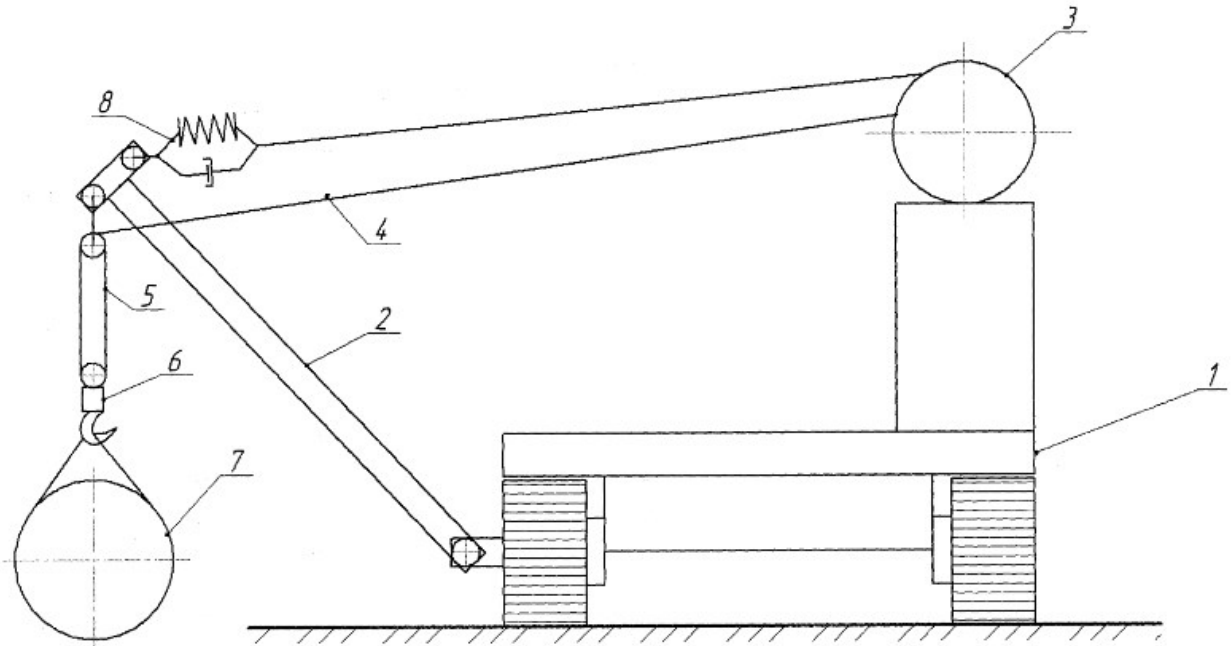


Рисунок 1.16 – Патент на полезную модель № 146007 [44]

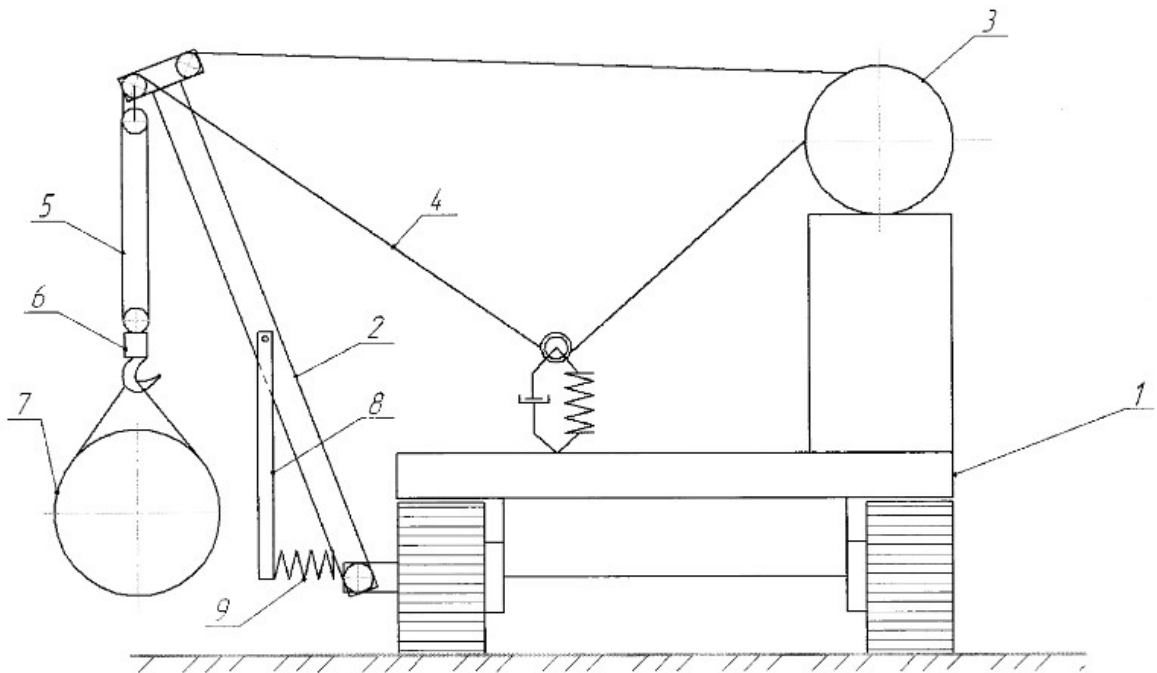


Рисунок 1.17 – Патент на полезную модель № 140492 [43]

Отличительным признаком данного решения является место установки упруго-вязкого элемента, на конце стрелового каната. Что позволяет получить требуемый технический результат: снижение влияния неуправляемых колебаний

груза высокой частоты на КТ, возникающих вследствие наезда КТ на неровности микрорельефа и динамических колебаний груза [44].

При перемещении единичного груза КТ, при малых вылетах стрелы, есть вероятность удара груза о стрелу. Для решения данной проблемы было предложено инженерное решение патент №140492 [43]. Данная полезная модель (рисунок 1.17) относится к подъемно-транспортному машиностроению и предназначена для защиты стрелы КТ от ударов трубы о стрелу и защиты изоляции трубопровода от повреждений.

КТ содержит базовый трактор 1, стрелу 2, лебедку 3, грузовой канат 4, полиспаг 5, крюковую обойму 6, трубу 7, демпфирующую раму 8, пружину 9 [43].

Принцип работы заключается в следующем, при ударе груза о демпфирующую раму, часть энергии уходит на деформацию пружины, что повышает сохранность стрелы и самого груза [43].

Рассмотренные инженерные решения снижают влияние колебаний груза на стреле КТ, возникающих вследствие движения крана по неровностям микрорельефа, но не решают вопрос с ограничением самих колебаний. Откуда вытекает вывод, что разработка инженерных решений направленных на снижение неуправляемых колебаний груза, перемещаемого КТ, за счет ограничения колебаний груза на стреле КТ, является актуальной задачей и по сей день.

1.5 Анализ систем автоматического управления грузоподъемным оборудованием крана-трубоукладчика

Чтобы добиться равномерной загрузки отдельного КТ и тем самым достичь нужного запаса устойчивости каждой машины и колонны в целом следует решить проблему загруженности оператора КТ.

Функции оператора КТ: контроль грузовой устойчивости, контроль расстояния между машинами в колонне, контроль технологической высоты подъема трубопровода, управление грузовой и стреловой лебедкой.

Для достижения данной цели были разработаны системы автоматического управления грузоподъемным оборудованием КТ, которые брали на себя часть функций оператора в управлении исполнительными механизмами [73].

Такие отечественные КТ как ТГ-201 и ТГ-502 были оборудованы устройствами автоматической стабилизации нагрузки на крюке [2].

Устройство состоит из двух гидроцилиндров, соединенных гидролинией (рисунок 1.18), один из которых гидроцилиндр-датчик, а другой исполнительный. Шток гидроцилиндра-датчика связан, по средствам каната, с концевой ветвью грузового полиспаста, а шток исполнительного гидроцилиндра кинематически связан с золотником гидрораспределителя управления барабаном грузовой лебедки [2].

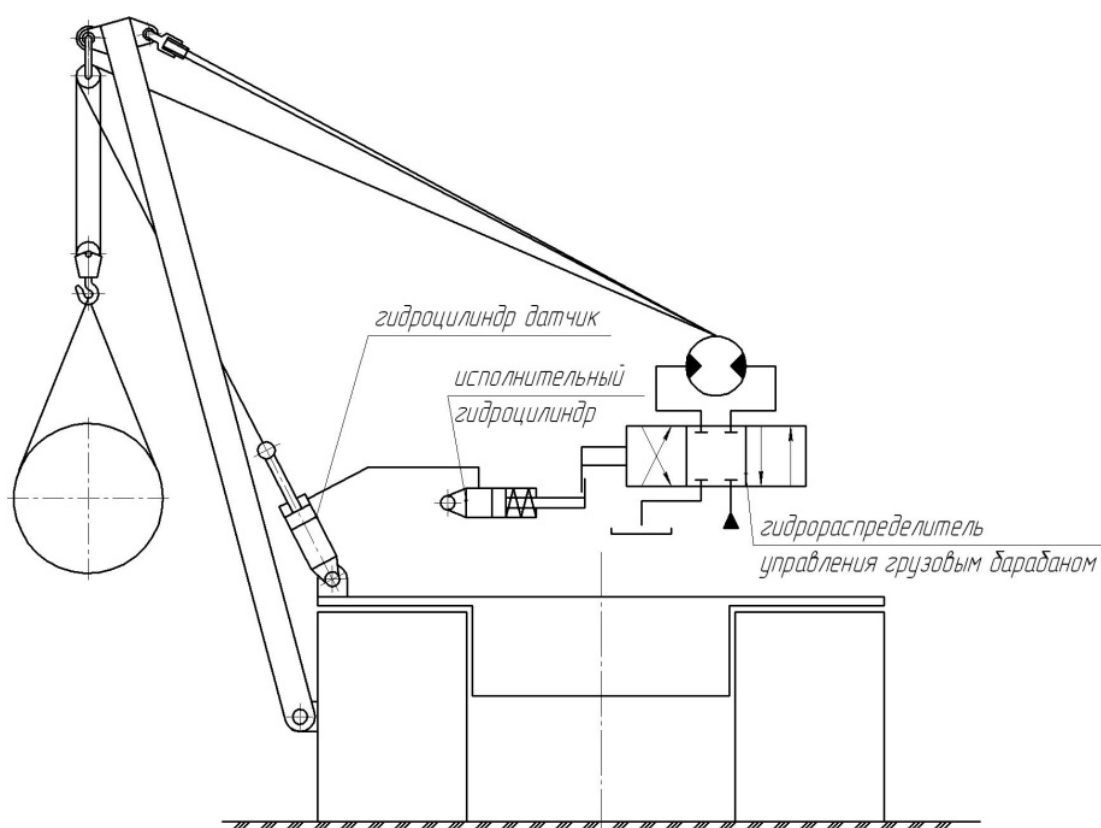


Рисунок 1.18 – Устройство автоматической стабилизации нагрузки на крюке трубоукладчика[2]

Принцип действия заключается в том, что выход нагрузки из требуемого диапазона оказывает влияние на гидроцилиндр-датчик, изменение давления в котором тут же передается на исполнительный гидроцилиндр, переключающий

гидрораспределитель, механизма подъема груза, на опускание или подъем крюка [86].

Но работа с нагрузкой на крюке в области, близкой к опрокидыванию, не лучшее, с точки зрения безопасности, решение. Возникает опасность самопроизвольного включения лебедки на подъем. Кроме того во избежании возможных аварийных ситуаций, связанных с поломкой крюковой обоймы, требуется ограничитель подъема крюка [86].

Данные устройства в работе дополняют друг друга. Но в их работе присутствует несогласованность как между собой, так и с устройствами контроля груза и ограничения подъема крюка [86].

В ходе своей работы они контролируют нагрузку на крюке, но при этом игнорируют величину грузовой устойчивости КТ, в следствии чего при потере КТ грузовой устойчивости есть вероятность самопроизвольного затягивания его в траншею [73].

Для решения этой проблемы в СибАДИ была разработана система автоматического управления грузовой лебедкой (рисунок 1.19-1.20) которая содержит в себе контур стабилизации нагрузки на крюке и контур контроля грузовой устойчивости [1, 4]. Её преимущество заключатся в том, что стабилизация нагрузки на крюке происходит в диапазоне, который удовлетворяет требуемому запасу устойчивости. [86].

В данное устройство входят: датчик нагрузки на крюке; датчик грузового момента; датчик момента запаса грузовой устойчивости; задатчик стабилизируемого диапазона нагрузки; электрогидрораспределитель включения грузовой лебедки; два блока сравнения БС1 и БС2 с двумя пороговыми элементами каждый (П1, П2 и П3, П4 соответственно); логический элемент типа "ИЛИ"; логический элемент типа "И"; два усилителя У1 и У2 [86].

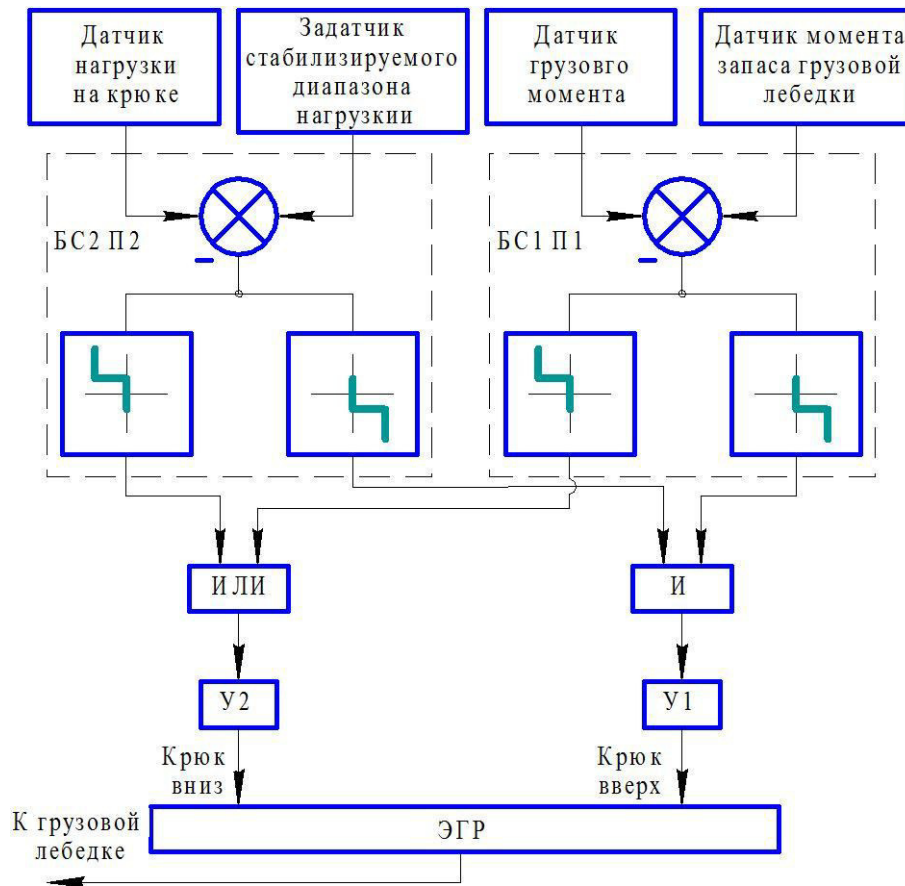


Рисунок 1.19 – Блок-схема системы автоматического управления грузовой лебедкой [86]

Данная система управляет грузовой лебедкой с помощью дополнительного электрогидрораспределителя, с учетом величины нагрузки на крюке и грузового момента, что снижает возможность опрокидывания КТ. Недостаток такой системы в том, что при работе в колонне она не учитывает загрузку остальных КТ [73].

В новочеркасском политехническом институте разработали устройство автоматического регулирования нагрузки КТ (рисунок 1.21), которое состоит из: датчика угла поперечного наклона (ДУГ) КТ; датчика угла наклона стрелы (ДУГ стрелы); датчика угла отклонения грузового каната от вертикали (ДУГ грузового каната); вычислителя допустимой нагрузки; блока сравнения; позиционного регулятора; датчика нагрузки; задатчика нагрузки [3].

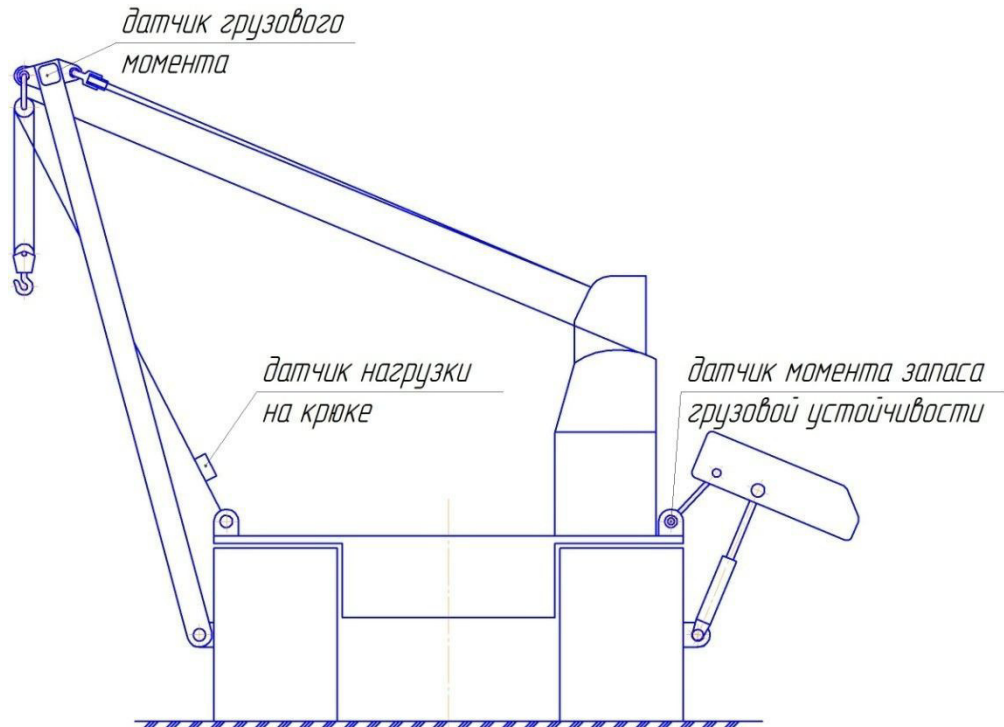


Рисунок 1.20 – Схема размещения датчиков системы автоматического управления грузовой лебедкой на трубоукладчике [86]

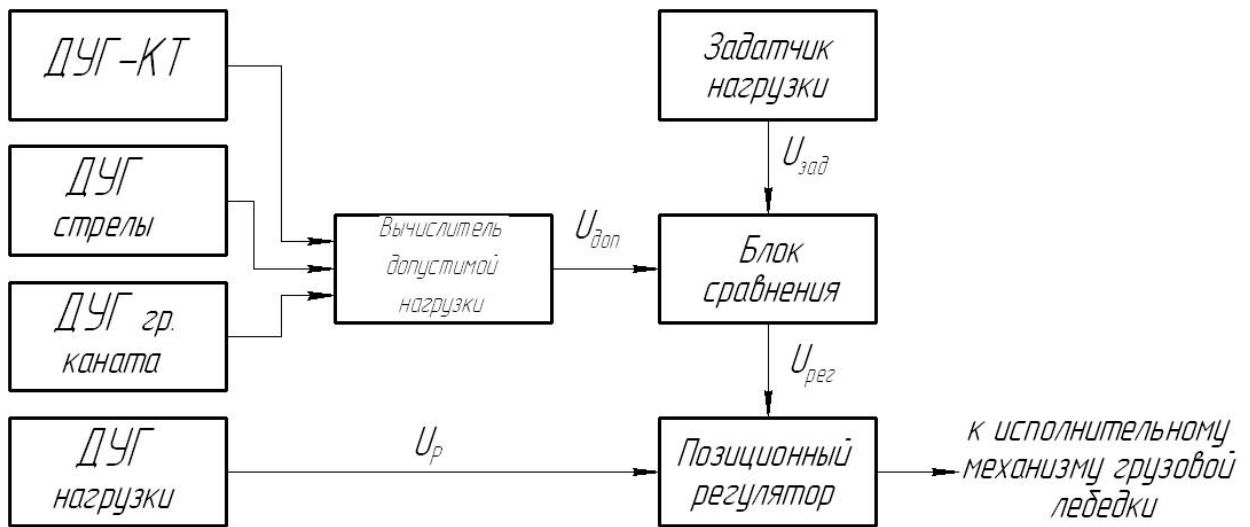


Рисунок 1.21 – Блок-схема устройства для автоматического регулирования нагрузки [3]

Данное устройство, благодаря специальному вычислителю, позволяет наиболее рационально загрузить КТ, учитывая угол наклона стрелы и базового трактора, что благоприятно сказывается на коэффициенте использования КТ по грузоподъемности и, как следствие, повышает грузоподъемность всей колонны. [3].

В дальнейшем, при проведении теоретических исследований, было выявлено вредное влияние динамической составляющей нагрузки на крюке, которое снижает безопасность проведения работ, а также их эффективность. Рассматриваемая система не в полной мере снижает данную составляющую, так как контур контроля нагрузки обладает запаздыванием и зоной нечувствительности, которые характерны для контуров с обратной связью [73].

Эти недостатки не касаются устройств пассивной стабилизации нагрузки на крюке, действие которых не зависит от временного фактора [86].

Одним из таких решений является устройство снижения динамических нагрузок для КТ с подвижным креплением груза, разработанное в СибАДИ (рисунок 1.22) [73, 1].

Работа данного устройства заключается в следующем. Перед производством работ стрела противовеса выдвигается сразу в крайнее положение, но сам груз при этом, под действием своего веса и пружины, остается в первоначальном положении [1].

При работе КТ с весом, близким к пределу грузоподъемности, в стреловом канате возникает сила, которая и перемещает груз вдоль стрелы противовеса до тех пор, пока силы не будут уравновешены. В то же время, движение груза вдоль стрелы приводит к изменению положения блока, шарнирно закрепленного на конце стрелы противовеса и, как следствие, удлинению грузового полиспаста, что и приводит к гашению динамических колебаний [1].

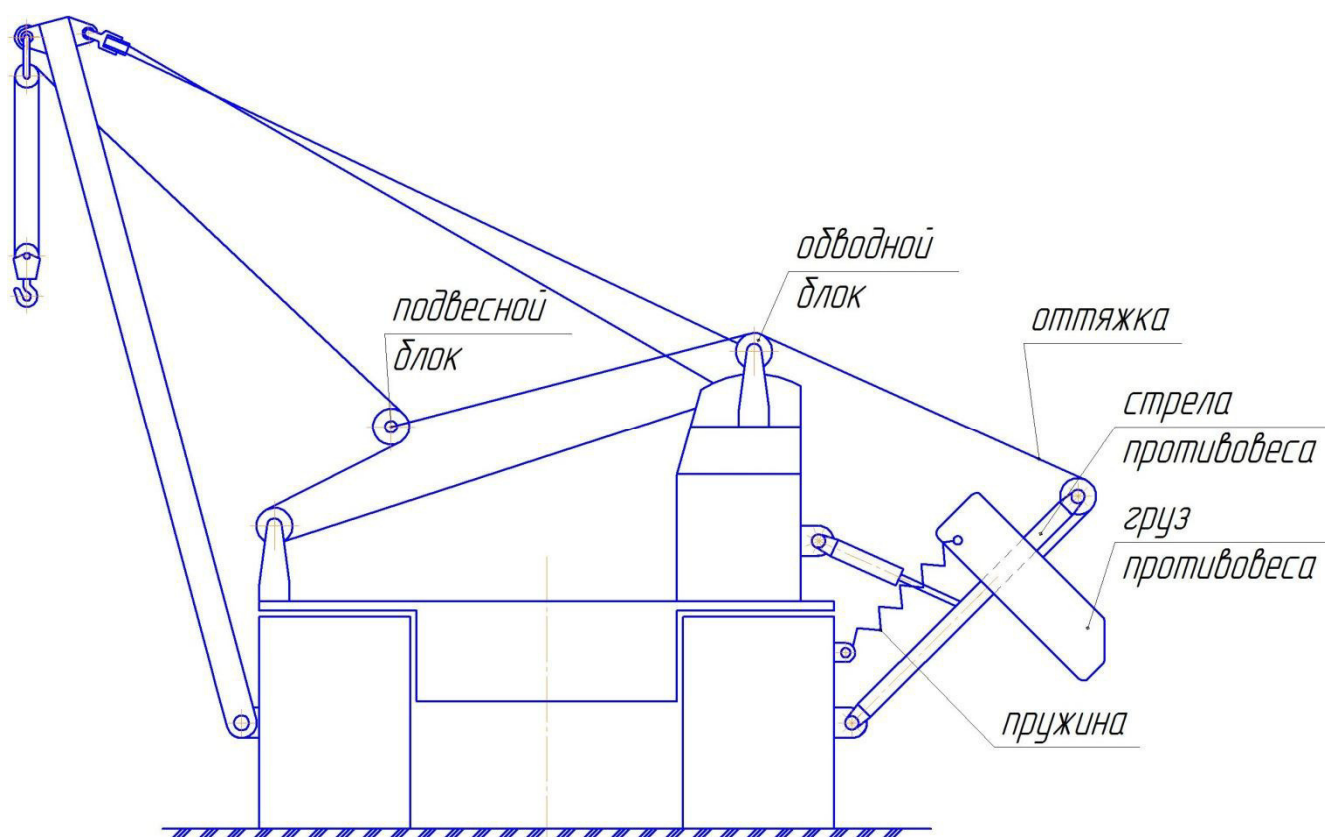


Рисунок 1.22 – Устройство снижения динамических нагрузок для КТ с подвижным креплением груза противовеса в механизме его выдвижения [1]

В итоге, гашение динамических колебаний на крюке осуществляется путем рассеивания динамических нагрузок при помощи упругой связи грузоподъемного механизма с противовесом, который в свою очередь реагирует на изменение нагрузки на крюке, сохраняя тем самым устойчивость КТ [1].

Данное устройство также учитывает перераспределение сил нагрузки между КТ при движении по неровностям микрорельефа в составе изоляционно-укладочной колонны. В таком случае происходит изменение силы на крюке и, как следствие, на грузовом канате. Грузовой канат, в соответствии с грузовым моментом, увеличивает или уменьшает вылет стрелы противовеса и изменяет длину каната грузового полиспаста, за счет чего и достигается снижение динамической составляющей нагрузки [1].

Стоит заметить, что в целях наиболее эффективного использования КТ, целесообразно комбинированное использование устройств гашения динамических нагрузок на крюке и систем автоматического управления грузовой лебедкой [86].

Анализ теоретических исследований КТ, оснащенных системами автоматического управления грузовой лебедкой показал, что в процессе движения колонны по неровностям микрорельефа происходит постоянная смена положений КТ в пространстве, относительно трубопровода. Данные перемены требуют периодического регулирования диапазона допустимой нагрузки для каждого КТ или изменения дистанции между машинами, в целях рационального распределения нагрузки между КТ в колонне [73].

В этих целях в 2012 году в СибАДИ была предложена система управления КТ, исключая опрокидывание трубоукладочной колонны [78]. Способ состоит в оценке загруженности каждого КТ в колонне, кроме последнего по ходу движения колонны, и варьирования расстояния между КТ в колонне, в зависимости от полученных данных. Все КТ должны быть оборудованы устройствами контроля грузовой устойчивости, и иметь внешнюю световую индикацию, сообщающую об уровне загруженности КТ (75...80%; 90...100%). Такие индикаторы могут располагаться над кабинами КТ [86]. Данная система решает задачу недопущения аварийных ситуаций при укладке трубопровода, связанных с опрокидыванием КТ. Для решения задачи снижения неуправляемых колебаний груза требуется разработка новой системы управления изоляционно-укладочной колонной.

1.6 Цели и задачи исследования

Анализ предшествующих исследований показал, что основные проблемы в ходе работы КТ связаны с неравномерным распределением нагрузки среди кранов, работающих в колонне, вследствие разности высот микрорельефа, а так же неуправляемые колебания груза, за счет преодоления кранами данных неровностей. Первая проблема решается за счет оснащения КТ приборами безопасности, правильным выбором технологической схемы выполнения работ, введением систем управления, учитывающих загруженность каждого КТ. Тогда

как проблема снижения неуправляемых колебаний груза освещена не в полной мере. Возникает необходимость в проведении дополнительных исследований.

Целью диссертационной работы является снижение неуправляемых колебаний груза перемещаемого краном-трубоукладчиком.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Разработать математическую модель процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенный модернизированным рабочим оборудованием.

2. Обосновать критерий эффективности процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком.

3. Выявить функциональные зависимости, устанавливающие связь между критерием эффективности и конструктивными параметрами модернизированного рабочего оборудования.

4. Разработать инженерные решения и методику оптимизации конструктивных параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика.

Выводы по главе

1. Анализ тенденции развития КТ показал, что вопрос снижения неуправляемых колебаний груза, перемещаемого КТ, остается актуальным и по сей день.

2. Обзор математических моделей КТ показал, что для описания процесса перемещения груза КТ, оснащенный модернизированным рабочим оборудованием, как сложной динамической системы, требуется разработка новой математической модели.

3. Анализ инженерных решений, направленных на снижение влияния колебаний груза на стреле КТ, не решают вопрос ограничения самих колебаний. Рассмотренные системы управления навесным оборудованием КТ так же не решают проблему снижения неуправляемых колебаний груза, перемещаемого КТ.

4. Необходимо провести дополнительные исследования и разработать инженерные решения, позволяющие снижать неуправляемые колебания груза, перемещаемого КТ.

2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА КРАНОМ-ТРУБОУКЛАДЧИКОМ

2.1. Общая методика исследования

В качестве общей методики исследования был принят системный подход. На данный момент времени он является общенаучным направлением методологии и занимает ведущее место в научном познании [92, 86].

Суть системного подхода заключается в том, что процесс перемещения груза КТ рассматривается как система, состоящая определенного количества элементов, звеньев, объединенных в единое целое при помощи связей. Целостность процесса перемещения груза КТ, как системы, состоит в том, что свойства процесса не могут быть оценены без знания свойств его подсистем. Иерархичность и структурность процесса перемещения заключается в том, что каждая подсистема может рассматриваться, как отдельная система [92, 7].

Решение задач с применением методологии системного анализа решается в соответствии со следующими этапами [86, 31, 68]:

1) постановка задачи – определение объекта исследования, предмета, постановка цели и задач, обоснование критерия эффективности в соответствии с поставленной целью;

2) анализ решаемой задачи – определение границ объекта исследования, определение его состава (процессы входящие в объект), разделение на изучаемую систему и внешнюю среду; разбиение системы на звенья, определение связей, проходящих между звеньями и внешней средой, объединение полученных звеньев, подсистем в целостную математическую модель, процесса перемещения груза КТ;

3) решение поставленных задач – анализ построенной математической модели и ее подсистем, выявление зависимостей, описывающих взаимосвязь свойств модели и критерия эффективности;

4) синтез системы – обоснование параметров системы, которые позволяют обеспечить максимальную эффективность; разработка научно обоснованных

рекомендаций по выбору параметров системы; составление инженерных методик по выбору оптимальных значений параметров системы;

5) предложение инженерных решений, методик; формулировка выводов [86].

2.2. Методика математического моделирования

Основой любого моделирования является теория подобия, которая гласит, что абсолютное подобие моделируемого объекта и модели может иметь место лишь при замене изучаемого объекта точно таким же. В практике моделирования не стремятся к полному подобию, так как подобное стремление приводит к излишнему усложнению модели и как следствие усложнению ее анализа, повышению вероятности ошибки. Поэтому основной задачей моделирования является определение достаточной степени упрощения модели при сохранении необходимого уровня адекватности модели [73, 36, 61].

Современные программные продукты позволяют значительно повысить скорость и упростить процесс проведения теоретических исследований систем, путем использования имитационных математических моделей [73].

Математическое моделирование процесса перемещения груза моделированным КТ было проведено при помощи программного продукта MATLAB Simulink с использованием пакета SimMechanics, что дает следующие преимущества [86]:

- простота изменения свойств системы и даже ее структуры на любой стадии моделирования;

- неограниченные возможности моделирования условий эксперимента;

- блочное моделирование применяемое в SimMechanics, значительно упрощает сам процесс создания модели;

- легкость поиска ошибки, при помощи отчета программы, с указанием типа ошибки, несовместимости и блока, в котором она найдена;

-процесс визуализации модели так же способствует сравнительно быстрой и наглядной оценке адекватности движения всех звеньев, правильности установленных между ними связей, шарниров.

Составление математической модели проведено путем описания подсистем, при помощи метода однородных координат и дифференциальных уравнений, описывающих исследуемые свойства объекта [86].

При составлении математической модели, процесс перемещения груза КТ рассматривался, как сложная динамическая система, на которую действуют внешняя среда, изменение неровностей микрорельефа, которые имеют случайный характер [31, 73].

При изучении свойств модели могут быть использованы различные типы возмущающих воздействий: детерминированные и стохастические. Поэтому, чтобы приблизить теоретические исследования к реальным условиям перемещения груза, в качестве возмущающих воздействий на КТ, приняты стохастические воздействия со стороны микрорельефа [86, 31, 68] и детерминированное воздействие на сам груз (отклонение груза от вертикали).

Математическая модель процесса перемещения груза КТ состоит из 2 математических моделей: КТ и микрорельефа. Написание уравнений движения подвижных звеньев карна было произведено методом однородных координат [86].

Поскольку связи между точками звеньев динамической системы голономные, т. е. геометрические, число степеней свободы системы равно числу обобщенных координат. Положение твердого тела в пространстве может быть задано 6 независимыми величинами: 3 координаты условного центра и 3 угла поворота вокруг соответствующих осей координат. Определение взаимного положения звеньев удобнее и легче всего свести к задаче преобразования одной системы связанных осей в другую, используя метод однородных координат [86, 14, 27, 58, 61].

Рассматриваемую точку любого звена, можно определить его положение в локальной системе однородных координат данного звена вектором положения вида [86, 14, 27, 58, 61]:

$$\bar{R}_i = [X_i \quad Z_i \quad Y_i \quad 1]^T, \quad (2.1)$$

где X_i, Y_i, Z_i – координаты точки в локальной декартовой системе координат соответствующего звена.

Все преобразования в трехмерном пространстве могут быть сведены к композиции двух преобразований: вращения и переноса вдоль координатных осей. Их отображают специальные матрицы размера 4x4, вида соответственно [86, 14, 27, 58, 61]:

$$A_\tau = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & 0 \\ & \tau & & 0 \\ & & & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]; \quad (2.2)$$

$$A_l = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & \ell \\ & E & & \\ & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]; \quad (2.3)$$

$$A = A_l \cdot A_\tau = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & \ell \\ & \tau & & \\ & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]. \quad (2.4)$$

В формулах (2.2) – (2.4) τ – матрица направляющих косинусов осей локальной системы координат, в которую осуществляется переход относительно аналогичных осей локальной системы координат, из которой осуществляется переход размером 3x3. Элемент этой матрицы представляет собой проекцию единичного вектора одной из осей системы координат, в которую осуществляется переход ($i-1$) на направление одной из осей другой системы координат, из которой осуществляется переход (i) [86, 14, 27, 58, 61].

Матрица A_τ получена в результате определенной последовательности перемножения матриц поворота системы координат, из которой осуществляется переход (i) вокруг соответствующих осей системы координат, в которую осуществляется переход ($i-1$) формула (2.5) [86, 14, 27, 58, 61]:

$$A_\tau = A_{iy} \cdot A_{iv} \cdot A_{i\omega}, \quad (2.5)$$

где A_{iy} , A_{iv} , $A_{i\omega}$ – матрицы поворота вокруг осей X_{i-1} , Y_{i-1} , и Z_{i-1} соответственно.

l – вектор положения точки (начало системы координат i) в системе координат $i-1$ размером 3×1 формула (2.6), E – единичная матрица размером 3×3 , формула (2.7):

$$l = [X \quad Y \quad Z]^T; \quad (2.6)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Матрица A_l , формула (2.8) получена в результате перемножения трех матриц перемещения системы координат (i) вдоль соответствующих осей системы координат ($i-1$) [86, 14, 27, 58, 61]:

$$A_l = A_{ix} A_{iz} A_{iy}. \quad (2.8)$$

Матрица вида (2.4) характеризует переход из одной локальной системы координат в другую. Если точка в локальной системе координат одного звена задана вектором вида $\vec{R}_i = [X_i \quad Z_i \quad Y_i \quad 1]^T$ в однородных координатах, то в локальной системе координат соседнего звена она будет задана вектором [86, 14, 27, 58, 61]:

$$\vec{R}_{i-1} = A_i \cdot \vec{R}_i, \quad (2.9)$$

где A_i – матрица вида (2.4) перехода от звена i к звену $i-1$.

Таким образом, произвольная точка i -го звена, представленная в локальной системе координат своего звена вектором R_i , будет представлена в инерциальной системе координат вектором [86, 14, 27, 58, 61]:

$$\vec{R}_{oi} = T_i \cdot \vec{R}_i, \quad (2.10)$$

где T_i – матрица перехода из i -й локальной системы координат в инерциальную:

$$T_i = A_1 \cdot \dots \cdot A_i. \quad (2.11)$$

Матрицы перехода в формулах (2.1) – (2.11) формировались с учетом больших значений обобщенных координат, определяющих взаимное положение звеньев. Для представления полученных уравнений в форме, удобной для машинной обработки и решения на персональном компьютере, необходимо провести линеаризацию полученных уравнений по методу Тейлора и перейти к малым значениям обобщенных координат (отклонениям от больших значений). Линеаризация полученных уравнений по методу Тейлора позволяет рассматривать малые перемещения характерных точек расчетной схемы с достаточной для практических целей точностью [86, 14, 27, 58, 61]:

$$df = \sum \frac{\partial f}{\partial q_j} \cdot q_j, \quad (2.12)$$

где $q_j = dQ_j$; q_j – малое значение обобщенной координаты; Q_j – большое значение обобщенной координаты.

В линеаризованном виде векторы положения и скорости характерных точек принятой расчетной схемы будут иметь вид [86, 14, 27, 58, 61]:

$$\vec{R}_{oi} = \sum_{j=1}^{\ell} U_{ij} \cdot q_j \cdot \vec{R}_i; \quad (2.13)$$

$$\dot{\vec{R}}_{oi} = \frac{d\vec{R}_{oi}}{dt}. \quad (2.14)$$

Отсюда следует:

$$\dot{\vec{R}}_{oi} = \sum_{j=1}^{\ell} U_{ij} \frac{dq_j}{dt} \cdot \vec{R}_i = V_i \cdot \vec{R}_i; \quad (2.15)$$

$$V_i = \sum_{j=1}^{\ell} U_{ij} \frac{dq_j}{dt}. \quad (2.16)$$

Матрицы для определения скоростей:

$$U_{ij} = \frac{\partial T_i}{\partial q_j}. \quad (2.17)$$

Для дифференцирования по формуле (2.17) необходимо применять следующие дифференцирующие матрицы [86, 14, 27, 58, 61]:

$$E_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.18)$$

$$E_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.19)$$

$$E_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.20)$$

$$E_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.21)$$

$$E_\varphi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2.22)$$

$$E_\psi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

На основе кинематической модели КТ может быть получена его динамическая модель. Для этого в данной работе был использован метод дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода [86, 14, 27, 58, 61]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = F_j, \quad (2.24)$$

где t – время; q_j – обобщенная координата; K – кинетическая энергия; P – потенциальная энергия; Φ – диссипативная функция; \dot{q}_j – обобщенная скорость; F_j – обобщенная сила, действующая по обобщенной координате.

В векторно-матричной форме полученная система дифференциальных уравнений будет иметь вид

$$A \cdot \vec{q}'' + B \cdot \vec{q}' + C \cdot \vec{q} = \vec{F}, \quad (2.25)$$

где A , B , C – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений размером 10×10 (A – матрица инерционных коэффициентов; B – матрица демпфирования; C – матрица коэффициентов жесткости); q'' , q' , q – матрицы размером 10×1 , представляющие соответственно ускорения, скорости и малые отклонения обобщенных координат; F – матрица внешних сил, действующих по обобщенным координатам, размером 10×1 [86].

Коэффициенты дифференциальных уравнений являются функциями больших значений обобщенных координат и конструктивных параметров, что позволяет перейти от малых перемещений к большим при помощи способа поэтапного интегрирования представленных дифференциальных уравнений [27]. Применительно к данной системе дифференциальных уравнений способ поэтапного интегрирования сводится к периодическому пересчету во время переходного процесса коэффициентов дифференциальных уравнений с учетом больших значений обобщенных координат, скорректированных на текущую величину малых отклонений обобщенных координат. Одновременно с этим малые отклонения обобщенных координат обнуляются. Текущие значения обобщенных скоростей и обобщенных ускорений при пересчете коэффициентов не изменяются и передаются в качестве начальных условий для решения новой системы дифференциальных уравнений. Такие параметры, как приведенные жесткости и вязкости элементов ходового оборудования, также могут быть изменены при пересчете коэффициентов во время переходного процесса, что позволяет моделировать отрыв гусениц от опорной поверхности при движении по микрорельефу [86].

Математическая модель, разработанная на основе данных уравнений, позволяет решать задачи статики, кинематики и динамики, проводить исследования КТ в различных эксплуатационных режимах [86].

2.3. Методика экспериментальных исследований

Комплексный метод исследований предполагает проведение экспериментальных исследований, основными задачами которых являются: подтверждение адекватности математической модели объекта исследования; определение численных значений параметров, входящих в математические модели объекта; подтверждение работоспособности и эффективности технического решения, внедренного в производство [31].

Математическая модель процесса перемещения груза краном трубоукладчиком состоит из математических моделей: КТ и микрорельефа. Модель микрорельефа достаточно хорошо изучена и математически описана. Математическая модель КТ разработана с элементами научной новизны, что требует подтверждения её адекватности. Для этого необходимо:

1. Проведение натурного эксперимента с целью получения массива экспериментальных данных.
2. Проведение машинного (модельного, вычислительного) эксперимента при необходимых параметрах и условиях с целью получения теоретических данных.
3. Оценка адекватности математической модели, путем сравнения экспериментальных и теоретических данных.

При проведении экспериментальных исследований возможно использование двух методов: активного и пассивного [31, 68].

Пассивный эксперимент, который основан на регистрации входных и выходных параметров, характеризующих объект исследования, без вмешательства в эксперимент в процессе его проведения. Обработка экспериментальных данных осуществляется только после окончания эксперимента. [59].

Активный эксперимент. При использовании методов активного эксперимента математическое описание строится в виде совокупности статистических и динамических выходных характеристик объекта, которые регистрируются при подаче его на выходы специальных возмущающих воздействий по заранее спланированной программе. [59].

В данной работе использовалась методология как пассивного, так и активного эксперимента, в силу того, что внешние возмущающие воздействия имеют стохастическую природу, а при подтверждении адекватности моделей целесообразно формировать детерминированные воздействия.

В качестве оценки достоверности экспериментальных данных использовалась доверительная вероятность – P_x . В данной работе достаточной считалась доверительная вероятность $P_x \approx 0,95$.

Исключение грубых ошибок измерений проводилось в соответствии с ГОСТ 11.002-73. Для этого по данным упорядоченной выборки $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ вычислялось среднее арифметическое выборки, формула (2.26)

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.26)$$

и дисперсия, формула (2.27)

$$D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2, \quad (2.27)$$

где x_i – значение i -го наблюдения; n – число наблюдений.

Грубой считается ошибка, при которой выполняется неравенство (2.28) [35]:

$$\frac{x_i - m_x}{\sigma_x} \geq t_{k,\alpha}, \quad (2.28)$$

где $t_{k,\alpha}$ – табличное значение параметра распределения Стьюдента при степени свободы $k=n-1$ и доверительной вероятности $p_d=1-\alpha_y$; где α_y – уровень значимости ($\alpha_y=1-p_d$).

С учетом принятого в работе допущения о нормальном законе распределения результатов наблюдений, истинное значение математического ожидания с вероятностью p_δ лежит в пределах [68]:

$$m_x - \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{n}} \leq m_x \leq m_x + \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{n}}, \quad (2.29)$$

где t_β – величина, характеризующая для нормального закона распределения число средних квадратических отклонений, откладываемых от центра рассеивания в обе стороны для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна p_δ .

Для среднеквадратического отклонения можно записать [68]:

$$\sigma_x - \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{2n}} \leq \sigma_x \leq \sigma_x + \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{2n}}. \quad (2.30)$$

Количество необходимых измерений определяется исходя из заданной относительной погрешности измерений математического ожидания и среднеквадратического отклонения по формулам [68]:

$$n_m = \frac{t_\beta^2 \psi_\delta^2}{\delta_m^2}; \quad (2.31)$$

$$n_\sigma = \frac{t_\beta^2}{2\delta_\sigma^2}, \quad (2.32)$$

где δ_m и δ_σ – относительные погрешности для математического ожидания и среднеквадратического отклонения соответственно; ψ_δ – коэффициент вариации измеряемой величины.

Выводы по главе

1. При проведении теоретических исследований необходимо использовать методику системного анализа, для математического моделирования целесообразно использовать метод однородных координат.

2. При проведении экспериментальных исследований необходимо воспользоваться теорией планирования эксперимента.

3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА КРАНОМ-ТРУБОКЛАДЧИКОМ, ОСНАЩЕННЫМ МОДЕРНИЗИРОВАННЫМ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

3.1 Модель объекта исследования

Объектом исследования, в данной работе, является сложная динамическая система процесса перемещения груза КТ (рисунок 3.1), оснащенной модернизированным рабочим оборудованием. Система состоит из подсистем, взаимодействующих в рабочем процессе. Между блоками проходят связи, отражающие взаимодействие блоков, в ходе рабочего процесса.

Рассмотрим подробнее взаимодействие подсистем и их состав. КТ представлен блоками: базовая машина, стрела, уравнивающий канат (УК). Грунт представлен двумя блоками - микрорельеф и реакция грунта на ходовое оборудование базовой машины.

КТ за счет своего веса давит на грунт C_2 . Грунт удерживает кран за счет реакции опор C_{11} . Рельеф воздействует на базовую машину, сообщая ему координаты микронеровностей C_1 , что приводит к вертикальному и угловым перемещениям базовой машины, которая, в свою очередь, воздействует на стрелу C_3 , изменяя его положение в пространстве, C_4 реакция опоры, возникающие в шарнире крепления стрелы. Перемещение в пространстве стрелы передается на груз C_5 , что приводит к изменению силы натяжения грузового каната C_6 .

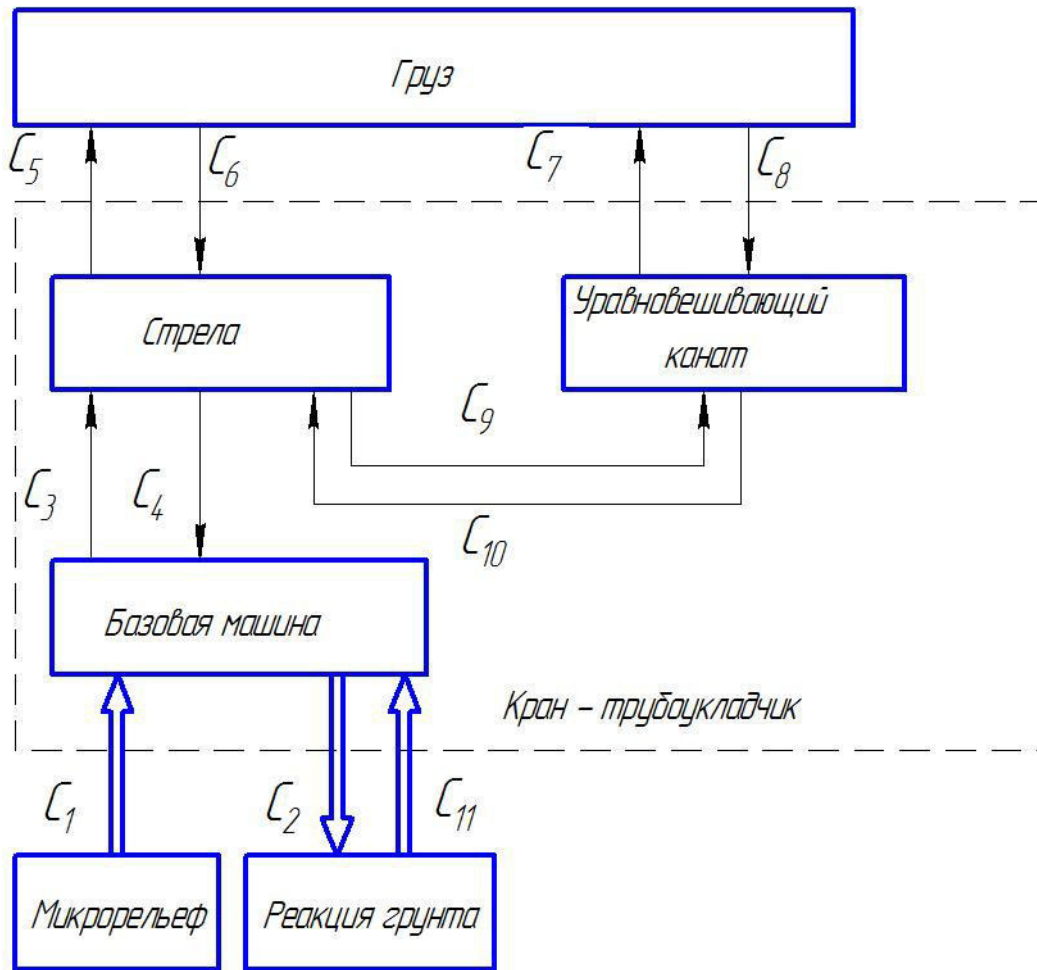


Рисунок 3.1 – Блок-схема сложной динамической системы процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком

Возникающие колебания груза ζ_8 , вследствие угловых и вертикальных перемещения крана в пространстве, приводят к изменению силы натяжения УК ζ_7 , который в свою очередь ограничивает за счет данной силы амплитуду колебания груза. ζ_{10} сила воздействия на стрелу со стороны уравновешивающего каната. ζ_9 реакция опоры в шарнире крепления УК.

3.2 Обоснование расчетной схемы крана-трубоукладчика

При создании математической модели КТ важно учесть признаки большинства моделей. Несмотря на их многообразие, все они имеют ряд общих конструктивных решений: базовый трактор на гусеничном ходу, жесткая подвеска, боковое расположение стрелы и противовеса [86].

В процессе составления обобщенной расчетной схемы необходимо добиться адекватности математической модели и в тоже время, в целях упрощения расчетной схемы, не следует учитывать факторы, которые не влияют на колебание элементов КТ, либо влияние которых незначительно [86].

Анализ рабочего процесса КТ показывает необходимость использования при исследовании пространственной расчетной схемы (рисунок 3.2) [86, 77].

Принимая во внимание жесткость остова трактора, металлоконструкции навесного оборудования, КТ представлен в виде шарнирно сочлененного многозвенника, звеньями которого является базовая машина, стрела. Звенья характеризуются сосредоточенными массами [86].

Внешние силы, действующие на стрелу и ходовое оборудование, в целях упрощения математической модели целесообразно изобразить, как сосредоточенные силы, приложенные в определённой точке. Сосредоточенная сила представляет собой проекцию результирующих сил на оси инерциальных систем координат [77].

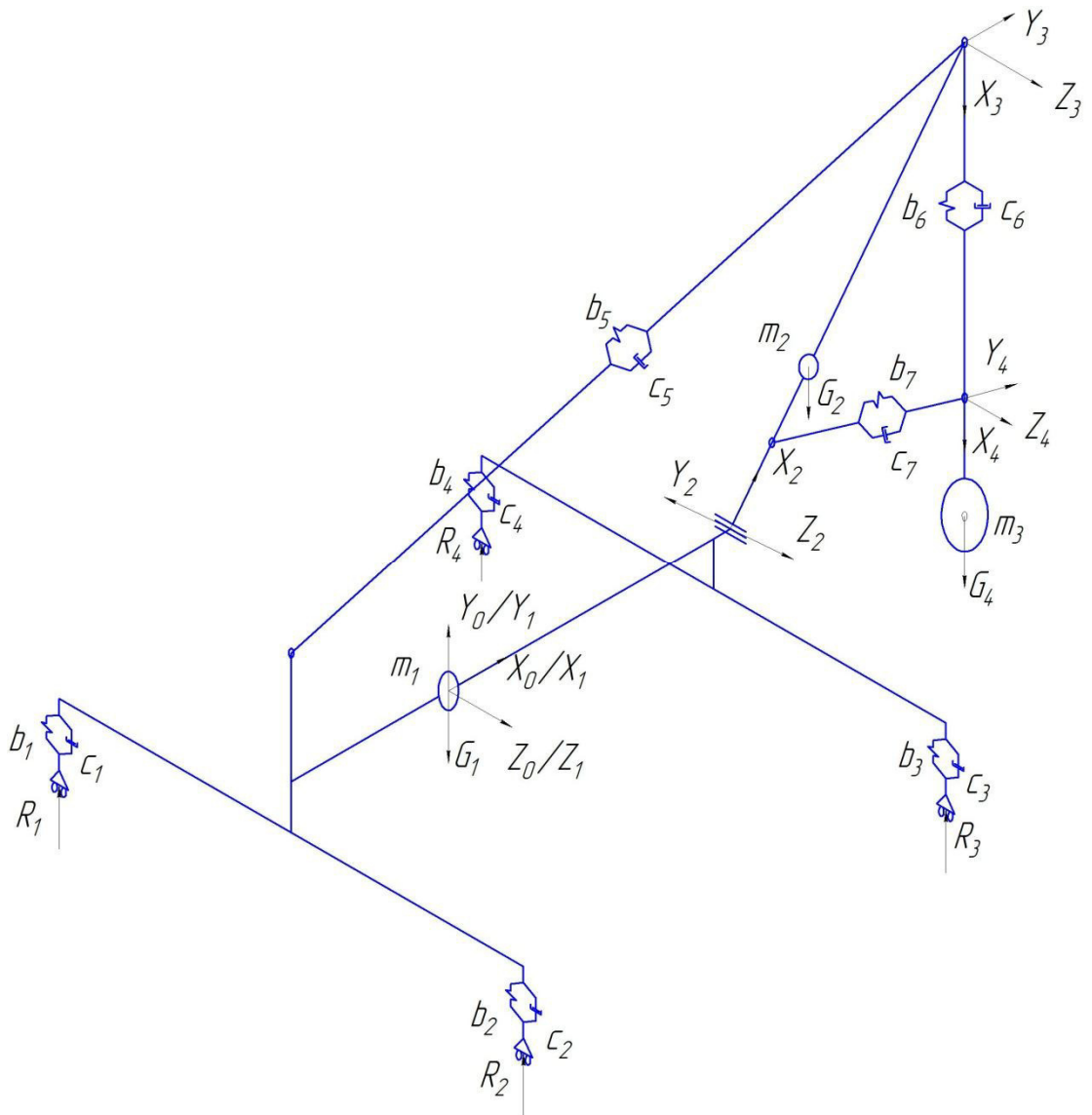


Рисунок 3.2 – Расчетная схема крана-трубоукладчика

При составлении пространственной обобщённой расчетной схемы, на основании анализа конструкций и условий работы КТ, были приняты следующие допущения [86]:

1. КТ является голономной и стационарной системой.
2. КТ представляет собой шарнирно-сочлененный многосвязный, с наложенными на него упругими и динамическими связями.
3. Внешние силы, действующие на КТ, являются сосредоточенными.
4. Люфты и силы сухого трения в шарнирах отсутствуют.
5. Колебания элементов КТ малы.

На Рисунок 3.2 показана пространственная обобщённая расчетная схема КТ, где m_1 – масса базовой машины, m_2 – масса стрелы, m_3 – масса груза.

Новизной расчетной схемы является реализация в ней инженерного решения, «уравновешивающий канат» [45]. Главное отличие заключается в том, что уравновешивающий канат представлен в виде шарнирно закрепленного на стреле тела Фохте, соединенным с грузовым канатом при помощи гибкой нити, связи. Что позволяет реалистично отобразить свойства инженерного решения.

3.3 Выбор и обоснование системы отсчета и обобщенных координат для математического описания крана-трубоукладчика

Для написания дифференциальных уравнений движения КТ, необходимо задать системы координат. На данный момент наибольшее распространение получили прямоугольные сферические и цилиндрические системы координат. В данной работе, использовалась прямоугольная система координат. Такой выбор системы координат обусловлен тем, что геометрические параметры КТ и его элементов заданы в прямоугольной системе координат [86].

Для описания положения КТ в пространстве целесообразно использовать метод однородных координат. Основное преимущество, которого состоит в том, что данный метод позволяет проводить операцию преобразования системы координат в одно матричное умножение [86].

За инерциальную систему координат примем $O_0X_0Y_0Z_0$ с началом в точке O_0 , совпадающей с центром масс базового трактора, в исходном положении. Z_0 – ось, направлена по ходу движения КТ, X_0 – ось, направленная перпендикулярно Z_0 , в сторону стрелы, Y_0 – ось, направленная вертикально вверх [86].

Для оценки вертикального смещения базовой машины была введена локальная система координат $O_1X_1Y_1Z_1$, оси которой сонаправлены и параллельны осям инерциальной системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$. Оси X_1 и Z_1 вместе образуют горизонтальную плоскость $O_1X_1Z_1$ от которой идет расчет высоты вертикального смещения КТ, вследствие преодоления им неровностей

микрорельефа. Система координат $O_1X_1Y_1Z_1$ жестко связана с базовой машиной и является подвижной относительно инерциальной системы координат [86].

Положение в пространстве второго звена КТ, стрелы определяется локальными системами координат $O_2X_2Y_2Z_2$ и $O_3X_3Y_3Z_3$, жестко связанными со стрелой. Начало координат O_2 находится в точке крепления стрелы в одной вертикальной плоскости с центром масс базовой машины, стрелы и трубы обозначим эту плоскость как $m_1m_2m_3$. Z_2 – ось, направленная параллельно оси Z_1 и направленная по ходу движения КТ, X_2 – ось, направленная от точки крепления стрелы к оголовку стрелы, Y_2 – ось, направлена перпендикулярно оси X_2 , вверх, принадлежит плоскости $m_1m_2m_3$. Начало координат O_3 находится на оголовке стрелы в плоскости $m_1m_2m_3$, как и сама стрела. Z_3 – ось, параллельна оси Z_1 и совпадает с ней по направлению, Y_3 – ось, направленная вертикально вверх, X_3 – ось, третья ось правой ортогональной системы координат $O_3X_3Y_3Z_3$.

Положение в пространстве груза определяется в локальной системе координат $O_4X_4Y_4Z_4$. Начало координат O_4 находится в точке крепления УК с грузовым канатом. X_4 – ось, направленная позвену вниз, аналогично оси X_3 . Y_4 направлена перпендикулярно X_4 , принадлежит $m_1m_2m_3$. Z_4 – ось, третья ось правой ортогональной системы координат $O_4X_4Y_4Z_4$.

Введенные системы координат позволяют в полной мере проследить перемещение КТ его элементов и груза в пространстве.

Были введены следующие обобщенные координаты, обозначение которых представлено в таблице 3.1, где также представлено соответствие между параметрами переноса осей и обобщенными координатами.

Демпфирование воздействия микрорельефа на ходовое оборудование, канаты, представлены в виде упругих тел Фохта. Каждое тело характеризуется коэффициентами жесткости и вязкости c_1, \dots, c_7 и b_1, \dots, b_7 соответственно [86].

Каждое звено динамической системы КТ, обладающее массой, имеет инерционные характеристики: собственные моменты инерции J_{ix} , J_{iy} , J_{iz} и центробежные моменты инерции J_{ixy} , J_{ixz} , J_{izy} относительно локальных систем координат [83].

Центры масс звеньев, а также их инерционные характеристики находились при помощи специализированных программных продуктов, таких как Solid Works и Компас - V13.

Таблица 3.1 - Соответствие между обобщенными координатами и параметрами переноса координатных осей

Перемещение	Обозначение	Обобщенная координата	Характер координаты
1. Поступательное перемещение центра масс базовой машины вдоль оси O_0Z_0	z_1	q_1	Управляемая
2. Поступательное перемещение центра масс базовой машины вдоль оси O_0Y_0	y_1	q_2	Неуправляемая
3. Поворот базовой машины вокруг оси O_1Z_1 (крен)	α_1	q_3	Неуправляемая
4. Поворот базовой машины вокруг оси O_1X_1 (тангаж)	β_1	q_4	Неуправляемая
5. Поворот стрелы КТ вокруг оси O_2Z_2	α_2	q_5	Неуправляемая
6. Поворот грузового каната вокруг оси O_3Z_3	α_3	q_6	Неуправляемая
7. Поворот грузового каната вокруг оси O_3Y_3	θ_3	q_7	Неуправляемая
8. Поворот груза вокруг оси O_4Z_4	α_4	q_8	Неуправляемая
9. Поворот груза вокруг оси O_3Y_3	θ_4	q_9	Неуправляемая

Опорные реакции грунта на базовую машину представлены сосредоточенными силами R_1, R_2, R_3, R_4 (рисунок 3.2), приложенными в крайних точках соприкосновения элементов ходового оборудования с грунтом и направлены вертикально вверх [86].

3.4. Уравнения кинематики звеньев динамической системы крана-трубоукладчика

Для описания кинематики звеньев пространственной расчетной схемы КТ также был использован метод однородных координат [83, 94, 5, 23, 26, 28, 29, 38, 53, 62, 79, 84, 88].

Согласно данному методу любая точка локальной системы координат $O_i X_i Y_i Z_i$, заданная вектором R_i , может быть представлена в инерциальной системе координат $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ вектором формула (3.1) [85, 56]:

$$R_{0i} = T_i \cdot R_i, \quad (3.1)$$

где: T_i – матрица перехода из i – ой локальной системы координат в инерциальную.

$$T_i = A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_i, \quad (3.2)$$

где A_i – матрица перехода из i -ой локальной системы координат в $i-1$.

Матрица перехода от системы координат базовой машины $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ к неподвижной инерциальной системе координат $O_0 X_0 Y_0 Z_0$, имеет вид:

$$A_{1,0} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1}; \quad (3.3)$$

$$A_{X,\beta_1} = \begin{bmatrix} \cos\beta_1 & 0 & \sin\beta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta_1 & 0 & \cos\beta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.4)$$

$$A_{Z,\alpha_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_1 & -\sin\alpha_1 & 0 \\ 0 & \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.5)$$

$$A_{Y_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & q_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.6)$$

$$A_{Z_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.7)$$

$$A_{1,0} = \begin{bmatrix} \cos\beta_1 + \sin\beta_1 & \sin\alpha_1 \cdot \sin\beta_1 & \cos\alpha_1 \cdot \sin\beta_1 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_1 & -\sin\alpha_1 & q_2 \\ \cos\beta_1 - \sin\beta_1 & \cos\beta_1 \cdot \sin\alpha_1 & \cos\alpha_1 \cdot \cos\beta_1 & q_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

где: A_{Y_1} - матрица переноса базовой машины вдоль оси O_1Y_1 на расстояние q_2 ;

A_{Z_1} - матрица переноса базовой машины вдоль оси O_1Z_1 на расстояние q_1 ;

A_{X,β_1} - матрица поворота базовой машины вокруг оси O_1X_1 на угол β_1 ;

A_{Z,α_1} - матрица поворота базовой машины вокруг оси O_1Z_1 на угол α_1 .

Переход от системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$, относящейся к стреле КТ, к системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ базовой машины будет осуществляться за счет переноса вдоль оси O_1X_1 на постоянную величину x_1 , которая определяется исходя из размеров КТ, и поворота вокруг оси O_2Z_2 на угол α_2 . Матрица перехода будет иметь вид:

$$A_{2,1} = A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2}; \quad (3.9)$$

$$A_{X_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.10)$$

$$A_{Z,\alpha_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_2 & -\sin\alpha_2 & 0 \\ 0 & \sin\alpha_2 & \cos\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.11)$$

$$A_{2,1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_2 \\ 0 & \cos\alpha_2 & -\sin\alpha_2 & 0 \\ 0 & \sin\alpha_2 & \cos\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Тогда матрица перехода из системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$ в инерциальную будет иметь вид:

$$A_{2,0} = A_{1,0} \cdot A_{2,1}; \quad (3.13)$$

$$A_{2,0} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \begin{array}{c} \cos(\beta_1) + \\ \sin(\beta_1) + \\ \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1) \end{array} & \begin{array}{c} \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \\ \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1) \end{array} & \begin{array}{c} \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\beta_1) - \\ \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_2) \end{array} & \begin{array}{c} x_2 \cdot (\cos(\beta_1) + \\ \sin(\beta_1)) \end{array} \\ \hline -\sin(\alpha_1) & \begin{array}{c} \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) - \\ \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) \end{array} & \begin{array}{c} -\cos(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) - \\ \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) \end{array} & q_2 \\ \hline \begin{array}{c} \cos(\beta_1) - \sin(\beta_1) \\ + \\ \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1) \end{array} & \begin{array}{c} \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \\ \cos(\beta_1) \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) \end{array} & \begin{array}{c} \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\alpha_2) - \\ \cos(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) \end{array} & \begin{array}{c} q_1 + x_2 \cdot \\ (\cos(\beta_1) - \\ \sin(\beta_1)) \end{array} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}. \quad (3.14)$$

Переход от системы координат $O_3X_3Y_3Z_3$, относящейся к оголовку стрелы, к системе координат стрелы $O_2X_2Y_2Z_2$ будет иметь вид:

$$A_{3,2} = A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3}. \quad (3.15)$$

Матрицы $A_{Y,\theta_3}, A_{Z,\alpha_3}$ учитывают поворот груза вокруг соответствующих осей O_3Y_3, O_3Z_3 , (поворот грузового каната вокруг оси O_3X_3 , его закручивание, не учитывается) A_{X_3} - перенос вдоль оси O_3X_3 . Матрицы, входящие в формулу (3.15), имеют вид:

$$A_{Y,\theta_3} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.16)$$

$$A_{Z,\alpha_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_3 & -\sin \alpha_3 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.17)$$

$$A_{x_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.18)$$

$$A_{3,2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\cos \alpha_3 \cdot \sin \theta_3 & \sin \alpha_3 \cdot \sin \theta_3 & x_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \alpha_3 \cdot \cos \theta_3 & -\sin \alpha_3 \cdot \cos \theta_3 & 0 \\ 1 & \sin \alpha_3 & \cos \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

В таком случаи матрица перехода от системы координат $O_3X_3Y_3Z_3$ к $O_0X_0Y_0Z_0$ будет иметь вид:

$$A_{3,0} = A_{2,0} \cdot A_{3,2}; \quad (3.20)$$

$$A_{3,0} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \begin{array}{l} \cos(\theta_3) \cdot (\cos(\beta_1) + \\ + \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1)) + \\ + \sin(\theta_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\beta_1)) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \\ \cdot \sin(\beta_1) - \sin(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \sin(\beta_1) \end{array} & \begin{array}{l} \sin(\alpha_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\beta_1) - \\ - \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \\ \cdot \sin(\beta_1)) + \\ + \cos(\alpha_3) \cdot (\cos(\theta_3) \cdot \\ \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \\ \cdot \sin(\beta_1) + \cos(\alpha_2) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1)) - \\ - \sin(\theta_3) \cdot (\cos(\beta_1) + \\ \cdot \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1))) \end{array} & \begin{array}{l} \cos(\alpha_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\beta_1) - \\ - \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \\ \cdot \sin(\beta_1)) - \sin(\alpha_3) \cdot \\ \cdot (\cos(\theta_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2) \cdot \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\beta_1)) - \sin(\theta_3) \cdot \\ \cdot (\cos(\beta_1) + \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1))) \end{array} & \begin{array}{l} x_3 \cdot (\cos(\beta_1) \\ + \sin(\beta_1) + \\ \cos(\alpha_1) \\ \cdot \sin(\beta_1)) + \\ x_2 \cdot (\cos(\beta_1) \\ + \sin(\beta_1)) \end{array} \\ \hline \begin{array}{l} - \sin(\alpha_1) \cdot \cos(\theta_3) - \\ - \sin(\theta_3) \cdot (\sin(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2) - \cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \cos(\alpha_2)) - \\ - \cos(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) - \\ - \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1) \end{array} & \begin{array}{l} \cos(\alpha_3) \cdot (\sin(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\theta_3) - \cos(\theta_3) \cdot \\ \cdot (\sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) - \\ - \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2))) - \\ - \sin(\alpha_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2) + \\ + \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1)) \end{array} & \begin{array}{l} - \sin(\alpha_3) \cdot (\sin(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\theta_3) - \cos(\theta_3) \cdot \\ \cdot (\sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) - \\ - \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2))) - \\ - \cos(\alpha_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2) + \\ + \cos(\alpha_2) \cdot \sin(\alpha_1)) \end{array} & \begin{array}{l} q_2 - \\ -x_3 \cdot \sin(\alpha_1) \end{array} \\ \hline \begin{array}{l} \sin(\theta_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \cos(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_2) + \\ + \cos(\alpha_2) \cdot \cos(\beta_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_1)) + \cos(\theta_3) \cdot \\ \cdot (\cos(\beta_1) - \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1)) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \\ \cdot \cos(\beta_1) - \cos(\beta_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\alpha_2) \end{array} & \begin{array}{l} \sin(\alpha_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \cos(\beta_1) - \\ - \cos(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2)) + \cos(\alpha_3) \cdot \\ \cdot (\cos(\theta_3) \cdot \\ \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_2) \cdot \\ \cdot \cos(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_1)) - \\ - \sin(\theta_3) \cdot (\cos(\beta_1) - \\ - \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1))) \end{array} & \begin{array}{l} \cos(\alpha_3) \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \cos(\beta_1) - \\ - \cos(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2)) - \\ - \sin(\alpha_3) \cdot (\cos(\theta_3) \cdot \\ \cdot (\cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1) \cdot \\ \cdot \sin(\alpha_2) + \cos(\alpha_2) \cdot \\ \cdot \cos(\beta_1) \cdot \sin(\alpha_1)) - \\ - \sin(\theta_3) \cdot (\cos(\beta_1) - \\ - \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1))) \end{array} & \begin{array}{l} q_1 + x_3 \cdot \\ (\cos(\beta_1) - \\ \sin(\beta_1) + \\ + \cos(\alpha_1) \cdot \\ \cdot \cos(\beta_1)) + \\ x_2 \cdot (\cos(\beta_1) \\ - \sin(\beta_1)) \end{array} \\ \hline \begin{array}{c} 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \end{array} \\ \hline \end{array} \quad (3.21)$$

Переход от системы координат $O_3X_3Y_3Z_3$, относящейся к грузовому канату, к системе координат груза $O_4X_4Y_4Z_4$ будет иметь вид:

$$A_{4,3} = A_{X_4} \cdot A_{Y,\theta_4} \cdot A_{Z,\alpha_4}. \quad (3.22)$$

Матрицы $A_{Y,\theta_4}, A_{Z,\alpha_4}$ учитывают поворот груза вокруг соответствующих осей O_4Y_4, O_4Z_4 , (поворот груза вокруг оси O_4X_4 , его закручивание, не учитывается) A_{X_4} - перенос вдоль оси O_4X_4 на величину x_2 . Матрицы, входящие в уравнение (3.22), имеют вид:

$$A_{Y,\theta_4} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & 0 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.23)$$

$$A_{Z,\alpha_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_4 & -\sin \alpha_4 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_4 & \cos \alpha_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.24)$$

$$A_{X_4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.25)$$

Что бы получить скорости характерных точек нам нужно продифференцировать полученные матрицы, согласно методике изложенной во главе. 2.

Матрица скорости прямолинейного перемещения точки базовой машины по оси O_1Y_1 , относительно инерциальной системы координат будет иметь вид:

$$U_{1,0,Y} = E_Y \cdot A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1}, \quad (3.29)$$

где: E_Y - дифференцирующая матрица по координате y .

Рассмотрим матрицы скоростей по оставшимся степеням свободы:

$$U_{1,0,Z} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot E_Z \cdot A_{Z,\alpha_1}; \quad (3.30)$$

$$U_{1,0,X\beta} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot E_{\beta} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1}; \quad (3.31)$$

$$U_{1,0,Z,\alpha} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot E_{\alpha} \cdot A_{Z,\alpha_1}, \quad (3.32)$$

где: $U_{1,0,Z}$ - матрица скорости прямолинейного перемещения произвольной точки базовой машины по оси O_1Z_1 ;

$U_{1,0,X\beta}$ - матрица скорости изменения угла поворота базовой машины вокруг оси O_1X_1 ;

$U_{1,0,Z,\alpha}$ - матрица скорости изменения угла поворота базовой машины вокруг оси O_1Z_1 .

Для точки, принадлежащей стреле, матрицы скорости будут иметь вид:

$$U_{2,0,Y} = E_Y \cdot A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2}; \quad (3.33)$$

$$U_{2,0,Z} = A_{Y_1} \cdot E_Z \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2}; \quad (3.34)$$

$$U_{2,0,X\beta} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot E_\beta \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2}; \quad (3.35)$$

$$U_{2,0,Z,\alpha_1} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2}; \quad (3.36)$$

$$U_{2,0,Z,\alpha_2} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_2}, \quad (3.37)$$

где: $U_{2,0,Y}$ - матрица скорости прямолинейного перемещения произвольной точки стрелы по оси O_1Y_1 ;

$U_{2,0,Z}$ - матрица скорости прямолинейного перемещения произвольной точки стрелы по оси O_1Z_1 ;

$U_{2,0,X\beta}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки стрелы вокруг оси O_1X_1 ;

$U_{2,0,Z,\alpha_1}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки стрелы вокруг оси O_1Z_1 .

$U_{2,0,Z,\alpha_2}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки стрелы вокруг оси O_2Z_2 .

Для характерной точки грузового каната матрицы скорости будут иметь вид:

$$U_{3,0,Y} = E_Y \cdot A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3}; \quad (3.38)$$

$$U_{3,0,Z} = A_{Y_1} \cdot E_Z \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3}; \quad (3.39)$$

$$U_{3,0,X\beta} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot E_\beta \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3}; \quad (3.40)$$

$$U_{3,0,Z,\alpha_1} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3}; \quad (3.41)$$

$$U_{3,0,Z,\alpha_2} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3}; \quad (3.42)$$

$$U_{3,0,Y,\theta} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot E_\theta \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3}; \quad (3.43)$$

$$U_{3,0,Z,\alpha_3} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_3}, \quad (3.44)$$

где: $U_{3,0,Y}$ - матрица скорости прямолинейного перемещения произвольной точки грузового каната по оси O_1Y_1 ;

$U_{3,0,Z}$ - матрица скорости прямолинейного перемещения произвольной точки грузового каната по оси O_1Z_1 ;

$U_{3,0,X\beta}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки грузового каната вокруг оси O_1X_1 ;

$U_{3,0,Z,\alpha_1}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки грузового каната вокруг оси O_1Z_1 ;

$U_{3,0,Z,\alpha_2}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки грузового каната вокруг оси O_2Z_2 .

$U_{3,0,Y,\theta}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки грузового каната вокруг оси O_3Y_3 ;

$U_{3,0,Z,\alpha_3}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки грузового каната вокруг оси O_3Z_3 .

Матрицы скорости, для произвольной точки груза будут иметь вид:

$$U_{4,0,Y} = E_Y \cdot A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3} \cdot A_{4,3}; \quad (3.45)$$

$$U_{4,0,Z} = A_{Y_1} \cdot E_Z \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3} \cdot A_{4,3}; \quad (3.46)$$

$$U_{4,0,X\beta} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot E_\beta \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3} \cdot A_{4,3}; \quad (3.47)$$

$$U_{4,0,Z,\alpha_1} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3} \cdot A_{4,3}; \quad (3.48)$$

$$U_{4,0,Z,\alpha_2} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3} \cdot A_{4,3}; \quad (3.49)$$

$$U_{4,0,Y,\theta_3} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot E_\theta \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3} \cdot A_{4,3}; \quad (3.50)$$

$$U_{4,0,X,\alpha_3} = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_3} \cdot A_{4,3}; \quad (3.51)$$

$$U_{4,0,X_4} = A_{3,0} \cdot E_X \cdot A_{X_4} \cdot A_{Y,\theta_4} \cdot A_{Z,\alpha_4}; \quad (3.52)$$

$$U_{4,0,\theta_4} = A_{3,0} \cdot A_{X_4} \cdot E_\theta \cdot A_{Y,\theta_4} \cdot A_{Z,\alpha_4}; \quad (3.53)$$

$$U_{4,0,\alpha_4} = A_{3,0} \cdot A_{X_4} \cdot A_{Y,\theta_4} \cdot E_\alpha \cdot A_{Z,\alpha_4}; \quad (3.54)$$

где: $U_{4,0,Y}$ - матрица скорости прямолинейного перемещения произвольной точки груза по оси O_1Y_1 ;

$U_{4,0,Z}$ - матрица скорости прямолинейного перемещения произвольной точки груза по оси O_1Z_1 ;

$U_{4,0,X\beta}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки груза вокруг оси O_1X_1 ;

$U_{4,0,Z,\alpha 1}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки груза вокруг оси O_1Z_1 ;

$U_{4,0,Z,\alpha 2}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки груза вокруг оси O_2Z_2 .

$U_{4,0,Y,\theta 3}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки груза вокруг оси O_3Y_3 ;

$U_{4,0,X,\alpha 3}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки груза вокруг оси O_3X_3 .

$U_{4,0,X,4}$ - матрица скорости прямолинейного перемещения произвольной точки груза по оси O_4X_4 ;

$U_{4,0,Y,\theta 4}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки груза вокруг оси O_4Y_4 ;

$U_{4,0,X,\alpha 4}$ - матрица скорости изменения угла поворота произвольной точки груза вокруг оси O_4X_4 .

Пользуясь полученными матрицами, можно определить положение и скорость характерных точек звеньев в любой момент времени, как в локальной, так и в инерциальной системах координат [83,86].

3.5 Уравнение кинематики упруго-вязких элементов

Для описания кинематики упруго-вязких элементов, при помощи однородных координат, требуется рассмотреть минимум три вектора (рисунок 3.3)[24,27,52,62,91, 86].

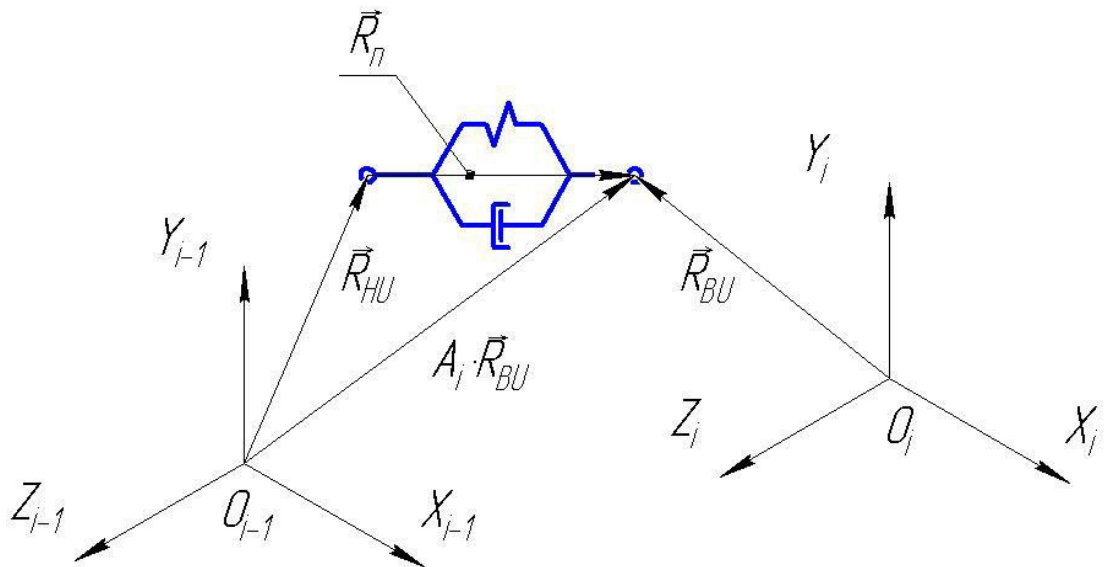


Рисунок 3.3 – Векторы определяющие положение упруго вязкого элемента

Предположим, что тело Фохте соединяет два звена, i и $i-1$. Вектор R_{BU} определяет положение шарнира, принадлежащего звену i , в локальной системе координат данного звена. Вектор R_{HU} соответственно определяет положение шарнира принадлежащего звену $i-1$. В таком случае, что бы найти вектор R_{Π} , соединяющий концы упруго-вязкого элемента, нужно перевести вектор R_{BU} в систему координат $i-1$ звена, тогда формула определения вектора R_{Π} будет иметь вид:

$$\vec{R}_{\Pi} = A_i \cdot \vec{R}_{BU} - \vec{R}_{HU}, \quad (3.55)$$

где: A_i матрица перехода из системы координат i в $i-1$.

Рассмотрим тела Фохта, принадлежащие базовой машине. Введем обозначение матрицы перехода Γ_u из системы координат $i-1$ звена в систему координат i . Тогда матрица перехода вектора R из системы первого звена, базовой машины, в инерциальную систему координат будет иметь вид [86]:

$$\Gamma_1 = A_{1,0}; \quad (3.56)$$

$$\Gamma_1 = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1}. \quad (3.57)$$

Матрица перехода Γ в инерциальную систему координат для тела Фохте, учитывающего перемещения стрелового каната, будет иметь вид:

$$\Gamma_2 = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2}. \quad (3.58)$$

Матрица перехода для тела Фохте, учитывающего перемещения грузового каната, будет иметь вид:

$$\Gamma_3 = A_{Y_1} \cdot A_{Z_1} \cdot A_{X,\beta_1} \cdot A_{Z,\alpha_1} \cdot A_{X_2} \cdot A_{Z,\alpha_2} \cdot A_{X_3} \cdot A_{Y,\theta_3} \cdot A_{Z,\alpha_3}. \quad (3.59)$$

Учитывая, что тело Фохте, реализующее упруго-вязкие свойства уравновешивающего каната, относится к стреле КТ, матрица перехода будет иметь вид, формула (3.58).

В линеаризованной форме вектор перемещения и скорости точки условно подвижной части упруго вязкого элемента имеет вид [27, 83, 86]:

$$\vec{R}_u = \sum_{j=1}^{\ell} M_{uj} \cdot q_j \cdot \vec{R}_{BU}; \quad (3.60)$$

$$M_{uj} = \frac{\partial \Gamma_u}{\partial q_j}; \quad (3.61)$$

$$\vec{\dot{R}}_u = \frac{d\vec{R}_u}{dt} = \sum_{j=1}^{\ell} M_{uj} \cdot \frac{dq_j}{dt} \cdot \vec{R}_{BU}. \quad (3.62)$$

Учитывая уравнения (3.60)-(3.62) скорости равны:

$$W_{uj} = \sum_{j=1}^{\ell} M_{uj} \cdot \frac{dq_j}{dt}. \quad (3.63)$$

Матрицы M_{uj} для тел Фохте, принадлежащих базовой машине, будут иметь вид:

$$M_{1,Y} = U_{1,0,Y}; \quad (3.64)$$

$$M_{1,Z} = U_{1,0,Z}; \quad (3.65)$$

$$M_{1,X\beta} = U_{1,0,X\beta}; \quad (3.66)$$

$$M_{1,Z,\alpha} = U_{1,0,Z,\alpha}. \quad (3.67)$$

Матрицы M_{uj} для тела Фохте, учитывающего перемещение стрелового каната, а также для тела Фохта, учитывающего упруго-вязкие свойства уравновешивающего каната будут иметь вид:

$$M_{2,Y} = U_{2,0,Y}; \quad (3.68)$$

$$M_{2,Z} = U_{2,0,Z}; \quad (3.69)$$

$$M_{2,X\beta} = U_{2,0,X\beta}; \quad (3.70)$$

$$M_{2,Z,\alpha 1} = U_{2,0,Z,\alpha 1}; \quad (3.71)$$

$$M_{2,Z,\alpha 2} = U_{2,0,Z,\alpha 2}. \quad (3.72)$$

Матрицы M_{ij} для тела Фохте, учитывающего перемещение грузовго каната, будут иметь вид:

$$M_{3,Y} = U_{3,0,Y}; \quad (3.73)$$

$$M_{3,Z} = U_{3,0,Z}; \quad (3.74)$$

$$M_{3,X\beta} = U_{3,0,X\beta}; \quad (3.75)$$

$$M_{3,Z,\alpha 1} = U_{3,0,Z,\alpha 1}; \quad (3.76)$$

$$M_{3,Z,\alpha 2} = U_{3,0,Z,\alpha 2}; \quad (3.77)$$

$$M_{3,Y,\theta} = U_{3,0,Y,\theta}; \quad (3.78)$$

$$M_{3,Z,\alpha 3} = U_{3,0,Z,\alpha 3}. \quad (3.79)$$

Пользуясь полученными матрицами, можно определить положение и скорость подвижных концов упруго-вязких элементов в произвольный момент времени [86].

3.6. Уравнения динамики системы крана-трубоукладчика

Зная положение и скорость произвольной точки каждого звена КТ мы можем перейти к синтезу его динамической модели. В данной работе применен метод уравнений Лагранжа второго рода [24, 27, 52, 62, 91]. Каждое из уравнений Лагранжа второго рода для голономной системы с числом степеней свободы, равным l , которым соответствуют обобщенные координаты q_j ($j=1, \dots, l$), будет иметь вид [16, 24, 25, 27, 37, 52, 54, 62, 91, 86]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = F_j, \quad (3.80)$$

где t – время; q_j – обобщенная координата; K – кинетическая энергия; P – потенциальная энергия; Φ – диссипативная функция; \dot{q}_j – обобщенная скорость; F_j – обобщенная сила, действующая по обобщенной координате.

В векторно-матричной форме система дифференциальных уравнений будет иметь вид [87]:

$$A \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + C \cdot \vec{q} = \vec{F}, \quad (3.81)$$

где A , B , C – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений (A – матрица инерционных коэффициентов, B – матрица коэффициентов демпфирования, C – матрица коэффициентов жесткости); $\ddot{\vec{q}}$, $\dot{\vec{q}}$, \vec{q} – векторы соответственно ускорения, скорости и обобщенных координат; \vec{F} – вектор внешних сил, действующих по

обобщенным координатам. Кинетическую энергию K определим, как сумму кинетических энергий звеньев, входящих в механическую систему кран-трубоукладчик [27, 87, 86]:

$$K = \sum_{i=1}^k K_i . \quad (3.82)$$

Звенья КТ представлены как совокупность элементарных элементов с массами dm . Положение центра масс элемента описывается вектором R_i , заданным в локальной системе координат i -го звена. Кинетическая энергия в данном случае будет равна [27, 87, 86]:

$$dK_i = \frac{1}{2} \left| \vec{R}_{0i} \right|^2 dm . \quad (3.83)$$

Квадрат модуля вектора изменения положения i -й точки в инерциальной системе координат определится как «трасса», то есть сумма диагональных элементов, матрицы размером 4x4 [27, 87, 86]:

$$\left| \vec{R}_{oi} \right|^2 = tr \left[\vec{R}_{oi} \cdot \vec{R}_{oi}^T \right]; \quad (3.84)$$

$$\vec{R}_{oi} = \left[X_{oi} \quad Y_{oi} \quad Z_{oi} \quad 1 \right]^T \quad (3.85)$$

$$\vec{R}_{oi}^T = \left[X_{oi} \quad Y_{oi} \quad Z_{oi} \quad 1 \right]. \quad (3.86)$$

Учитывая, что в линеаризованном виде

$$\vec{R}_{oi} = \sum_{j=1}^{\ell} U_{ij} \cdot \dot{q}_j \cdot \vec{R}_i. \quad (3.87)$$

С учетом правил перемножения сцепленных матриц получим [27, 87, 86]:

$$dK_i = \frac{1}{2} \cdot tr \left[\sum_{j=1}^{\ell} (U_{ij} \cdot \dot{q}_j) \cdot \vec{R}_i \cdot \vec{R}_i^T \cdot \sum_{j=1}^{\ell} (U_{ij}^T \cdot \dot{q}_j) \right] \cdot dm. \quad (3.88)$$

Полная кинетическая энергия звена может быть получена интегрированием энергий всех элементарных элементов звена [27, 87, 86]:

$$K_i = \frac{1}{2} \cdot tr \left[\sum_{j=1}^{\ell} (U_{ij} \cdot \dot{q}_j) \cdot \left[\int_m \vec{R}_i \cdot \vec{R}_i^T \cdot dm \right] \cdot \sum_{j=1}^{\ell} (U_{ij}^T \cdot \dot{q}_j) \right]. \quad (3.89)$$

Интегральный член в скобках представляет собой матрицу инерции, введем обозначение матрицы инерции H_i [27, 87, 86]:

$$H_i = \int_{(m)} \vec{R}_i \vec{R}_i^T dm; \quad (3.90)$$

$$H_i = \begin{bmatrix} \int_{(m)} x_i^2 dm & \int_{(m)} x_i y_i dm & \int_{(m)} x_i z_i dm & \int_{(m)} x_i dm \\ \int_{(m)} x_i y_i dm & \int_{(m)} y_i^2 dm & \int_{(m)} y_i z_i dm & \int_{(m)} y_i dm \\ \int_{(m)} x_i z_i dm & \int_{(m)} y_i z_i dm & \int_{(m)} z_i^2 dm & \int_{(m)} z_i dm \\ \int_{(m)} x_i dm & \int_{(m)} y_i dm & \int_{(m)} z_i dm & m_i \end{bmatrix}; \quad (3.91)$$

$$H_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-J_{ix} + J_{iy} + J_{iz}) & J_{ixy} & J_{ixz} & X_{imi} \\ J_{ixy} & \frac{1}{2}(J_{ix} - J_{iy} + J_{iz}) & J_{iyz} & Y_{imi} \\ J_{ixz} & J_{iyz} & \frac{1}{2}(J_{ix} + J_{iy} - J_{iz}) & Z_{imi} \\ X_{imi} & Y_{imi} & Z_{imi} & m_i \end{bmatrix}; \quad (3.92)$$

$$H_i = m_i \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(-\rho_{ix}^2 + \rho_{iy}^2 + \rho_{iz}^2) & \rho_{ixy}^2 & \rho_{ixz}^2 & X_i \\ \rho_{ixy}^2 & \frac{1}{2}(\rho_{ix}^2 - \rho_{iy}^2 + \rho_{iz}^2) & \rho_{iyz}^2 & Y_i \\ \rho_{ixz}^2 & \rho_{iyz}^2 & \frac{1}{2}(\rho_{ix}^2 + \rho_{iy}^2 - \rho_{iz}^2) & Z_i \\ X_i & Y_i & Z_i & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.93)$$

где J_{ix} , J_{iy} , J_{iz} – моменты инерции; J_{ixy} , J_{ixz} , J_{iyz} – центробежные моменты инерции; ρ_{ix} , ρ_{iy} , ρ_{iz} – радиусы инерции звена; ρ_{ixy} , ρ_{ixz} , ρ_{iyz} – центробежные радиусы инерции; X_i , Y_i , Z_i – координаты центров масс i -го звена; m_i – масса i -го звена.

Для совокупности звеньев динамической системы КТ полная кинетическая энергия системы будет иметь вид [27, 87, 86]:

$$K = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} \cdot tr \left[\sum_{j=1}^{\ell} U_{ij} \cdot H_i \cdot U_{ij}^T \cdot q_j'^2 \right]. \quad (3.94)$$

Для подстановки в дифференциальное уравнение Лагранжа второго рода продифференцируем выражение (3.94):

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial K}{\partial q_j'} \right] = \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{i=1}^k tr \left[U_{ij} H_i U_{ij}^T \right] q_j''. \quad (3.95)$$

Потенциальная энергия КТ определяется как сумма потенциальных энергий отдельных звеньев КТ в поле тяготения P_g и потенциальных энергий упругих элементов P_y [27, 87, 86]:

$$P = P_y + P_g. \quad (3.96)$$

Потенциальная энергия звеньев КТ в поле тяготения P_g определится как сумма потенциальных энергий в поле тяготения всех звеньев КТ, имеющих массу m_i [27, 87, 86]:

$$P_g = \sum_{i=1}^k m_i g \vec{G}^T T_i \vec{R}_i, \quad (3.97)$$

где g – ускорение свободного падения; G – вектор направления сил тяжести звеньев в инерциальной системе координат (направление данного вектора определяется углами наклона опорной поверхности в продольном и боковом направлениях относительно горизонтальной плоскости) [86].

$$\vec{G}^T = [X_G \quad Y_G \quad Z_G \quad 1]. \quad (3.98)$$

Для КТ, находящегося на горизонтальной опорной поверхности:

$$\vec{G}^T = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 1]. \quad (3.99)$$

Определение потенциальной энергии упруго-вязких элементов КТ осуществляется на основе уравнения Клайперона [27, 87, 86]:

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n C_u \lambda_u^2, \quad (3.100)$$

где C_u – коэффициент упругости u -го упруго-вязкого элемента; λ_u – деформация u -го упругого элемента.

Деформация упруго-вязких элементов – тел Фохта для случая малых перемещений, определится как модуль вектора малого перемещения характерных точек подвижных концов упруговязких элементов в инерционной системе координат [27, 87, 86]:

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n C_u |\vec{R}_u|^2. \quad (3.101)$$

С учетом вышеизложенного

$$P_y = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n \text{tr} [F_u N_u F_u^T]; \quad (3.102)$$

$$F_u = \sum_{u=1}^n M_{uj} \cdot q_j; \quad (3.103)$$

$$N_u = C_u \cdot [\vec{R}_{BU} \cdot \vec{R}_{BU}^T], \quad (3.104)$$

где R_{BU} – вектор подвижного конца упруго-вязкого элемента в локальной системе координат подвижного конца; N_u – матрица упругости размером 4x4.

Выражение полной потенциальной энергии звеньев динамической системы КТ будет иметь вид [27, 87, 86]:

$$P = \sum_{i=1}^k m_i \mathbf{g} G^T T_i \vec{R}_i + \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n \text{tr} [F_u N_u F_u^T]. \quad (3.105)$$

Продифференцировав выражение потенциальной энергии для подстановки в уравнение Лагранжа, получим [27, 87, 86]:

$$\frac{\partial P}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^k m_i \mathbf{g} G^T U_{ij} \vec{R}_i + \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{u=1}^n \text{tr} [M_{uj} N_u M_{uj}^T] \dot{q}_j. \quad (3.106)$$

Диссипативная составляющая в уравнении Лагранжа для системы звеньев КТ представлена функцией Релея [27, 87, 86]:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n b_u \dot{\lambda}_u^2; \quad (3.107)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^n b_u \left| \vec{R}_u \right|^2, \quad (3.108)$$

где b_u – приведенный коэффициент вязкого трения u -го элемента; $\dot{\lambda}_u$ – скорость деформации u -го элемента.

Продифференцировав выражение диссипативной функции, получим [27, 87, 86]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr} [M_{uj} B_u M_{uj}^T] \dot{q}_j; \quad (3.109)$$

$$B_u = b_u \cdot [\vec{R}_{BU} \cdot \vec{R}_{BU}^T]. \quad (3.110)$$

Обобщенные внешние силы, стоящие в правой части системы уравнений Лагранжа, будут определяться по формуле [27, 87, 86]:

$$F_j = \sum_{r=1}^m \vec{F}_r \frac{\partial \vec{R}_{or}}{\partial q_j}; \quad (3.111)$$

$$F_j = \sum_{r=1}^m \vec{F}_r \cdot U_{ij} \cdot \vec{R}_{ir}, \quad (3.112)$$

где F_r – сила, приложенная к звену расчетной схемы; R_{or} – вектор координат точки приложения сил в инерциальной системе координат; R_{ir} – вектор координат точки приложения силы к звену i в локальной системе координат этого звена.

$$\vec{F}_r = [F_{rx}, F_{ry}, F_{rz}, 1]. \quad (3.113)$$

После подстановки всех слагаемых в уравнение Лагранжа получим в общем виде уравнение системы дифференциальных уравнений [27, 87, 86]:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr}[U_{ij} H_i U_{iv}^T] q_j'' + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr}[M_{uj} B_u M_{uv}^T] q_j' + \\ & + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr}[M_{uj} N_u M_{uv}^T] q_j + \sum_{i=1}^k m_i g G^T U_{iv} \vec{R}_i = \sum_{r=1}^m \vec{F}_r \cdot U_{iv} \vec{R}_{ir}. \end{aligned} \quad (3.114)$$

Систему дифференциальных уравнений можно представить в векторно-матричной форме [27, 87, 86]:

$$A\ddot{q} + B\dot{q} + Cq = \vec{F}, \quad (3.115)$$

где A, B, C – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений размером $l \times l$; \ddot{q}, \dot{q}, q – матрицы размером $l \times 1$, представляющие значения соответственно ускорений, скоростей и малых отклонений обобщенных координат; F – матрица сил размером $l \times 1$.

Элементы матриц A, B, C определяются по формулам [27, 87, 86]:

$$a_{jv} = \sum_{i=1}^k tr[U_{ij}H_iU_{iv}^T]; \quad (3.116)$$

$$b_{jv} = \sum_{u=1}^n tr[M_{uj}B_uM_{uv}^T]; \quad (3.117)$$

$$c_{jv} = \sum_{u=1}^n tr[M_{uj}N_uM_{uv}^T]. \quad (3.118)$$

Коэффициенты дифференциальных уравнений являются функциями больших значений обобщенных координат и конструктивных параметров КТ.

Результатом решения системы дифференциальных уравнений как с замороженными, так и с переменными коэффициентами, являются временные зависимости изменения обобщенных координат, отражающие изменение положения элементов КТ в пространстве [86].

Для численного решения дифференциальных уравнений движения подвижных звеньев КТ, применялся продукт MATLAB. Была использована методика составления моделей физических систем, предложенная компанией Mathwork. Согласно ей каждый блок задает только часть свойств цельной модели и не может рассматриваться отдельно от других блоков.

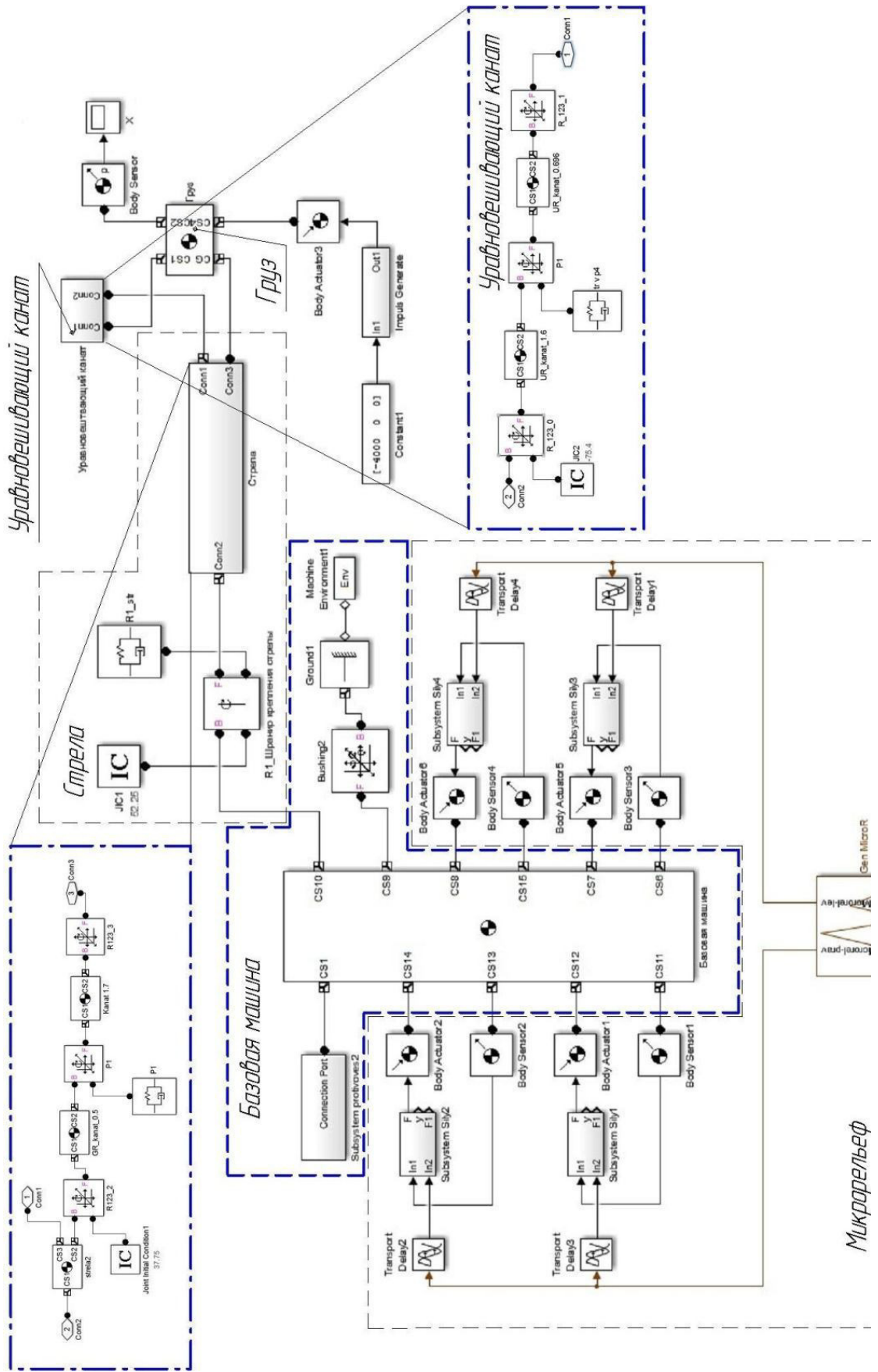


Рисунок 3.4 – Имитационная модель процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенный модернизированным рабочим оборудованием, в Matlab SimMechanics

Полученная модель (рисунок 3.4) позволяет получить любые переходные процессы, в том числе и искомое изменение положение груза в пространстве.

Для решения дифференциальных уравнений, при помощи составленной имитационной модели, использовался метод Рунге–Кутты 4 го порядка.

3.7. Математическое описание микрорельефа

Движение по неровностям рельефа приводят к изменению положения машины в пространстве, что регистрируется датчиками продольного (тангажа) и поперечного крена. Для анализа работы КТ необходима оценка влияния рельефа, по которому передвигается кран, на колебания груза на стреле.

Неровности поверхности условно можно разделить на 3 основные составляющие: макропрофиль, микропрофиль и шероховатость. Макропрофиль состоит из длинных плавных неровностей (длина волны от 100 м и более) и фактически не вызывает колебаний машины. Микропрофиль состоит из неровностей длиной от 0,1 до 100 м и вызывает существенные колебания машины. Шероховатости (длина волны менее 0,1 м) сглаживаются гусеницами и не вызывают ощутимых колебаний машины [6, 27, 68, 73, 87].

В ряде работ предшественников микрорельеф предствален как случайная функция, обладающая стационарными и эргодическими свойствами [6, 27, 68, 73, 87, 86]. Неровности микрорельефа описываются двумерной корреляционной функцией, формула (3.119) [87].

$$R(l_1, l_2) = \lim_{\substack{x \rightarrow \infty \\ y \rightarrow \infty}} \frac{1}{4xz} \int_{-x}^x \int_{-z}^z y(X, Z) \cdot y(X + l_1, Z + l_2) dX dZ. \quad (3.119)$$

В связи с трудоемкостью вычисления двумерной корреляционной функции, использование данной формулы для решение практических задач затруднительно.

В работах [87, 86] показано, что для описания микрорельефа, целесообразно, заменить двумерную функцию на две некоррелированные функции: функцию среднего значения продольного профеля и функцию угла наклона поперечного сечения поверхности. Для оценки влияния микрорельефа необходимо знать вертикальную координату микронеровности под правой и левой гусеницей КТ, формулы (3.120), (3.121) [87, 86].

$$y_l = f_1'(X, Z); \quad (3.120)$$

$$y_n = f_1'(X, Z + L_{шб}); \quad (3.121)$$

$$Z = f_2(X), \quad (3.122)$$

где $L_{шб}$ – ширина базы КТ.

При прямолинейном движении:

$$Z = K_k \cdot X, \quad (3.123)$$

где $K_k = \text{const}$ – коэффициент курса движения.

$$y_{cp} = 0,5 \cdot (y_n + y_l); \quad (3.124)$$

$$\alpha_\phi = (y_n - y_l) / L_{шб}, \quad (3.125)$$

где y_n, y_l, y_{cp} – вертикальные координаты микрорельефа соответственно по правой колее, левой колее и середине колеи; α_ϕ – угол наклона поперечного сечения поверхности, [87, 86].

Учитывая уравнения (3.124), (3.125) статические характеристики микрорельефа будут иметь вид [27, 87, 86]:

$$R_y(l) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot x} \int_{-x}^x y(X) \cdot y(X+l) dX; \quad (3.126)$$

$$R_\alpha(l) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot x} \int_{-x}^x \alpha(X) \cdot \alpha(X+l) dX. \quad (3.127)$$

Нормированная корреляционная функция имеет вид [27, 87]:

$$\rho(l) = R(l)/R(0); \quad (3.128)$$

$$R(0) = D = \sigma^2, \quad (3.129)$$

где D – дисперсия; σ – среднеквадратическое отклонение.

Для математического описания микрорельефа помимо корреляционной функции, используем так же спектральную характеристику [27, 87].

Спектральную плотность случайной функции определим с помощью преобразования Фурье корреляционной функции [27, 87].

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(l) \cdot e^{-j\omega l} dl. \quad (3.130)$$

При моделировании микропрофиля на ПК воспользуемся стохастическо-детерминированной моделью микрорельефа, где последовательность нормально распределенных чисел $x(n)$ преобразуется в последовательность чисел $y_n(n)$, коррелированную по заданному закону, со следующими параметрами:

математическое ожидание $m=0$, среднеквадратичное отклонение $\sigma=1$ [8, 25, 27, 40, 72]. При этом используются рекуррентные уравнения.

подавляющее большинство грунтовых поверхностей, по которым передвигается трубоукладочная колонна, имеют следующие корреляционные функции [8, 25, 27, 40, 72]:

$$R(t) = \sigma_k^2 \cdot e^{-\alpha_k |t|}; \quad (3.131)$$

$$R(t) = \sigma_k^2 \cdot e^{-\alpha_k |t|} \cos(\beta_k \cdot t), \quad (3.132)$$

где α_k, β_k – коэффициенты, зависящие от типа профиля; σ_k^2 – дисперсия функции микропрофиля поверхности.

Рекуррентные уравнения будут выглядеть следующим образом [8, 25, 27, 40, 72]:

$$y_n(n) = Q \cdot x(n) + a \cdot x(n-1) + q_1 \cdot y(n-1) + q_2 \cdot y(n-2); \quad (3.133)$$

$$Q = \sigma_k c = \sigma_k \sqrt{\frac{c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 4 \cdot c_0^2}}{2}}; \quad (3.134)$$

$$a = \frac{\sigma_k \cdot c_0}{c}; \quad (3.135)$$

$$q_1 = 2 \cdot \rho \cdot \cos \gamma_0; \quad (3.136)$$

$$q_2 = -\rho^2; \quad (3.137)$$

$$c_0 = \rho \cdot (\rho^2 - 1) \cdot \cos \gamma_0; \quad (3.138)$$

$$c_1 = 1 - \rho^4; \quad (3.139)$$

$$\gamma_k = \alpha_k \cdot h; \quad (3.140)$$

$$\rho = e^{-\gamma k}; \quad (3.141)$$

$$\gamma_0 = \beta_k \cdot h. \quad (3.142)$$

Выводы по главе

1. Обоснована пространственная обобщенная расчетная схема КТ, оснащенного модернизированным рабочим оборудованием, представляющая собой систему с тремя звеньями, базовая машина, стрела, груз. Механическая система КТ рассматривается в неподвижной правой ортогональной системе координат. Система имеет девять степеней свободы и соответствующие обобщенные координаты. Для математического описания КТ использовался метод однородных координат.

2. Разработана математическая модель сложной динамической системы процесса перемещения груза КТ, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием.

4 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА КРАНОМ-ТРУБОУКЛАДЧИКОМ

Теоретические исследования процесса перемещения груза КТ заключается в анализе и синтезе конструктивных параметров модернизированного рабочего оборудования КТ влияющих на эффективность процесса перемещения груза. Исследования проводились на основе математической модели КТ, оснащенного модернизированным рабочим оборудованием.

4.1 Анализ и обоснование критерия эффективности

В работах предшественников эффективность процесса перемещения груза КТ напрямую зависит от его грузовой устойчивости. Для достижения грузовой устойчивости и, как следствие, повышения эффективности и безопасного производства работ трубоукладочной колонной должны выполняться следующие условия:

-равномерное распределение веса трубопровода между кранами – трубоукладчиками, согласно схеме производства работ;

-колебания в системе КТ – труба не должны входить в резонанс [86].

Для оценки грузовой устойчивости КТ пользуются статическими и динамическими характеристиками, статические характеристики представлены в таблице 4.1 [86].

Таблица 4.1 Статические характеристики устойчивости КТ [86]

Величина	Формула	Обозначения
Момент грузовой устойчивости	$M_{уст} = G_{max} \cdot l;$	G_{max} - максимальная сила тяжести, при которой не происходит отрыва правой гусеницы, l – вылет стрелы;

Номинальный грузовой момент	$M_{ном} = G_{ном} \cdot l;$	$G_{ном}$ - номинальная грузоподъемность для соответствующего вылета стрелы, l – вылет стрелы;
Грузовой момент	$M_{зр} = F \cdot l;$	F – сила на крюке КТ, l – вылет стрелы;
Угол грузовой устойчивости	$\alpha_{уст};$	придельный наклон КТ в сторону груза при сохранении поперечной устойчивости.

С целью рассмотрения динамических характеристик был проведен сравнительный анализ работ предшественников, рассматривающих вопросы повышения эффективности работы КТ, путем повышения их грузовой устойчивости.

Раац В.Ф. в своей работе, рассматривал вопрос повышения эффективности КТ при возведении магистральных трубопроводов, путем совершенствования КТ и его системы управления [57].

Для оценки эффективности использовал комплексные критерии, характеризующие, как грузовую устойчивость, так и производительность КТ. Таким образом, при оценке качества работы устройства стабилизации и гашения нагрузок на крюках КТ, в составе изоляционно-укладочной колонны, использовалась интенсивность нагрузки I_{pi} и среднеквадратичное отклонение нагрузки δ_{pi} , при оценке целесообразности использования инженерных решений использовался коэффициент использования грузоподъемных возможностей КТ $K_{иг}$ [57].

Основные выводы по работе заключались в следующем: наибольшее влияние на характер нагружения КТ оказывают факторы высоты и углового смещения опорных площадок, основной причиной изменения интенсивности нагрузки на крюке является микрорельеф.

Тихонов Ю. Б. также работал над обеспечением эффективности изоляционно–укладочной колонны путем совершенствования системы управления КТ.

Принимая допущение, что угол наклона стрелы всех КТ со временем не изменяется, за критерий эффективной работы изоляционно–укладочной колонны была принята сила на крюке. Исходя из этого, задача заключалась в сведении к минимуму, возникающих вследствие неровностей микрорельефа инерционных и упругих сил, действующих на крюк КТ, за счет работы системы управления [73].

В ходе работы были выявлены основные параметры, влияющие на качество переходного процесса системы стабилизации нагрузки на крюке, исследовано влияние трубопровода на динамические свойства изоляционно-укладочной колонны.

Шабалин А.Н. работал над повышением грузовой устойчивости трубоукладочной колонны, предотвращением аварийных ситуаций путем совершенствования КТ и систем управления комплектом машин трубоукладочной колонны. Критерием эффективности в данной работе является грузовой момент КТ $M_{гр}$. [86].

В работе был проведен анализ основных параметров системы управление, оказывающих влияние на грузовой момент.

Во всех вышеперечисленных работах хорошо проработан вопрос распределения веса трубопровода между КТ, работа системы управления, контроль высотной отметки крюковой подвески. Однако вопрос снижения неуправляемых колебаний груза раскрыт не полностью.

В данной работе цель исследования – это снижение неуправляемых колебаний груза, перемещаемого КТ, путем ограничения амплитуды колебания груза на стреле. Основной причиной колебания груза является неровности микрорельефа. В таком случаи эффективность применения, какого-либо инженерного решения следует оценивать с позиции его влияния на колебательный процесс груза на стреле. Что приводит, либо к колебательности, либо к логарифмическому декременту затухания. Колебательность в % проще для

восприятия и для расчета. Таким образом, критерием эффективности была принята колебательность, расчет которой производился по формуле (4.1)[90]:

$$\mu = \frac{l_2 - l_y}{l_1 - l_y} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

где l_1 и l_2 два, последовательно идущих, отклонения, l_y - установившееся значение.

4.2 Влияние горизонтальных колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика на изменение грузового момента

Сложность процесса перемещения крана с грузом зачастую связана с состоянием объектов строительства, с их расположением в болотистых районах со слабыми или вечномерзлыми грунтами [15, 39, 55]. В процессе укладки трубопровода в траншею нагрузка на крюке КТ, изменяется в большом диапазоне [64], от нулевой до максимальной. Причина такого колебания груза – это изменение высотного положения одного КТ относительно другого, вследствие преодоления неровностей микрорельефа, а так же колебания, возникающие в системе [86, 70]. Наличие неровностей микрорельефа при выполнении работ по обустройству газовых и нефтяных месторождений, прокладки трубопровода, является одним из основных, негативно влияющих, факторов [55].

На сегодняшний день, в работах предшественников рассматриваются вертикальные колебания трубопровода, приводящие к неравномерному распределению массы трубопровода и как следствие, потери устойчивости КТ. Раскачивание трубопровода в поперечной вертикальной плоскости в процессе укладки трубопровода может привести к удару трубы о стенку траншеи или стрелу КТ, что в свою очередь приводит к повреждению изоляции трубопровода и самой трубы. При наличии колебаний трубопровода в поперечной вертикальной

плоскости снижается точность производимых работ и, как следствие, уменьшение скорости их выполнения. Существуют инженерные решения, направленные на снижение амплитуды колебания груза на стреле КТ [41, 43, 4545, 46], более ранние решения хорошо рассмотрены в статье [76], однако, вопрос влияния колебаний в поперечной вертикальной плоскости на изменения грузового момента раскрыт не полностью.

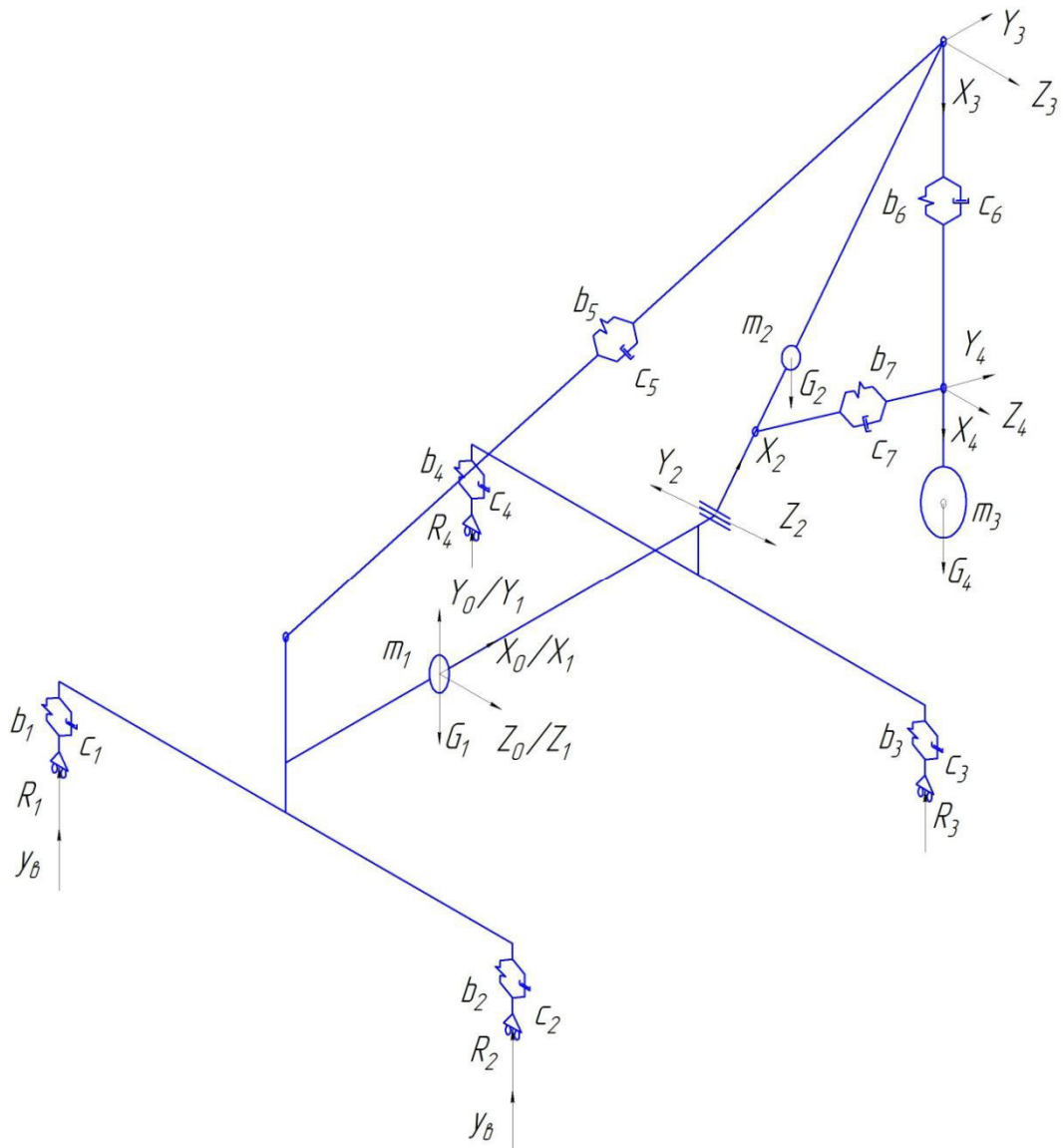


Рисунок 4.1 – Расчетная схема крана-трубоукладчика

С целью изучения влияния данных колебаний груза на стреле КТ на изменение грузового момента был проведен машинный эксперимент. На рисунке 4.1 показана схема его проведения.

В ходе эксперимента на правую гусеницу КТ подавалось возмущение y_v со стороны микрорельефа, импульсное воздействие, что приводило к вынужденным колебаниям груза. С целью выявления взаимосвязи отклонения груза в поперечной вертикальной плоскости на изменение грузового момента сравнивались следующие временные зависимости:

- отклонение груза по оси X , как вылет груза $l_{гр}$, расстояние от ребра опрокидывания до центра масс груза;

- изменение $M_{зр}$ грузового момента.

Грузовой момент рассчитывался по формуле (4.2) [86]

$$M_{зр} = G_{зр} \cdot l_{зр}, \quad (4.2)$$

где: $G_{зр}$ – вес груза, $l_{зр}$ – текущее плечо центра масс груза, относительно ребра опрокидывания [86].

Из рисунка 4.2 видно, что по мере удаления груза от ребра опрокидывания, участок на от точки 1 до точки 2, которому соответствует участок от точки 3 и до точки 4, вылет груза возрастает, что соответственно приводит к увеличению $M_{гр}$.

Полученные данные приводят к выводу, что колебания груза в поперечной вертикальной плоскости неотемлимо ведут к колебаниям грузового момента, вследствие изменения вылета груза, и соответственно негативно влияют на эффективность процесса перемещения груза КТ.

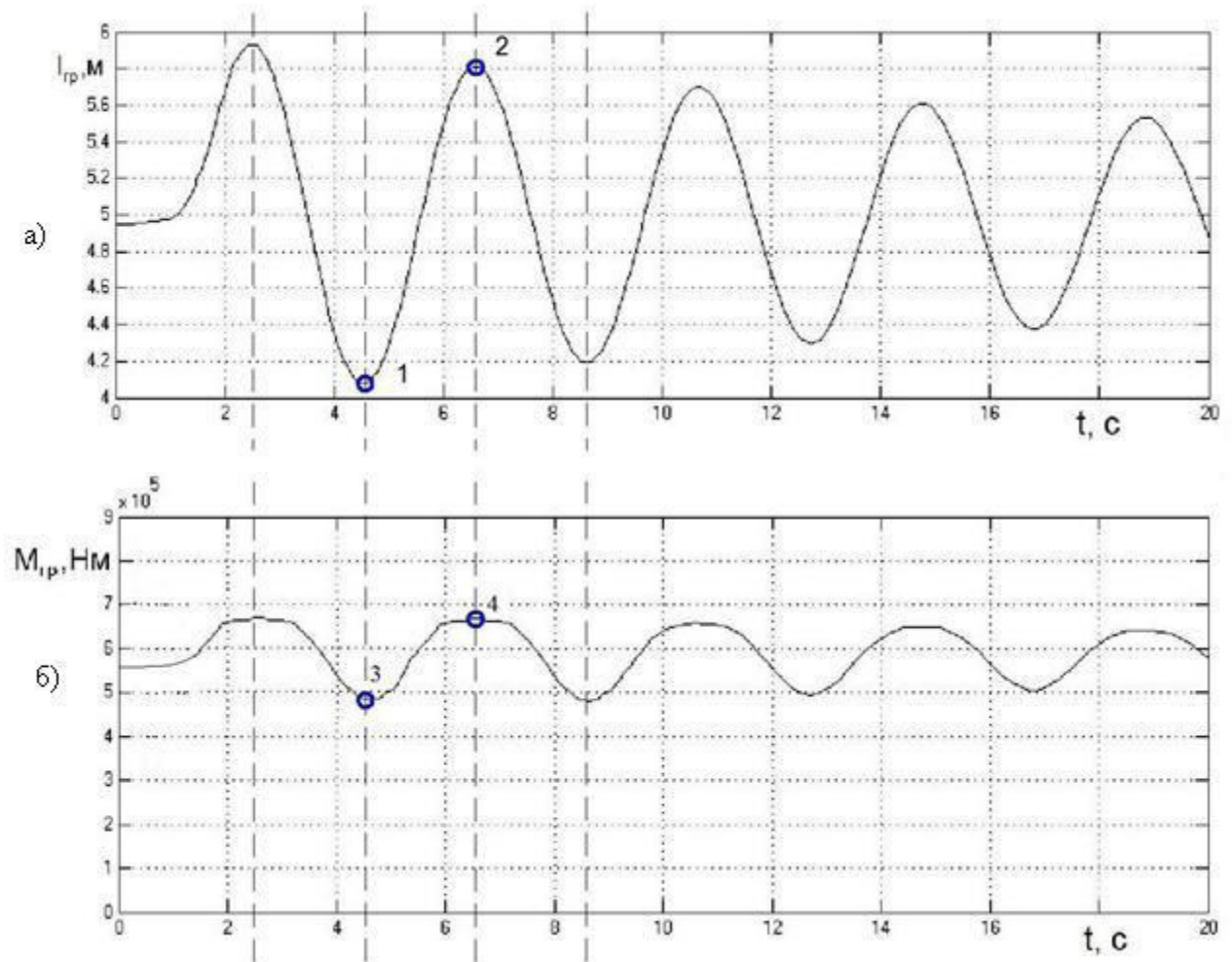


Рисунок 4.2 – а) отклонение груза по оси X_0 (вылет груза); б) изменение грузового момента

4.3 Анализ влияния координат точек крепления уравнивающего каната на колебательность груза

Теоретические исследования проводились на математической модели КТ описанной в 3 главе. Методика проведения исследований описана во 2 главе. Моделирование осуществлялось на ПК с помощью программного комплекса MATLAB R2013b.

В ходе машинного эксперимента варьируемыми параметрами являлись:

-координата точки крепления уравнивающего каната к стреле, по оси X_2 , локальной системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$, (рисунок 4.3(вид А изменение l_2));

-координата крепления уравнивающего каната к грузовому канату, по оси X_3 , локальной системы координат $O_3X_3Y_3Z_3$, (рисунок 4.3 (вид А изменение l_5));

Значение координат точки крепления УК к стреле варьировалось в диапазоне от 2,3 м до 5,5 м, для точки крепления конца УК этот диапазон составляет от 1,0 м до 4,2 м, при фиксированной длине грузового каната 4,2 м. Такие диапазоны продиктованы конструктивными особенностями КТ и позволяют рассмотреть все возможные варианты крепления УК. Величина шага в первом и втором случаях составила 0,8 м.

Длина УК в ходе моделирования была переменной, и варьировалась исходя из условия натяжения УК в момент времени $t=0$.

Цель УК, как полезной модели – это ограничение амплитуды колебания груза на стреле и, как следствие, снижения колебания в системе, таким образом, чем ниже значение колебательности, тем эффективнее работа УК.

В ходе машинного эксперимента грузу, подвешанному на стреле крана сообщалось начальное отклонение угла наклона грузового каната к вертикали, по обобщенной координате q_6 в 9 град. С целью оценки влияния координат точек крепления УК на колебания груза фиксировалась временная зависимость отклонения груза по оси X_0 , инерциальной системы координат $O_0X_0Y_0Z_0$ (рисунок 4.4).

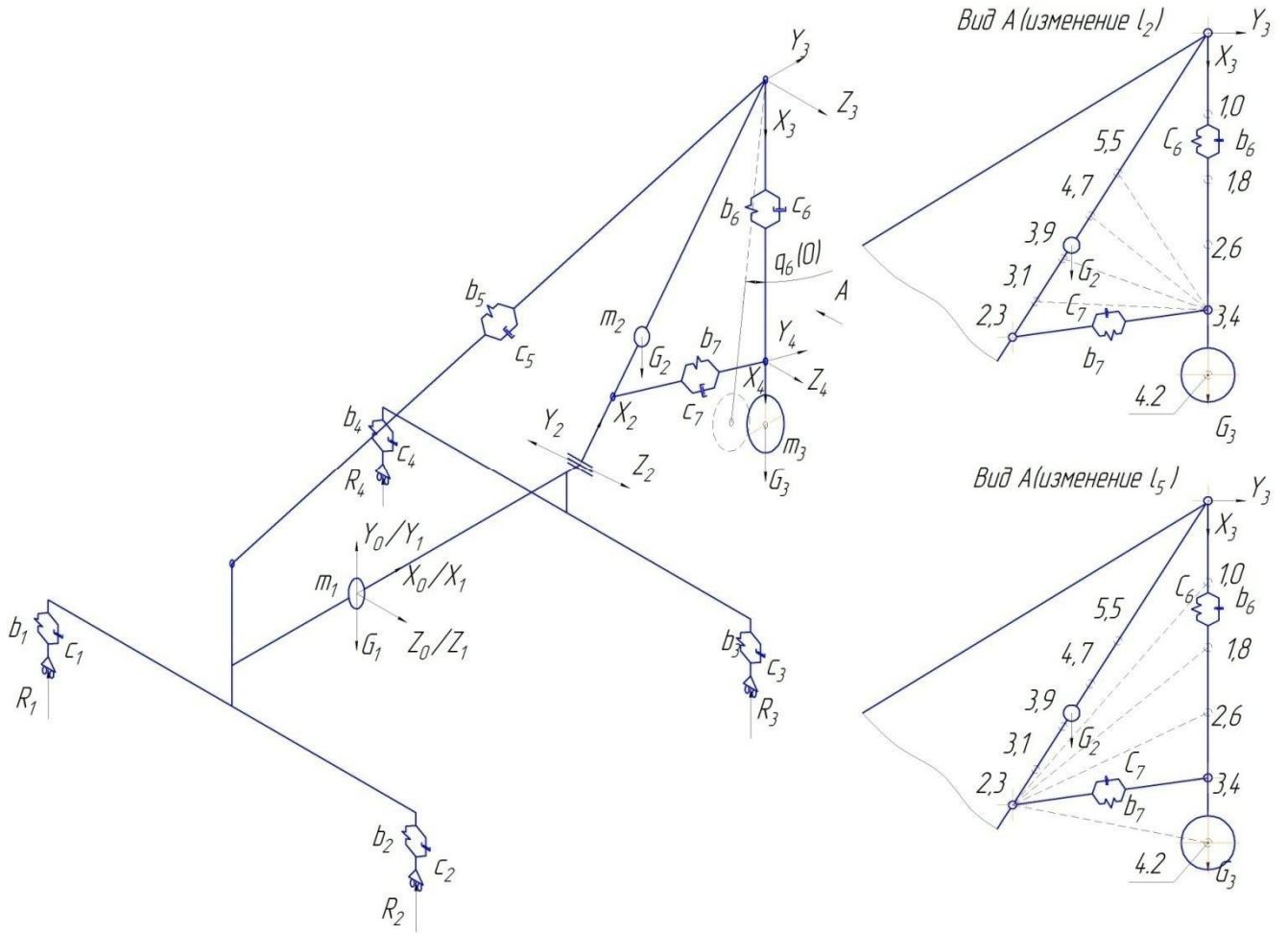


Рисунок 4.3 – Схема проведения машинного эксперимента

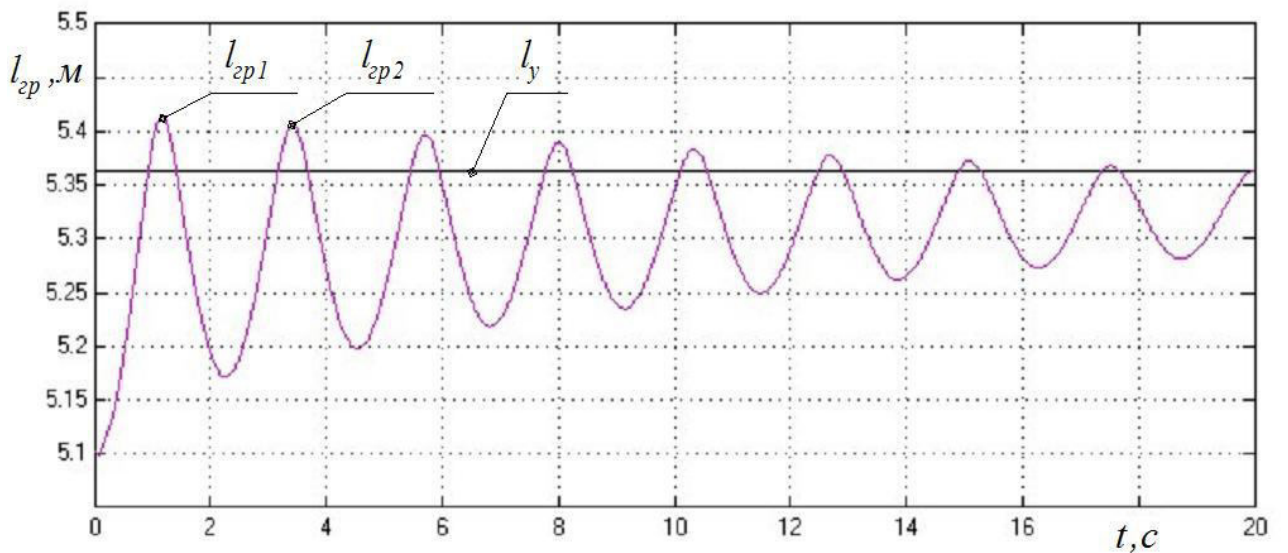


Рисунок 4.4 – Временная зависимость отклонения груза по оси X_0 (при условии, что масса груза $m_3 = 5950.5$ кг; угол наклона стрелы $q_5 = 40^\circ$; длина грузового каната $l_{4,3} = 2,9$ м; $l_2 = 4,7$ м; $l_5 = 2,6$ м; $q_6(0) = -9^\circ$; $\dot{q}_6(0) = 0$ рад/с)

С полученного графика (рисунок 4.4), снимались значения двух последовательно идущих отклонений l_{cp1} и l_{cp2} , а так же установившиеся значение $l_{cp,y}$ и рассчитывалось значение колебательности, для данного расчетного случая, формула (4.1)[90].

Исследования проводились для диапазона углов q_5 от 30° до 80° с шагом 10° . Далее представлены результаты анализа для каждого из исследуемых вылетов стрелы (углов q_5).

Таблица 4.2 Значения колебательности при $q_5=30^\circ$

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{5,1}(1,0)$	40,9	40,8	39,2	38,2	36,3
$l_{5,2}(1,8)$	30,0	27,8	26,8	25,7	31,9
$l_{5,3}(2,6)$	4,2	4,3	2,1	13,0	23,0
$l_{5,4}(3,4)$	0,0	0,0	0,0	4,0	24,2
$l_{5,5}(4,2)$	0,0	0,0	0,0	10,1	34,4

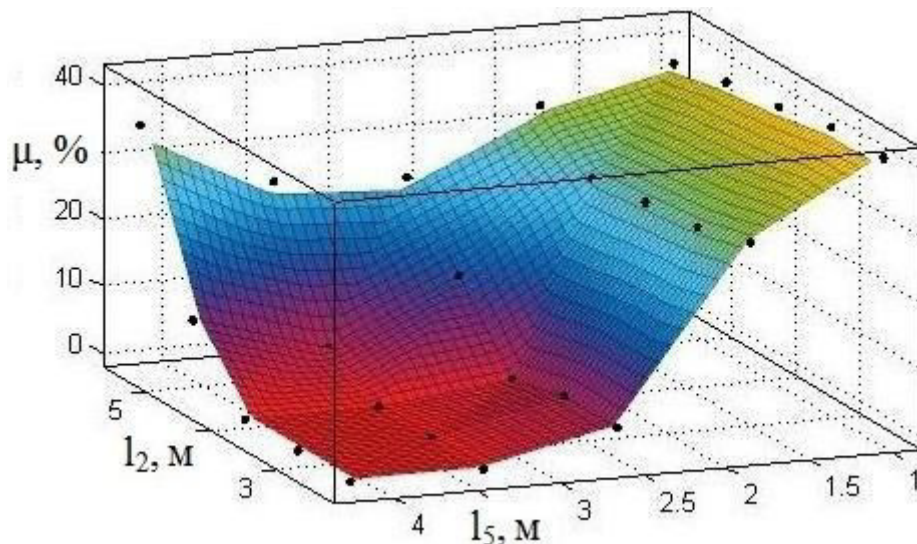


Рисунок 4.5 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната, $q_5=30^\circ$

Таблица 4.3 Значения колебательности при $q_5=40^\circ$

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
---------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

$l_{5,1}(1,0)$	42,5	40,2	41,3	39,5	38,8
$l_{5,2}(1,8)$	34,5	32,8	27,6	25,9	31,7
$l_{5,3}(2,6)$	13,7	6,5	8,9	11,1	25,6
$l_{5,4}(3,4)$	0,0	0,0	0,0	8,3	26,4
$l_{5,5}(4,2)$	0,0	0,0	0,0	26,9	38,1

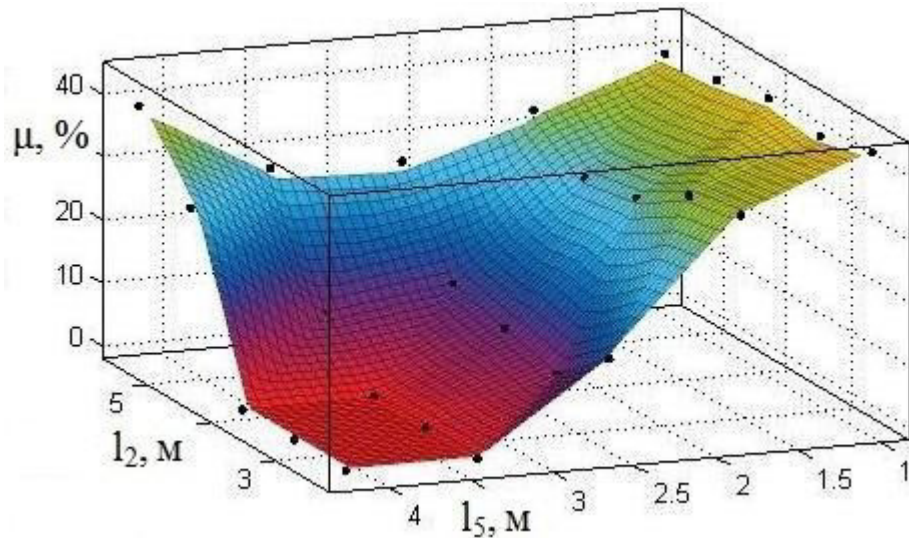


Рисунок 4.6 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната, $q_5=40^\circ$

Таблица 4.4 Значения колебательности при $q_5=50^\circ$

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{5,1}(1,0)$	42,3	39,4	38,9	38,6	38,6
$l_{5,2}(1,8)$	35,2	36,6	26,4	24,2	32,2
$l_{5,3}(2,6)$	19,9	13,2	11,8	12,0	28,9
$l_{5,4}(3,4)$	0,0	0,0	0,0	9,8	31,4
$l_{5,5}(4,2)$	0,0	0,0	0,0	12,9	31,0

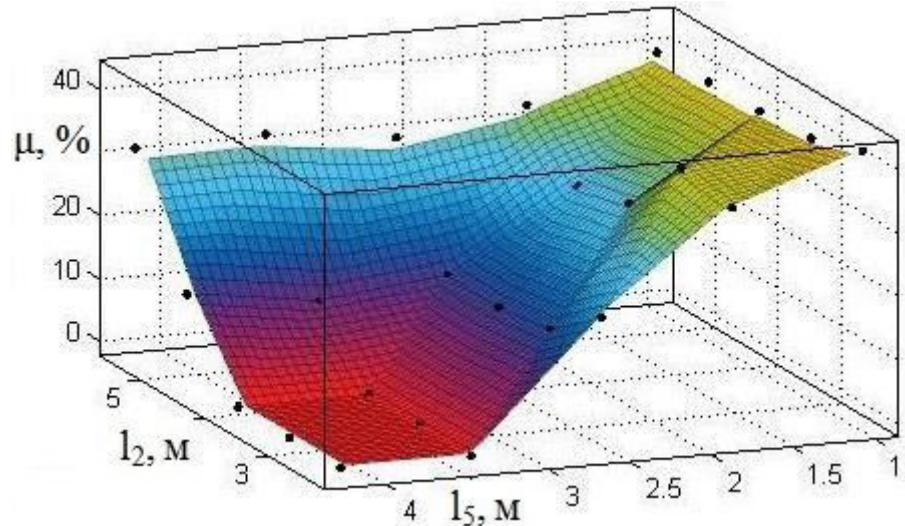


Рисунок 4.7 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната, $q_5=50^\circ$

Таблица 4.5 Значения колебательности при $q_5=60^\circ$

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{5,1}(1,0)$	39,5	39,1	42,2	41,2	38,3
$l_{5,2}(1,8)$	43,9	42,2	38,4	29,0	33,3
$l_{5,3}(2,6)$	33,5	21,0	9,1	13,3	33,0
$l_{5,4}(3,4)$	2,4	0,0	0,0	17,7	35,5
$l_{5,5}(4,2)$	0,0	0,0	0,0	22,9	38,9

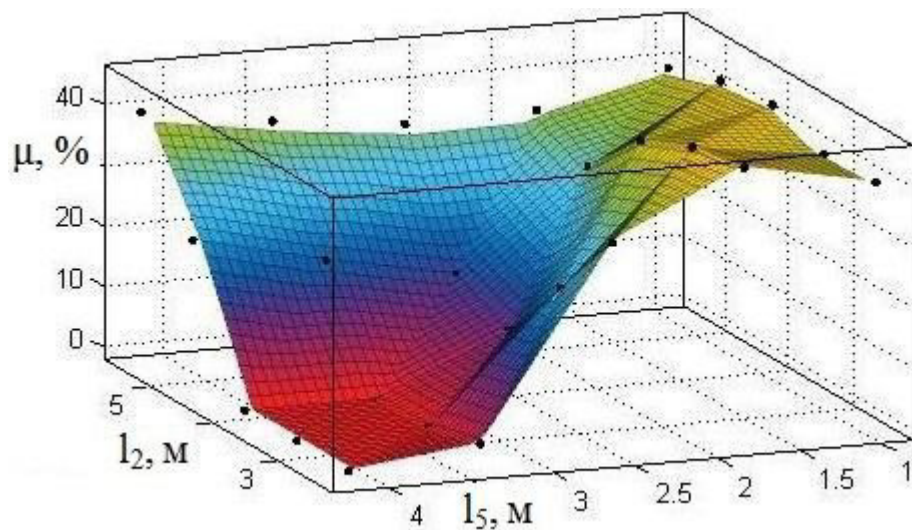
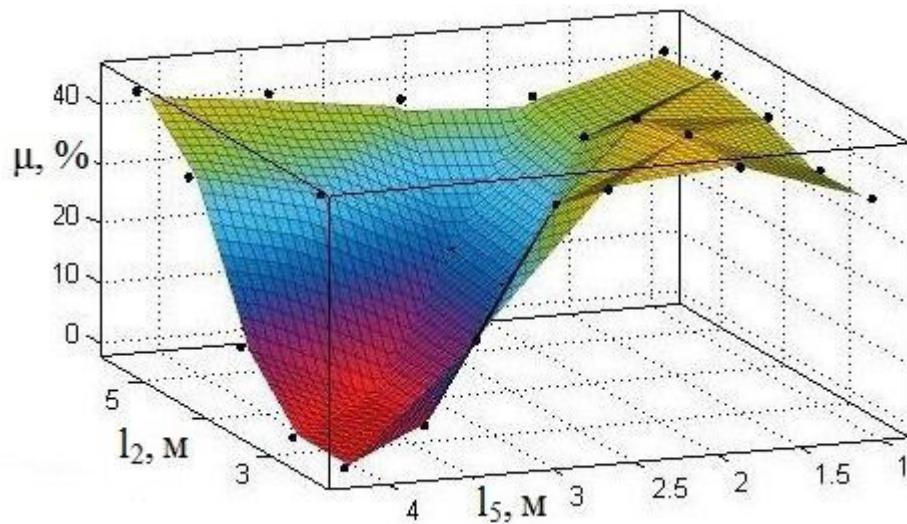


Рисунок 4.8 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната, $q_5=60^\circ$

Таблица 4.6 Значения колебательности при $q_5=70^\circ$

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{5,1}(1,0)$	36,9	36,5	40,4	42,3	41,3
$l_{5,2}(1,8)$	44,2	44,5	42,1	34,0	35,8
$l_{5,3}(2,6)$	42,4	34,8	16,0	17,0	37,2
$l_{5,4}(3,4)$	19,2	0,0	0,0	28,4	40,2
$l_{5,5}(4,2)$	0,0	0,0	10,0	33,3	42,6

Рисунок 4.9 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната, $q_5=70^\circ$ Таблица 4.7 Значения колебательности при $q_5=80^\circ$

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{5,1}(1,0)$	33,8	32,7	36,7	40,4	42,2
$l_{5,2}(1,8)$	38,8	40,6	40,5	39,2	40,8
$l_{5,3}(2,6)$	40,5	39,7	32,2	26,7	41,3
$l_{5,4}(3,4)$	35,5	10,9	7,4	36,3	30,9
$l_{5,5}(4,2)$	0,0	0,0	32,7	44,4	43,9

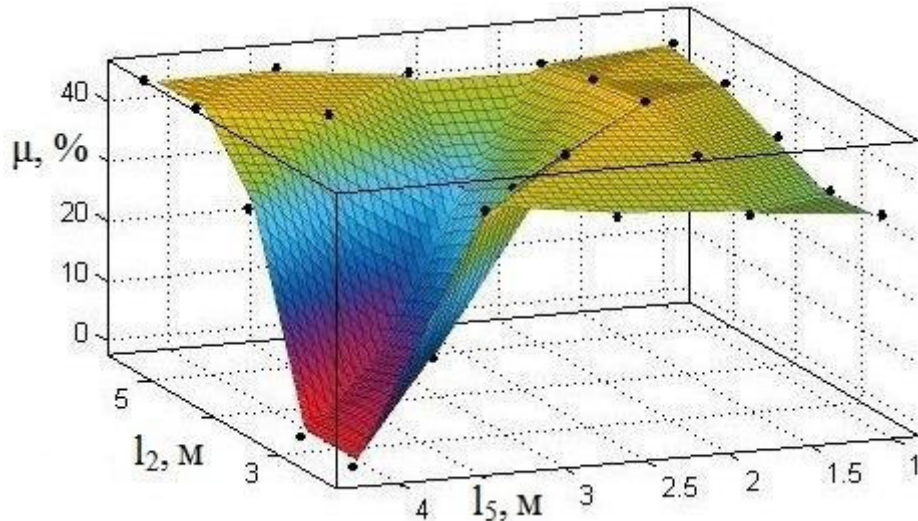


Рисунок 4.10 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната, $q_5=80^\circ$

Из графиков видно, что координаты точек у основания стрелы (2,3;3,1;3,9), и координаты точек на конце грузового каната (3,4;4,2) позволяют добиться наиболее эффективной работы УК т.к. колебательность в этих случаях равна нулю. Влияние координат точек на конце грузового каната легко объясняется сокращением длины маятника, что будет справедливо для любой длины грузового каната. Вопрос влияния координат точек у основания стрелы, требует дополнительных исследований, для различных длин грузового каната.

4.4 Анализ зависимости координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната на колебательность груза

С целью изучения зависимости колебательности груза от координат крепления УК к стреле и длины грузового каната, был проведен машинный эксперимент. В данном случае координата точки крепления УК к грузовому канату была фиксированной, 0,3 м от точки центра масс груза. Варьируемыми параметрами являлись:

- координата точки крепления уравнивающего каната к стреле;
- длина грузового каната.

Исследования проводились для того же диапазона углов наклона стрелы от 30° до 80° с шагом 10° .

Таблица 4.8 Значения колебательности при $q_5=30^\circ$, исследование зависимости координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната на колебательность груза

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{3,1}(1,0)$	55,3	62,4	70,3	75,3	81,2
$l_{3,2}(1,8)$	57,7	58,4	64,3	71,3	79,2
$l_{3,3}(2,6)$	58,1	55,9	57,6	65,8	71,8
$l_{3,4}(3,4)$	59,0	57,8	56,8	56,6	63,3
$l_{3,5}(4,2)$	51,4	51,7	48,5	45,9	47,3

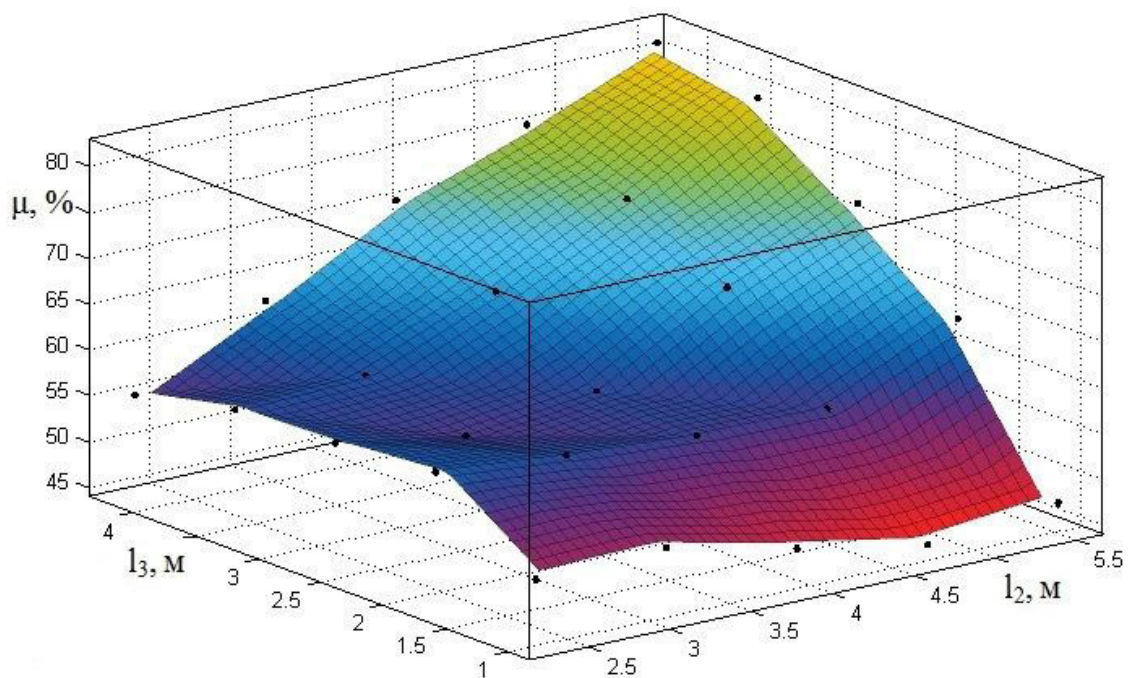


Рисунок 4.11 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=30^\circ$

Таблица 4.9 Значения колебательности при $q_5=40^\circ$, исследование зависимости координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната на колебательность груза

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{3,1}(1,0)$	57,8	63,4	71,9	81,2	85,2
$l_{3,2}(1,8)$	58,8	61,6	63,1	72,3	81,2
$l_{3,3}(2,6)$	63,0	58,4	61,3	61,8	73,5
$l_{3,4}(3,4)$	63,1	61,3	56,7	55,3	61,5
$l_{3,5}(4,2)$	54,8	49,3	51,4	50,7	47,4

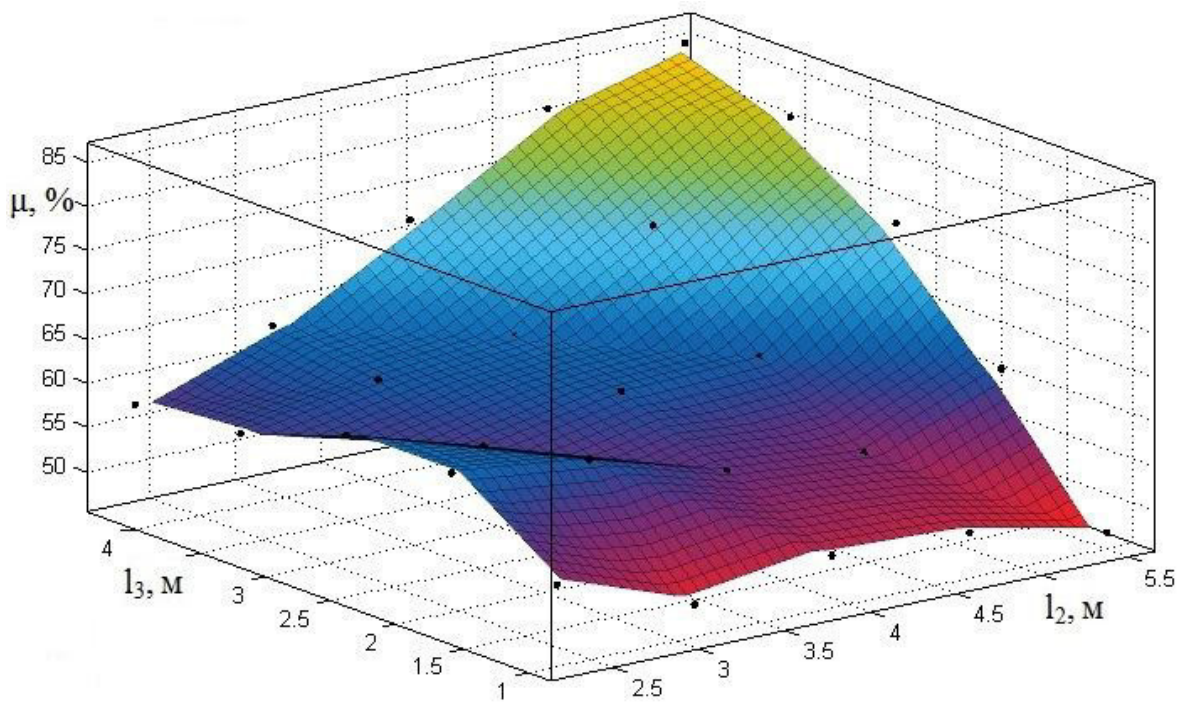


Рисунок 4.12 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=40^\circ$

Таблица 4.10 Значения колебательности при $q_5=50^\circ$, исследование зависимости координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната на колебательность груза

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{3,1}(1,0)$	59,6	65,2	72,6	80,1	86,9
$l_{3,2}(1,8)$	60,9	61,5	65,6	74,3	81,6
$l_{3,3}(2,6)$	68,1	62,0	60,4	64,1	75,1
$l_{3,4}(3,4)$	66,3	64,0	60,6	56,1	60,0
$l_{3,5}(4,2)$	54,5	51,8	48,6	50,0	46,7

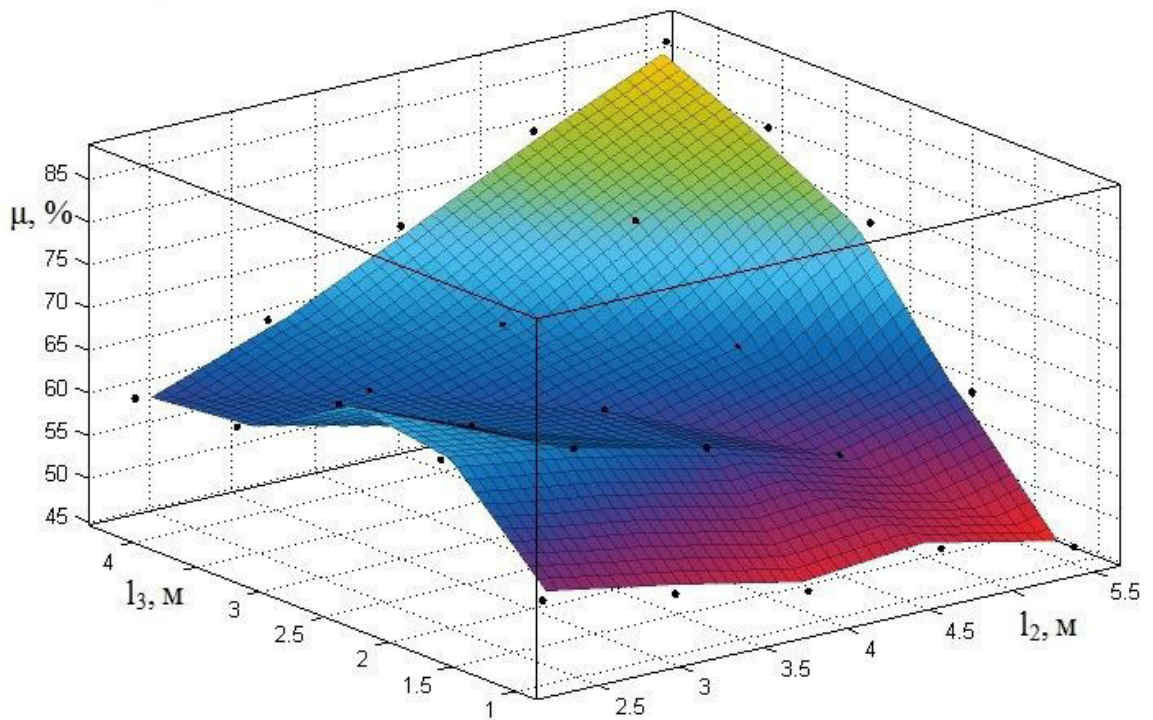


Рисунок 4.13 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=50^\circ$

Таблица 4.11 Значения колебательности при $q_5=60^\circ$, исследование зависимости координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната на колебательность груза

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{3,1}(1,0)$	57,2	63,3	74,5	83,6	88,1
$l_{3,2}(1,8)$	66,8	60,7	65,9	76,5	85,3
$l_{3,3}(2,6)$	74,7	69,1	61,5	63,4	76,6
$l_{3,4}(3,4)$	71,8	70,1	69,8	60,4	63,2
$l_{3,5}(4,2)$	54,0	53,6	50,0	48,3	46,8

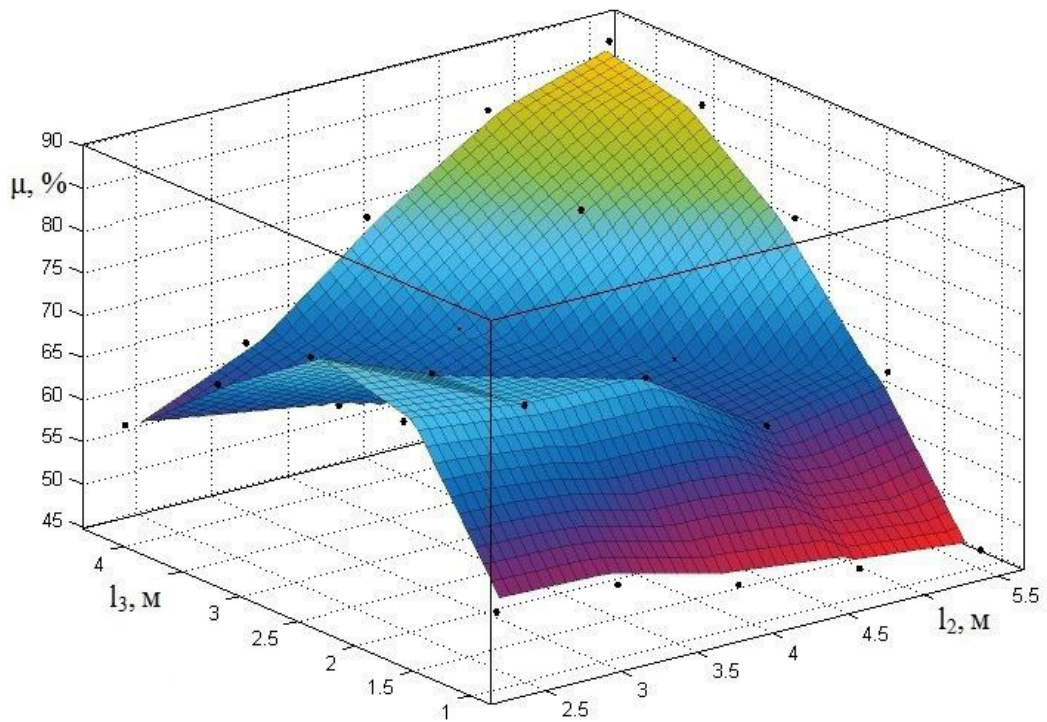


Рисунок 4.14 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=60^\circ$

Таблица 4.12 Значения колебательности при $q_5=70^\circ$, исследование зависимости координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната на колебательность груза

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{3,1}(1,0)$	61,7	65,8	78,5	87,5	88,8
$l_{3,2}(1,8)$	76,0	64,3	66,5	83,0	84,5
$l_{3,3}(2,6)$	80,8	75,7	66,1	66,3	77,5
$l_{3,4}(3,4)$	73,3	72,4	71,2	65,0	64,7
$l_{3,5}(4,2)$	55,4	53,1	50,3	42,4	40,0

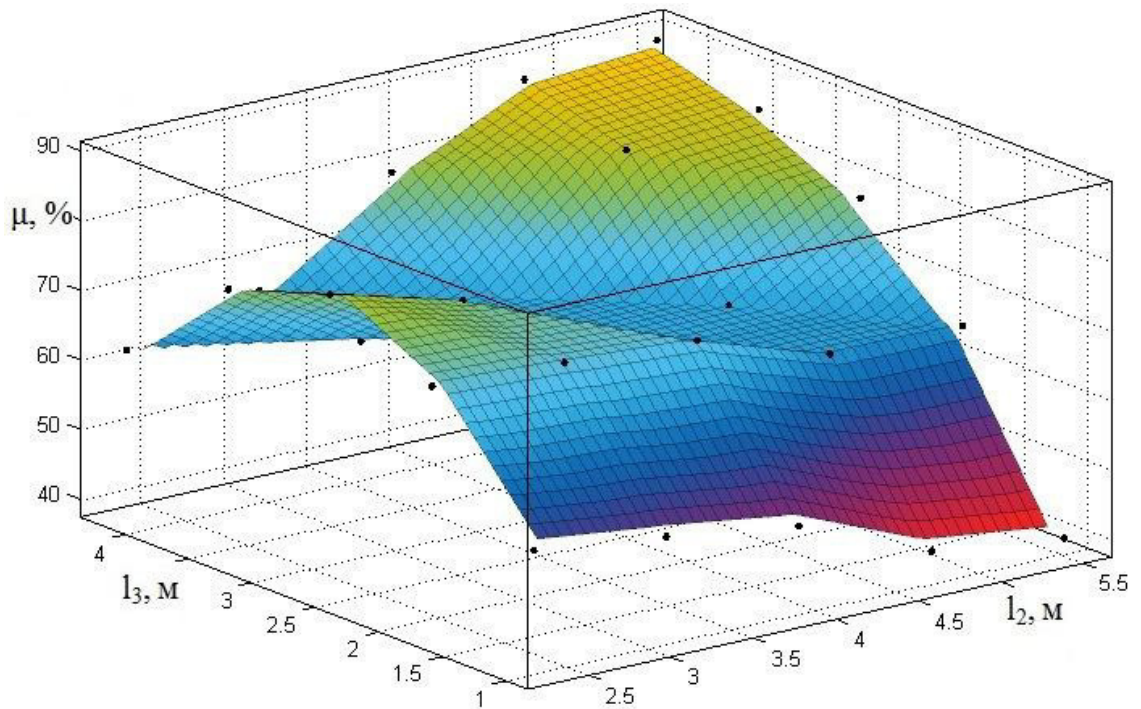


Рисунок 4.15 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=70^\circ$

Таблица 4.13 Значения колебательности при $q_5=80^\circ$, исследование зависимости координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната на колебательность груза

Факторы	$l_{2,1}(2,3)$	$l_{2,2}(3,1)$	$l_{2,3}(3,9)$	$l_{2,4}(4,7)$	$l_{2,5}(5,5)$
$l_{3,1}(1,0)$	69,8	68,9	86,7	90,7	89,7
$l_{3,2}(1,8)$	83,8	73,4	73,0	85,0	87,9
$l_{3,3}(2,6)$	78,24	77,7	72,4	72,3	78,4
$l_{3,4}(3,4)$	64,4	53,5	70,3	70,1	67,1
$l_{3,5}(4,2)$	52,3	49,6	40,0	35,0	31,7

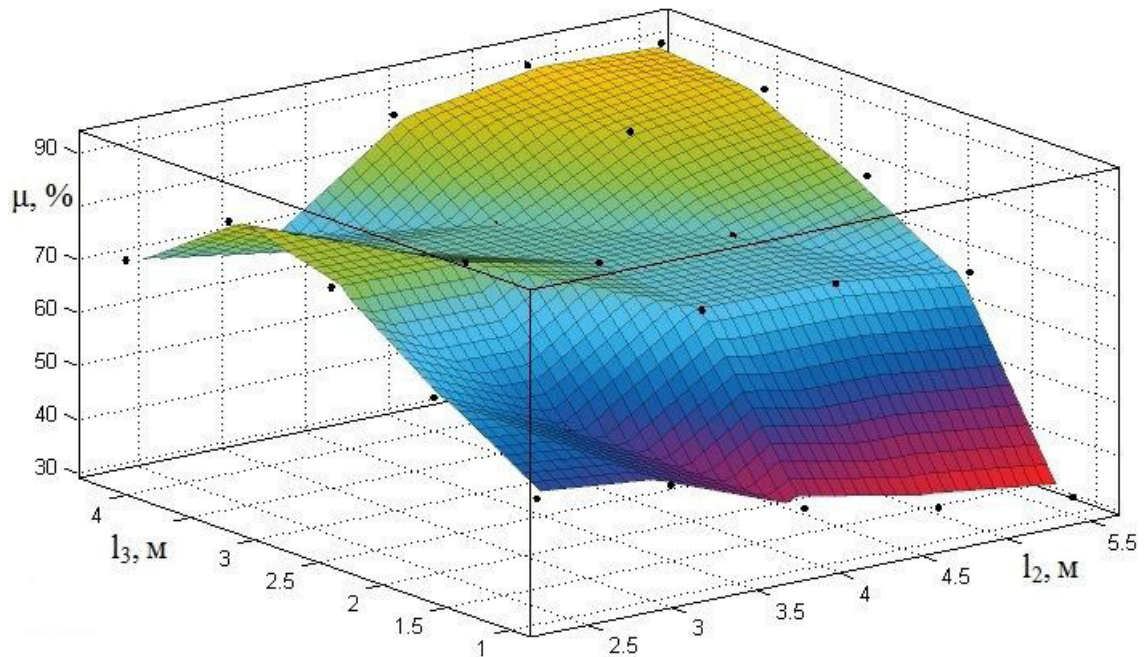


Рисунок 4.16 – Зависимость колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=80^\circ$

Поверхности показывают, что для длин грузового каната от 1 до двух метров, более эффективным являются точки крепления ближе к оголовку стрелы. Для средних значений длины от (2 до 3 м) эффективными будут точки 3,5 и 4. Для больших значений длины грузового каната справедлива зависимость, чем ближе к

Таблица 4.14 Регрессионные зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната

q_5	Уравнения регрессии	R^2
30°	$\begin{aligned} \mu(l_2, l_3) = & -102,40 + 71,19 \cdot l_2 + 191,70 \cdot l_3 - 12,46 \\ & \cdot l_2^2 - 64,84 \cdot l_2 \cdot l_3 - 72,73 \cdot l_3^2 - 0,11 \cdot l_2^3 \\ & + 11,49 \cdot l_2^2 \cdot l_3 + 10,57 \cdot l_2 \cdot l_3^2 + 13,58 \cdot l_3^3 \\ & + 0,10 \cdot l_2^4 - 0,54 \cdot l_2^3 \cdot l_3 - 1,0 \cdot l_2^2 \cdot l_3^2 - 0,37 \\ & \cdot l_2 \cdot l_3^3 - 1,09 \cdot l_3^4 \end{aligned}$	0,9941
40°	$\begin{aligned} \mu(l_2, l_3) = & -34,82 - 1,38 \cdot l_2 + 198,10 \cdot l_3 + 15,29 \cdot l_2^2 \\ & - 69,10 \cdot l_2 \cdot l_3 - 67,54 \cdot l_3^2 - 3,77 \cdot l_2^3 + 7,73 \cdot l_2^2 \\ & \cdot l_3 + 17,05 \cdot l_2 \cdot l_3^2 + 8,16 \cdot l_3^3 + 0,25 \cdot l_2^4 - 0,11 \cdot l_2^3 \\ & \cdot l_3 - 1,27 \cdot l_2^2 \cdot l_3^2 - 0,88 \cdot l_2 \cdot l_3^3 - 0,37 \cdot l_3^4 \end{aligned}$	0,9818
50°	$\begin{aligned} \mu(l_2, l_3) = & -161,70 + 118,20 \cdot l_2 + 232,80 \cdot l_3 - 29,55 \cdot l_2^2 \\ & - 80,12 \cdot l_2 \cdot l_3 - 76,13 \cdot l_3^2 + 3,70 \cdot l_2^3 + 8,79 \cdot l_2^2 \\ & \cdot l_3 + 19,72 \cdot l_2 \cdot l_3^2 + 8,20 \cdot l_3^3 - 0,20 \cdot l_2^4 - 0,21 \cdot l_2^3 \\ & \cdot l_3 - 1,19 \cdot l_2^2 \cdot l_3^2 - 1,26 \cdot l_2 \cdot l_3^3 - 0,19 \cdot l_3^4 \end{aligned}$	0,9857
60°	$\begin{aligned} \mu(l_2, l_3) = & -278,40 + 122,50 \cdot l_2 + 424,40 \cdot l_3 - 8,56 \cdot l_2^2 \\ & - 142,30 \cdot l_2 \cdot l_3 - 141,90 \cdot l_3^2 - 3,03 \cdot l_2^3 + 21,39 \\ & \cdot l_2^2 \cdot l_3 + 24,26 \cdot l_2 \cdot l_3^2 + 21,93 \cdot l_3^3 + 0,37 \cdot l_2^4 \\ & - 1,02 \cdot l_2^3 \cdot l_3 - 1,75 \cdot l_2^2 \cdot l_3^2 - 1,17 \cdot l_2 \cdot l_3^3 - 1,43 \\ & \cdot l_3^4 \end{aligned}$	0,9633
70°	$\begin{aligned} \mu(l_2, l_3) = & -369,00 + 247,00 \cdot l_2 + 390,00 \cdot l_3 - 58,22 \cdot l_2^2 \\ & - 153,50 \cdot l_2 \cdot l_3 - 107,20 \cdot l_3^2 + 4,62 \cdot l_2^3 + 29,16 \\ & \cdot l_2^2 \cdot l_3 + 16,44 \cdot l_2 \cdot l_3^2 + 16,19 \cdot l_3^3 - 0,06 \cdot l_2^4 \\ & - 1,61 \cdot l_2^3 \cdot l_3 - 1,88 \cdot l_2^2 \cdot l_3^2 - 0,06 \cdot l_2 \cdot l_3^3 - 1,26 \\ & \cdot l_3^4 \end{aligned}$	0,9556
80°	$\begin{aligned} \mu(l_2, l_3) = & 195,60 - 175,00 \cdot l_2 + 42,38 \cdot l_3 + 74,98 \cdot l_2^2 \\ & - 46,39 \cdot l_2 \cdot l_3 + 24,5 \cdot l_3^2 - 15,38 \cdot l_2^3 + 19,03 \cdot l_2^2 \\ & \cdot l_3 - 10,31 \cdot l_2 \cdot l_3^2 - 3,06 \cdot l_3^3 + 1,05 \cdot l_2^4 - 1,09 \cdot l_2^3 \\ & \cdot l_3 - 1,19 \cdot l_2^2 \cdot l_3^2 + 2,47 \cdot l_2 \cdot l_3^3 - 0,50 \cdot l_3^4 \end{aligned}$	0,8842

Полученные в результате аппроксимации графики представлены на рисунке 4.17-4.22.

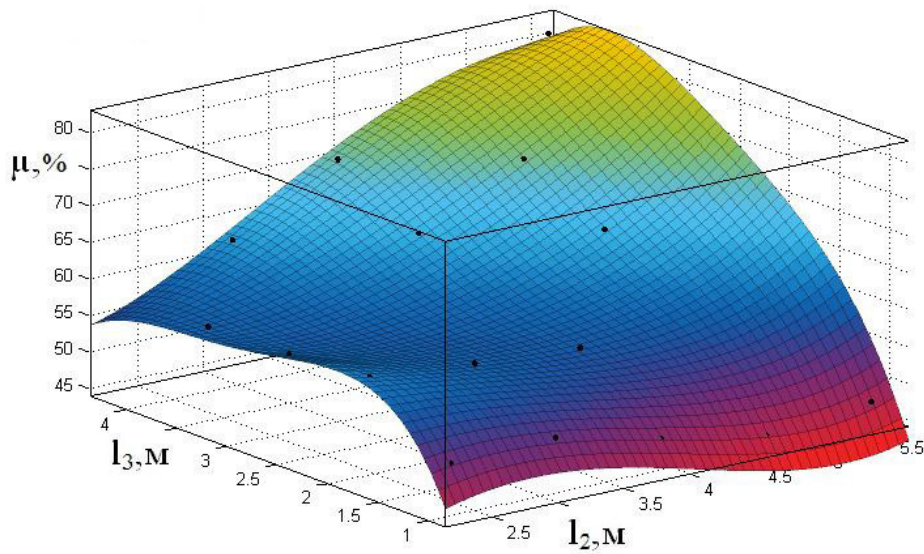


Рисунок 4.17 – Результат аппроксимации зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=30^\circ$

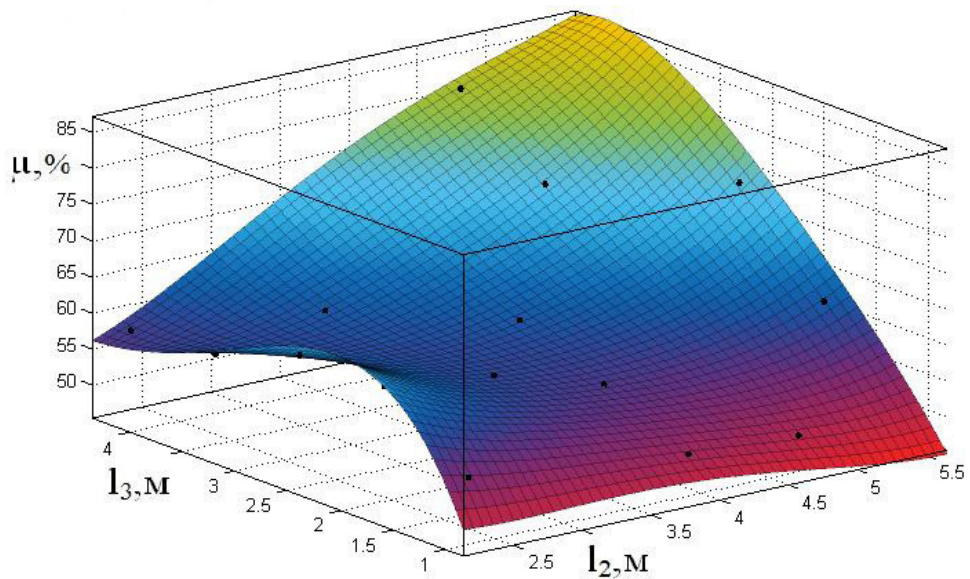


Рисунок 4.18 – Результат аппроксимации зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=40^\circ$

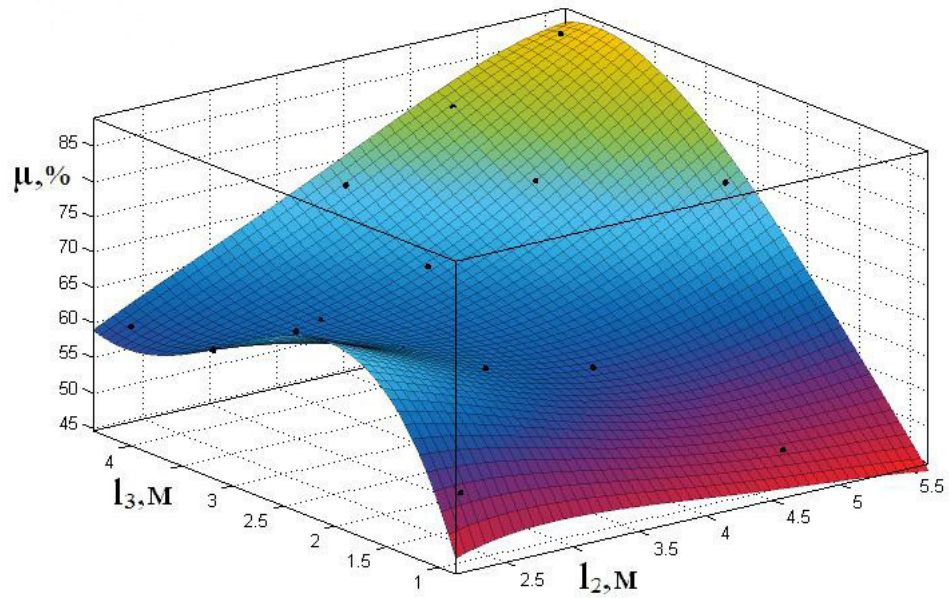


Рисунок 4.19 – Результат аппроксимации зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравновешивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=50^\circ$

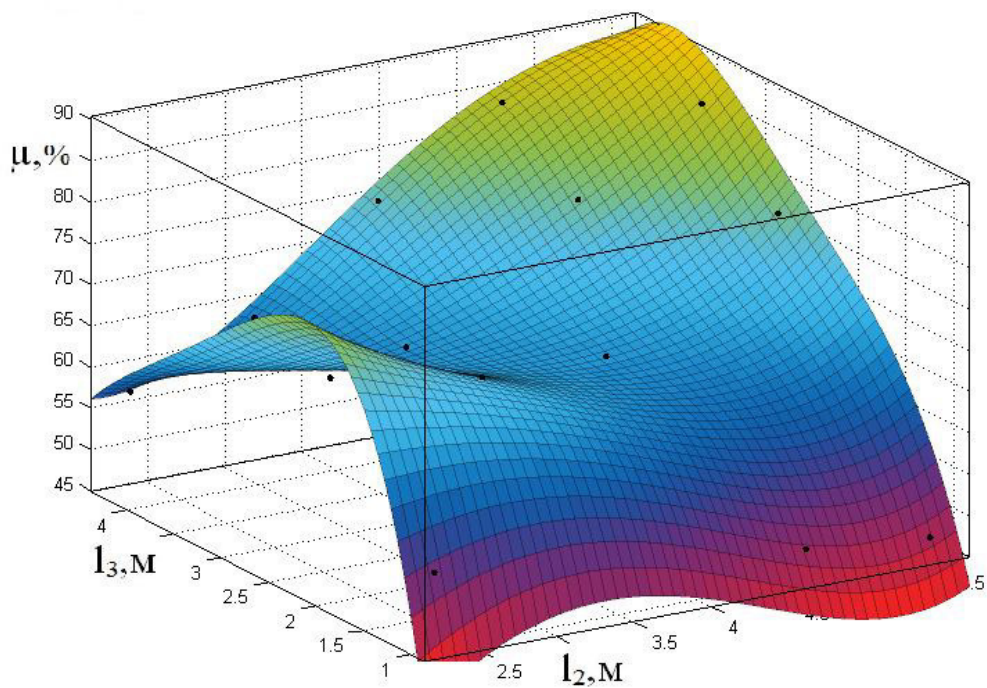


Рисунок 4.20 – Результат аппроксимации зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравновешивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=60^\circ$

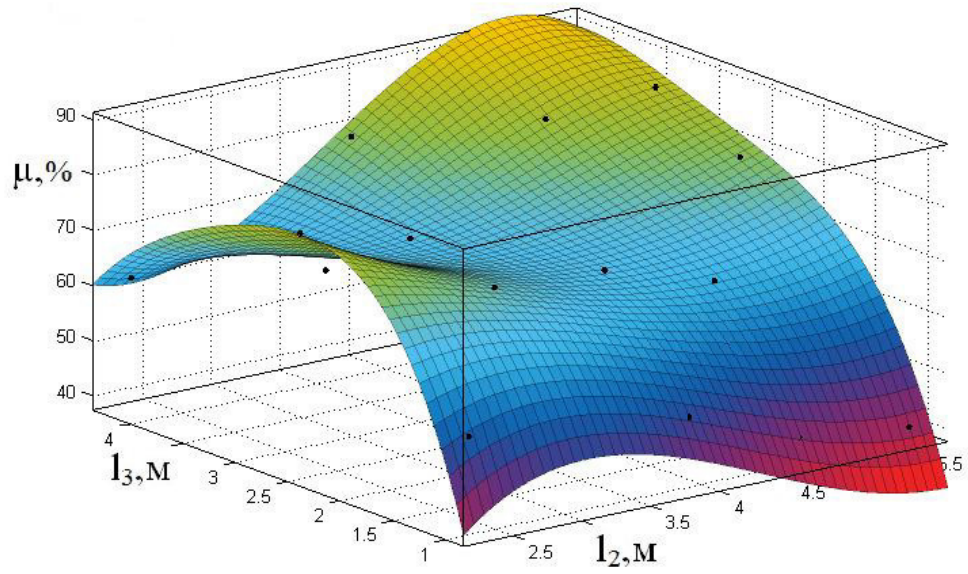


Рисунок 4.21 – Результат аппроксимации зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=70^\circ$

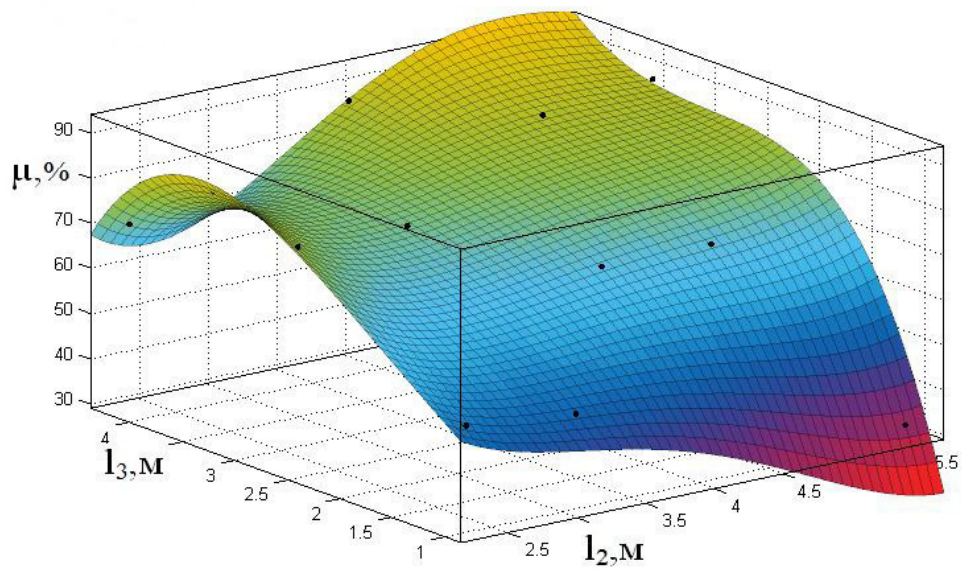


Рисунок 4.22 – Результат аппроксимации зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната, $q_5=80^\circ$

4.6 Оптимизационный синтез параметров уравнивающего каната

Таким образом, полученные уравнения регрессии позволяют нам перейти к решению задачи оптимизации параметров уравнивающего каната.

Задачи оптимизации с точки зрения методов решения делятся на два класса [31, 68]: задачи безусловной оптимизации; задачи условной оптимизации.

Задача безусловной оптимизации представляет собой поиск оптимума целевой функции без всяких дополнительных условий и ограничений [31, 68]:

$$f(x) \rightarrow \min(\max). \quad (4.8)$$

Задача условной оптимизации в общем виде записывается как [31, 68]:

$$\left. \begin{aligned} F = f(x_j) &\rightarrow \min(\max); \\ g_i(x_j) &\leq b_i; \\ d_j \leq x_j &\leq D_j; \\ i = 1 \dots m, j &= 1 \dots n. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

В систему уравнений (4.9) входят три составляющие: целевая функция $F=f(x_j)$ показывает, в каком смысле решение должно быть оптимальным, то есть наилучшим, при этом возможны три вида назначения целевой функции: максимизация, минимизация, назначение заданного значения; ограничения $g_i(x_j) \leq b_i$ устанавливают зависимости между переменными; граничные условия $d_j \leq x_j \leq D_j$ показывают, в каких пределах могут находиться значения искомым переменных в оптимальном решении.

При решении задачи оптимизации целевая функция и граничные условия были представлены в следующем виде:

Колебательность груза должна быть минимальной, при заданных граничных условиях:

$$\left. \begin{aligned} \mu(l_2, l_3) = f(l_2, l_3) &\rightarrow \min; \\ sl_2 \leq l_2 \leq nl_2; \\ sl_3 \leq l_3 \leq nl_3, \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

где $f(l_2, l_3)$ – целевая функция;

sl_2, nl_2 – нижний и верхний пределы независимого параметра l_2 (координата крепления уравнивающего каната к стреле);

sl_3, nl_3 – нижний и верхний пределы независимого параметра l_3 (координата крепления уравнивающего каната к грузовому канату);

Необходимость обеспечить минимальную колебательность груза задается целевой функцией. Границы варьирования независимого параметра l_2 от 2,3 до 5,5 м продиктованы геометрическими параметрами стрелы КТ, границы параметра l_3 от 1,0 до 4,2 м обоснованы длиной грузового каната, рассматриваемого в данной работе.

Для решения задачи безусловной оптимизации был использован модифицированный метод Ньютона, основанный на пересчете матрицы Гессе формулой Бройнзена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно (алгоритм BFGS) и реализованный в программном комплексе MATLAB [31, 97, 98].

Стратегия данного метода состоит в построении последовательности точек $\{x^k\}$, $k=0,1,\dots,n$ таких, что $f(x^{k+1}) < f(x^k)$. Точки последовательности вычисляются по правилу [31]:

$$x^{k+1} = x^k + \beta_k \cdot s_k, \quad (4.11)$$

где x^0 – задается пользователем, а направление спуска $\beta_k \cdot s_k$ определяется для каждого значения k по формулам [31]:

$$\beta_k = \min_{\beta_k \geq 0} f(x_k + s_k); \quad (4.12)$$

$$s_k = -H(x^k) \nabla f(x^k); \quad (4.13)$$

$$H(x^k) \rightarrow [\nabla^2 f(x^k)]^{-1}, \quad (4.14)$$

где H – матрица Гессе; $\nabla f(x^k)$ – градиент функции $f(x)$ в точке x^k .

Формула пересчета Бройнзена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно (BFGS) [31]:

$$H_{BFGS}(H, \Delta x, y) = H - \frac{(\Delta x - Hy) \Delta x \Delta x^T}{(y \Delta x)^2} + \frac{(\Delta x - Hy) \Delta x^T + \Delta x (\Delta x - Hy)^T}{(y \Delta x)}; \quad (4.15)$$

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k; \quad (4.16)$$

$$y = \nabla f(x_{k+1}) - \nabla f(x_k). \quad (4.17)$$

Построение последовательности $\{x^k\}$ заканчивается в точке x^k при условии

$$\left. \begin{aligned} \|x^{k+1} - x^k\| < \varepsilon; \\ |f(x^{k+1}) - f(x^k)| < \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

Где ε – заданное малое положительное число (точность приближения).

Таким образом, с целью получения оптимальных значений координат крепления уравнивающего каната к стреле, для различных длин грузового каната и углов наклона стрелы, был проведен анализ регрессионных зависимостей приведенных в таблице 4.14. Получены следующие зависимости:

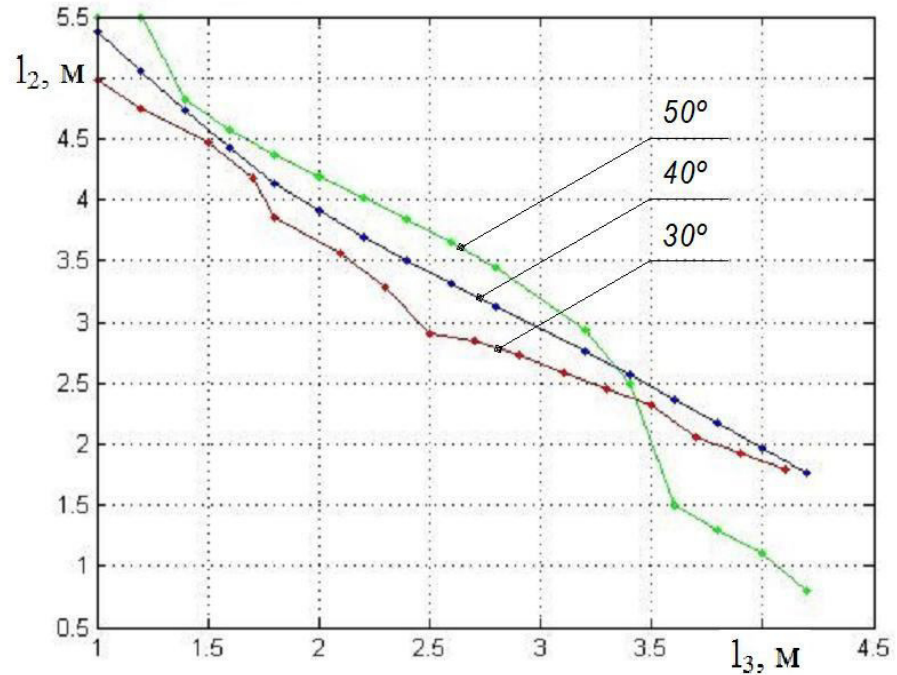


Рисунок 4.23 – Оптимальные значения координат точки крепления уравнивающего каната к стреле для соответствующей длины грузового каната, $q_5=30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$

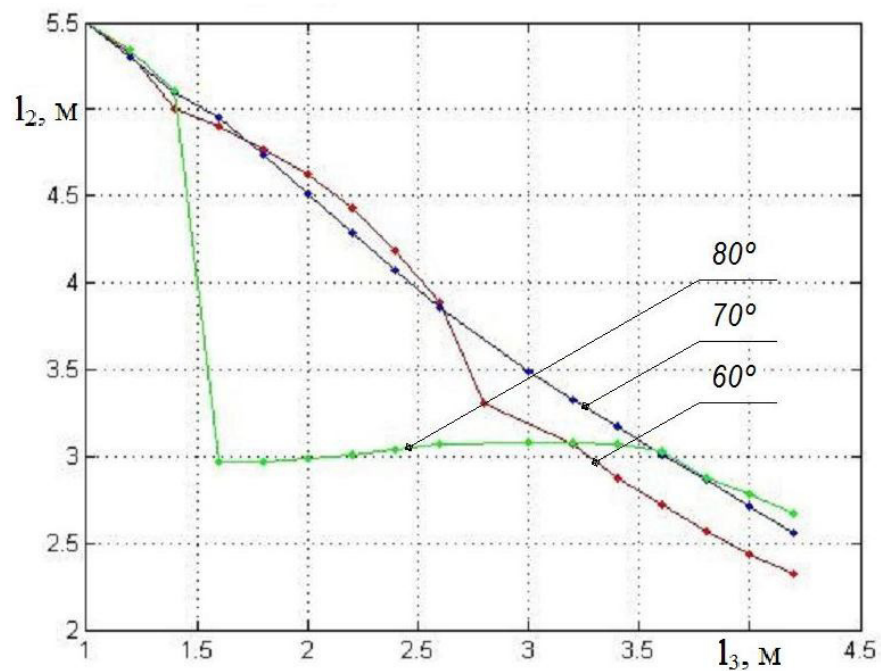


Рисунок 4.24 – Оптимальные значения координат точки крепления уравнивающего каната к стреле для соответствующей длины грузового каната, $q_5=60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$

Полученные зависимости позволяют определить оптимальное значение координаты крепления уравнивающего каната, для рассмотренного диапазона длин грузового каната и углов наклона стрелы.

Однако в ходе анализа данных, изложенных в параграфе 4.4, для длин грузового каната от 3,4-4,2 м была выявлена зависимость изменения угла τ_1 (рисунок 4.25) на значение колебательности груза.

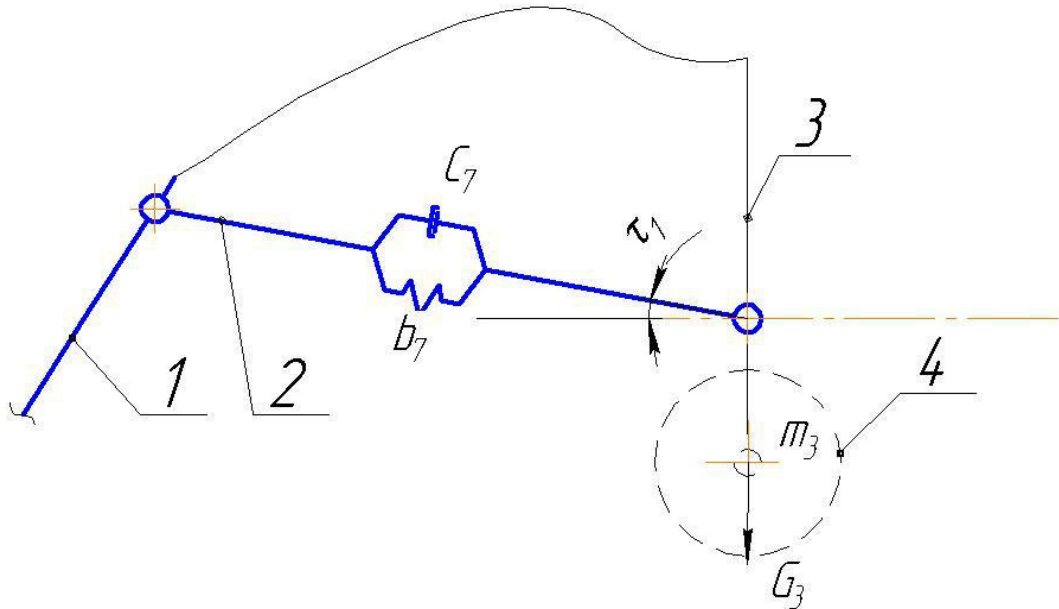


Рисунок 4.25 – Схема установки дополнительной связи, уравнивающего каната, где 1 – стрела, 2 – уравнивающий канат; 3 – грузовой каната; 4 – груз

Было установлено формула (4.19): чем ближе значение угла наклона уравнивающего каната к горизонтали $\tau_1 \rightarrow 0$, тем ниже колебательность.

$$\left. \begin{array}{l} \tau_1 \rightarrow 0; \\ \mu \rightarrow \min \end{array} \right\} \quad (4.19)$$

Это подтвердили результаты регрессионного анализа зависимостей колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната.

Таблица 4.15 – Результаты регрессионного анализа зависимостей колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната

$q_5=30^\circ$			$q_5=40^\circ$		
$l_3, \text{ м}$	$\mu=f(\tau_1)$	R^2	$l_3, \text{ м}$	$\mu=f(\tau_1)$	R^2
3,4	$\mu=0,414 \cdot \tau_1 + 51,34$	0,969	3,4	$\mu=0,354 \cdot \tau_1 + 56,11$	0,942
4,2	$\mu=0,549 \cdot \tau_1 + 44,29$	0,968	4,2	$\mu=0,453 \cdot \tau_1 + 52,91$	0,941
$q_5=50^\circ$			$q_5=60^\circ$		
$l_3, \text{ м}$	$\mu=f(\tau_1)$	R^2	$l_3, \text{ м}$	$\mu=f(\tau_1)$	R^2
3,4	$\mu=0,335 \cdot \tau_1 + 58,44$	0,981	3,4	$\mu=0,345 \cdot \tau_1 + 59,87$	0,971
4,2	$\mu=0,447 \cdot \tau_1 + 54,08$	0,998	4,2	$\mu=0,445 \cdot \tau_1 + 54,88$	0,993
$q_5=70^\circ$			$q_5=80^\circ$		
$l_3, \text{ м}$	$\mu=f(\tau_1)$	R^2	$l_3, \text{ м}$	$\mu=f(\tau_1)$	R^2
3,4	$\mu=0,303 \cdot \tau_1 + 62,29$	0,866	3,4	$\mu=0,305 \cdot \tau_1 + 63,86$	0,947
4,2	$\mu=0,402 \cdot \tau_1 + 58,18$	0,990	4,2	$\mu=0,364 \cdot \tau_1 + 60,01$	0,923

В инженерной методике, для длин грузового каната от 3,4 м до 4,2 м, рекомендуется выбор координаты крепления уравнивающего каната к стреле производить таким образом, чтобы угол наклона уравнивающего каната к горизонтали τ_1 стремился к нулю.

Выводы по главе

1. Сформулирован критерий эффективности процесса перемещения груза КТ, согласно которому, чем ниже колебательность груза, тем выше эффективность.

2. Проведенный анализ влияния координат крепления уравнивающего каната к стреле и грузовому канату на колебательность груза, привел к выводу, что координаты точек у основания стрелы (2,3;3,1;3,9), и координаты точек на конце грузового каната (3,4;4,2) позволяют добиться наиболее эффективной работы уравнивающего каната, т.к. значение колебательности в этих случаях близко к нулю. Влияние координат точек на конце грузового каната легко объясняется сокращением длины маятника, что будет справедливо для любой длины грузового каната. Вопрос влияния координат точек у основания стрелы, требует дополнительных исследований, для различных длин грузового каната.

3. Проведен анализ зависимостей колебательности груза от координат крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната.

4. Проведен оптимизационный синтез параметров уравнивающего каната, полученные зависимости, позволяют определить оптимальное значение координат крепления уравнивающего каната, для рассмотренного диапазона длин грузового каната и углов наклона стрелы.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИНЖЕНЕРНЫЕ РАЗРАБОТКИ

Для эффективной работы крана-трубоукладчика в колонне, необходимо снизить неуправляемые колебания груза на стреле крана-трубоукладчика, что позволит свести к минимуму вероятность аварийных ситуаций, возникающих вследствие колебаний груза на стреле.

Реализация вышеуказанных требований может быть достигнута за счет применения на типовых кранах-трубоукладчиках следующих инженерных решений:

1. Уравновешивающий канат, обеспечивающий снижение неуправляемых колебаний груза, перемещаемого краном-трубоукладчиком за счет ограничения амплитуды колебания груза на стреле.

2. Демпфирующая рама, позволяющая задержать стрелу и груз при их взаимном ударе.

5.1 Уравновешивающий канат

При работе КТ в колонне, существуют различные причины, приводящие к колебаниям груза на стреле, что негативно влияет на устойчивость КТ и повышает вероятность возникновения аварийных и нестандартных ситуаций [86, 67]. Для решения данной проблемы необходима установка дополнительного устройства, позволяющего снизить амплитуду колебаний груза на стреле КТ [17].

Было предложено устройство уравновешивающий канат, защищенное патентом на полезную модель РФ № 158094 [45]. Устройство позволяет снизить амплитуду колебаний груза на стреле КТ [69].

Указанный технический результат достигается за тем, что на типовой КТ, содержащий: базовый трактор, стрелу, лебедку грузового каната и лебедку подъема стрелы, грузовой канат, грузовой полиспафт, грузозахватное устройство,

груз, с целью снижения амплитуды колебаний груза, на стреле шарнирно закреплены направляющие блоки, а на базовом тракторе установлена дополнительная канатная лебедка, уравнивающий канат которой проходит через направляющие блоки, установленные на стреле, и крепится к грузозахватному устройству [45].

Полезная модель поясняется рисунком 5.1, где: 1 – базовый трактор, 2 – стрела, 3 – лебедка грузового каната и лебедка подъема стрелы, 4 – грузовой канат, 5 – грузовой полиспасть, 6 – грузозахватное устройство, 7 – груз, 8 – дополнительная канатная лебедка, 9 – уравнивающий канат, 10 – направляющие блоки, шарнирно закрепленные на стреле [45].

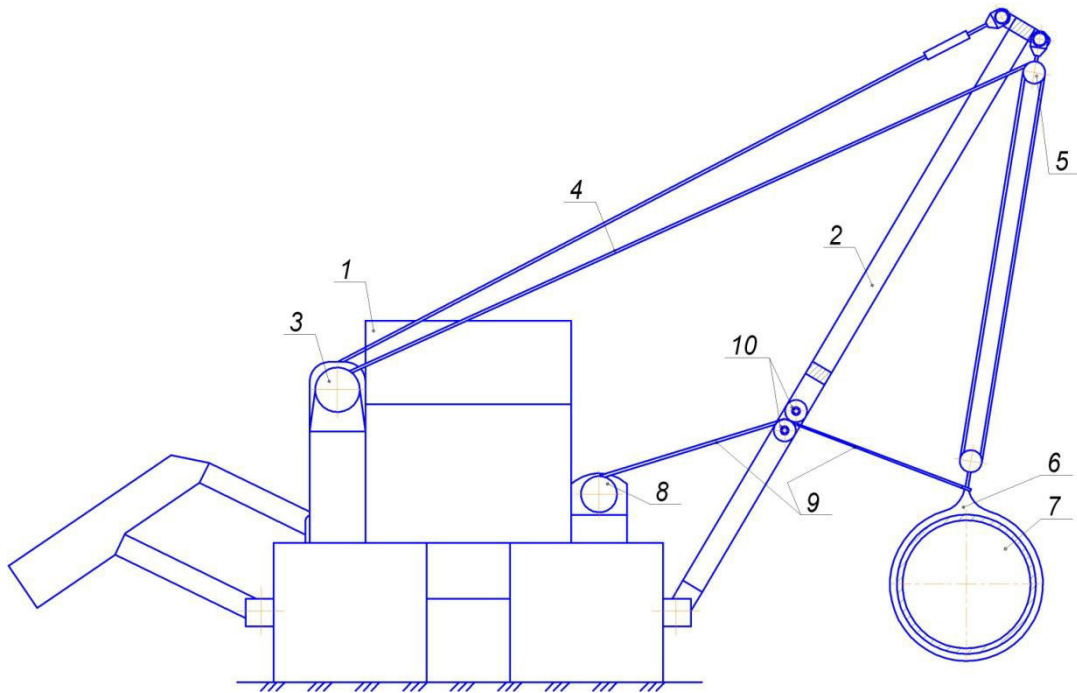


Рисунок 5.1 – Патент на полезную модель №158094 [45].

Уравнивающий канат 9, проходя через направляющие блоки 10, крепится к грузозахватному устройству снижая тем самым амплитуду колебаний груза на стреле. Такой принцип работы позволяет снизить амплитуду колебания груза на стреле за счет ограничения его степени свободы [45].

В целях повышения эффективности работы вышеизложенного инженерного решения, была предложена новая конструкция (рисунок 5.2) [47].

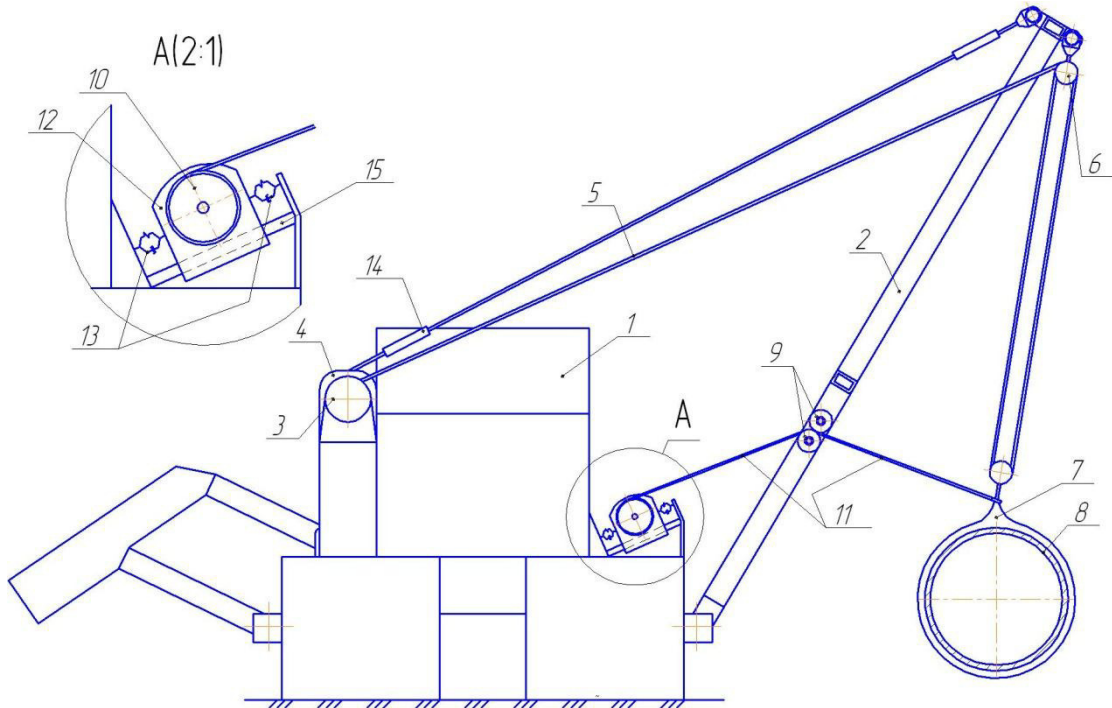


Рисунок 5.2 – Патент на полезную модель №180279 [47].

Устройство отличающаяся тем, что дополнительная канатная лебедка 10 установлена на подвижном основании 12, способном перемещаться по направляющим 15, жестко установленными на базовом тракторе 1. Упруго вязкие тела 13 закреплены на подвижном основании 12, вторые концы которых соединены с базовым трактором, что позволяет демпфировать малые колебания, за счет перемещения основания 12 по направляющим 15.

Такой принцип действия позволяет гасить колебания с большой амплитудой за счет вращения дополнительной канатной лебедки 10.

5.2 Демпфирующая рама

В процессе строительства магистральных трубопроводов КТ применяется в следующих видах работ: транспортировка, погрузка и разгрузка труб и плетей, сварочно-монтажные работы, укладка трубопровода в траншею, другие подъемно-транспортные операции. В ходе выполнения данных работ существует риск удара трубы о стрелу КТ. Что может привести к повреждению изоляции трубопровода и выходу из строя стрелы КТ [86, 74] Для решения данной

проблемы необходима установка дополнительного устройства, позволяющего защитить стрелу и груз от повреждения в случаи удара.

Было предложено устройство демпфирующая рама, защищенное патентом на полезную модель РФ № 158181 [46]. Устройство позволяет защитить стрелу крана-трубоукладчика от удара, подвешенного на ней груза и снизить амплитуду колебаний, возникающих после удара [46].

Указанный технический результат достигается за тем, что на типовой КТ, содержащий: базовый трактор, стрелу, грузовой канат, полиспаст, крюковую обойму, груз, демпфирующую раму, верхний конец которой шарнирно закреплен на стреле крана-трубоукладчика, нижний конец демпфирующей рамы шарнирно соединен со штоком демпфирующего гидроцилиндра, шарнирно закрепленного на стреле, поршневая полость демпфирующего гидроцилиндра соединена двумя параллельными гидролиниями с гидропневоаккумулятором, в гидролинию зарядки гидропневоаккумулятора установлен обратный клапан, впускающий жидкость в гидропневоаккумулятор, а в гидролинию разрядки гидропневоаккумулятора установлен встречно включенный обратный клапан, выпускающий жидкость из гидропневоаккумулятора, и последовательно соединенный с ним регулируемый дроссель [46].

Полезная модель поясняется рисунком 5.3, где: 1 – демпфирующая рама, 2 – демпфирующий гидроцилиндр, 3 – гидролиния зарядки гидропневоаккумулятора, 4 - гидролиния разрядки гидропневоаккумулятора, 5,7 – обратные клапаны, 6 – регулируемый дроссель, 8 – гидропневоаккумулятор, 9 – груз, 10 – базовый трактор, 11 – грузовой полиспаст, 12 – крюковая обойма, 13 – стрела, 14 – грузовой канат.

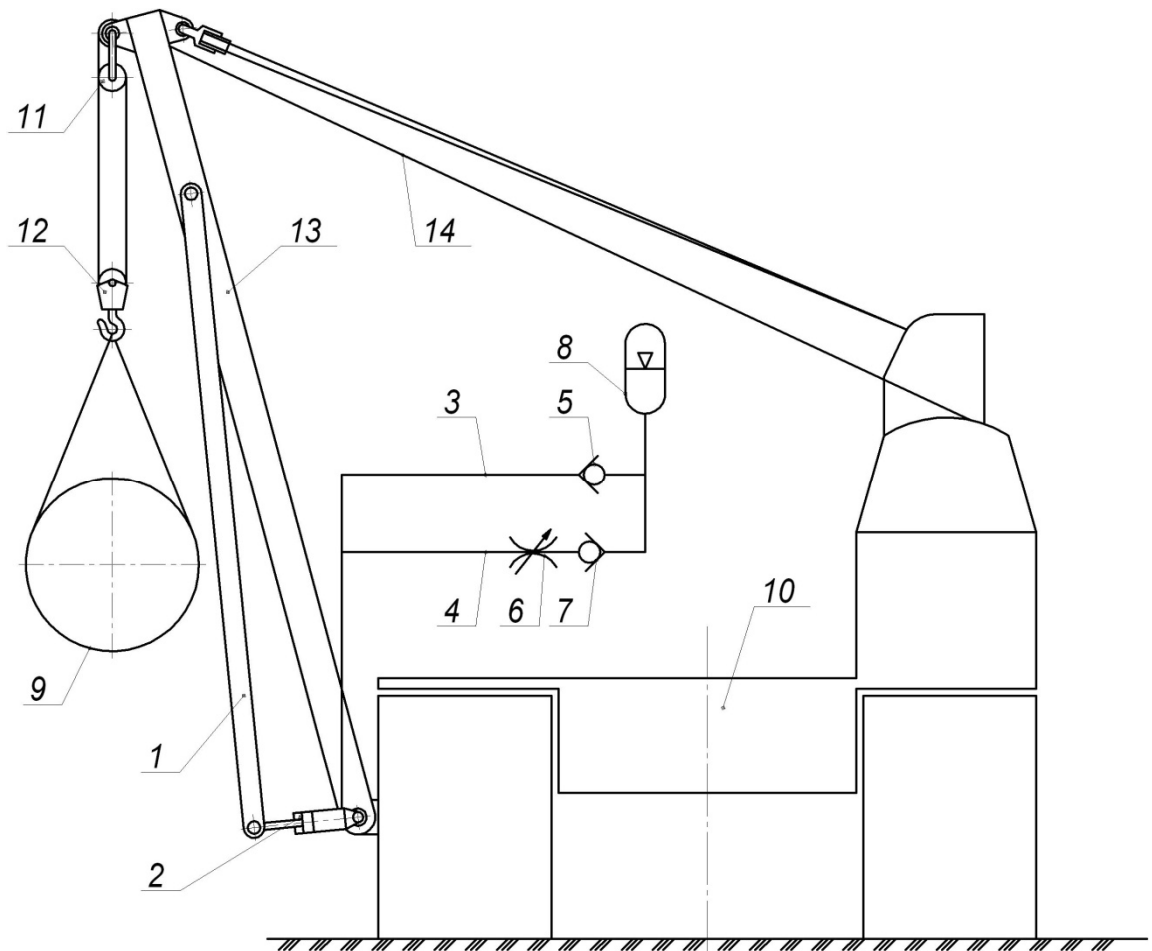


Рисунок 5.3 – Патент на полезную модель №158181 [46].

Данная полезная модель работает следующим образом: при ударе груза 9 о демпфирующую раму 1 шток демпфирующего гидроцилиндра вытесняет рабочую жидкость из поршневой полости, по гидрролинии 3 зарядки гидропневмоаккумулятора, через обратный клапан 5 в гидропневмоаккумулятор 8, после снятия нагрузки жидкость из гидропневмоаккумулятора 8 по гидрролинии разрядки 4 гидропневмоаккумулятора, через обратный клапан 7 и регулируемый дроссель 6 поступает обратно, в поршневую полость демпфирующего гидроцилиндра 2, возвращая этим демпфирующую раму 1 в исходное состояние. Работа по гашению колебаний производится за счет изменения давления газа в гидропневмоаккумуляторе и рассеивании энергии в регулируемом дросселе 6 [46].

Такой принцип действия полезной модели позволяет эффективно гасить колебания подвешенного груза 9 после его удара о демпфирующую раму 1 [46].

5.3 Экспериментальные исследования переходной характеристики груза

Экспериментальные исследования переходной характеристики груза на стреле КТ, оснащенного модернизированным рабочим оборудованием (УК), необходимы для подтверждения адекватности математической модели. Адекватность модели, как способность с необходимой точностью отражать характеристики исследуемого объекта [87]. Адекватность подтверждается сравнением результатов, полученных при математическом моделировании с экспериментальными данными. Допустимым расхождением в данной работе считается 15% [31].

При рассмотрении сложной динамической системы КТ – микрорельеф – груз важно учитывать упруго вязкие свойства уравнивающего каната, как дополнительной связи между грузом и КТ, оказывающей существенное влияние на снижение колебаний груза на стреле. С целью подтверждения адекватности математической модели крана и уточнения численных значений коэффициентов упруго-вязкого тела Фохте, описывающего упруго-вязкие свойства уравнивающего каната, в ФГБОУ ВО «СибАДИ» в специализированной лаборатории кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» был проведен эксперимент на мостовом кране (рисунок 5.4).



а)



б)

Рисунок 5.4 – Проведение экспериментальных исследований колебания груза

Суть эксперимента заключалась в следующем: груз (96 кг), подвешивался при помощи двух канатов, согласно схеме (рисунок 5.5). Длина уравновешивающего каната выбиралась из условия наличия начальной силы натяжения. Грузу сообщалось начальное отклонение (9° от вертикали). Полученные колебания груза, на фоне планшета, снимались на видеокамеру с частотой кадров 50 кадров в секунду. По полученной видеозаписи фиксировалась временная зависимость, отклонения груза в вертикальной плоскости.

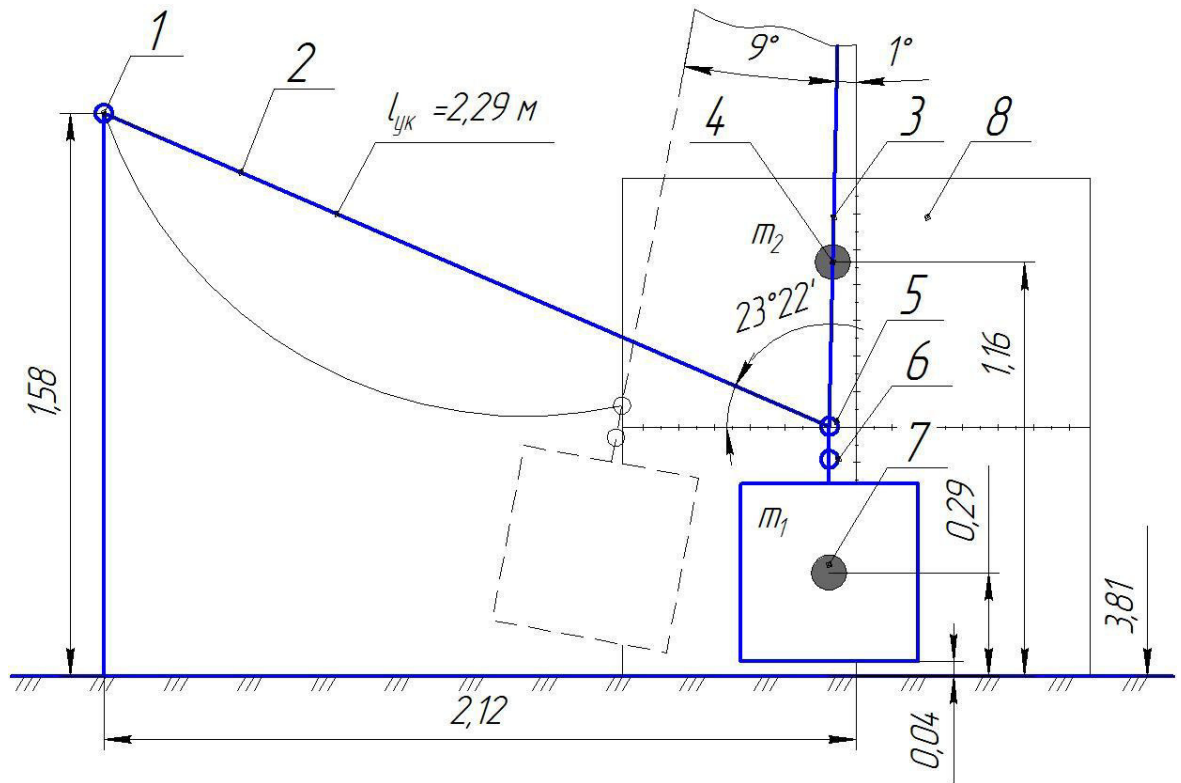


Рисунок 5.5 – Схема проведения экспериментальных исследований колебания груза

На рисунке 5.5 изображена схема проведения эксперимента где: 1 – точка крепления; уравнивающего каната к опоре; 2 – уравнивающий канат; 3 – грузовой канат; 4 – масса грузовой подвески; 5 – точка крепления уравнивающего каната к грузовому канату; 6 – наблюдаемая точка; 7 – груз; 8 – планшет. Размеры указанные на схеме (Рисунок 5.5) соответствуют следующим размерам в математической модели: угол наклона стрелы $q_5=52^\circ 25'$, длина грузового каната 3,52 м, координата крепления уравнивающего каната к стреле $l_2=3,52$ м, координата крепления уравнивающего каната к грузовому канату $l_3=3,11$ м,

Необходимое число измерений определялось из следующего неравенства формула (5.1) [59]. Принимая допущение, что среднеквадратическое отклонение σ по величине равно значению доверительного интервала δ , получим следующее условие:

$$n \geq t_{\alpha}^2, \quad (5.1)$$

где t_{α} – критерий Стьюдента, значение которого подбирается по таблице приложения №4 [60] учитывая выбранный уровень значимости $\alpha=0,05$.

Таким образом, путем подбора критерия Стьюдента t_{α} число измерений, при доверительной вероятности $P=0,95$ и уровне значимости $\alpha=0,05$, составляет 5, что удовлетворяет условию (5.2)

$$5 \geq 2.015^2 \quad (5.2)$$

Измерительным прибором, в ходе эксперимента служил планшет с миллиметровой бумагой, диапазон измерения по горизонтали от 0 до 0,9 м (-0,45;0;0,45), по вертикали от 0 до 1,2 м (-0,6;0;0,6), точность 0,001 м.

В таблице 5.1 в качестве примера приведена часть результатов экспериментальных исследований. С целью исключения грубых ошибок для полученных данных были рассчитаны, согласно методике указанной во 2 главе, математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение, также представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 Результаты экспериментальных исследований

		1	2	3	4	5	6	7	8
Измер. №1	t, с	0,00	1,62	2,41	3,78	4,82	6,05	7,33	8,55
	$l_{гр.э}$, м	3,55	4,42	3,70	4,30	3,91	4,30	4,00	4,25
Измер. №2	t, с	0,00	1,61	2,37	3,79	4,77	6,02	7,33	8,48
	$l_{гр.э}$, м	3,55	4,35	3,77	4,25	3,97	4,24	4,05	4,19
Измер. №3	t, с	0,00	1,60	2,32	3,80	4,72	5,99	7,32	8,40
	$l_{гр.э}$, м	3,55	4,40	3,72	4,29	3,93	4,29	4,01	4,24
Измер. №4	t, с	0,00	1,59	2,28	3,80	4,66	5,96	7,32	8,33
	$l_{гр.э}$, м	3,55	4,37	3,75	4,26	3,96	4,26	4,04	4,24
Измер. №5	t, с	0,00	1,58	2,23	3,81	4,61	5,93	7,31	8,25
	$l_{гр.э}$, м	3,55	4,39	3,74	4,28	3,94	4,27	4,03	4,22
	m_x	3,55	4,385	3,735	4,275	3,94	4,27	4,025	4,2275
	D_x	0	0,000766	0,000766	0,000391	0,000562	0,000562	0,000391	0,000562
	σ_x	0	0,02767	0,02767	0,019764	0,023717	0,023717	0,019764	0,023717
	Расхождение, %	0	7,61	7,12	6,93	7,44	7,70	7,41	7,9

Полученные в результате киносъемки точки были нанесены на переходную характеристику, полученную при помощи математической модели (рисунок 5.6).

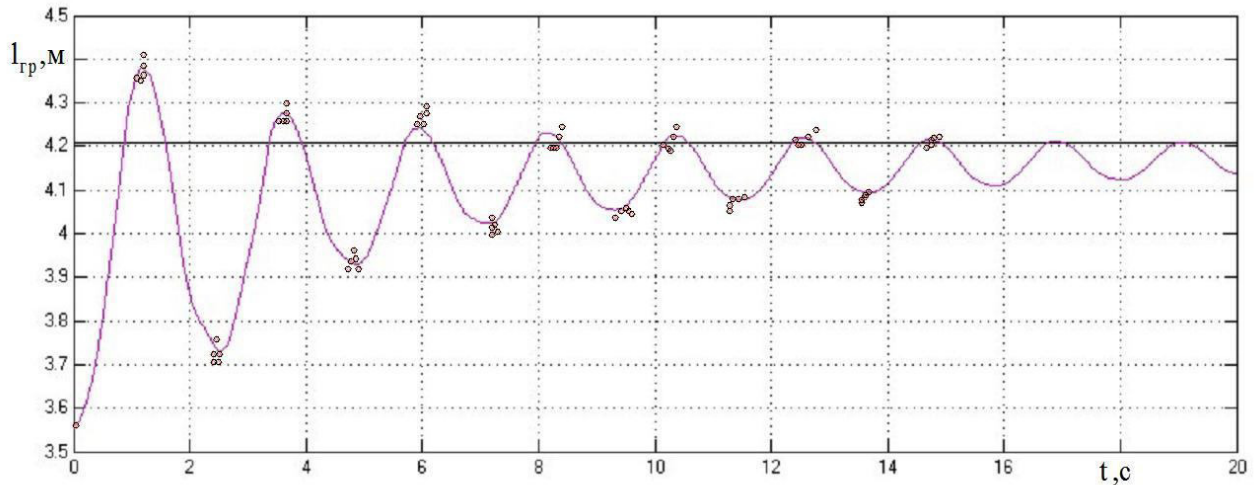


Рисунок 5.6 – График переходного процесса груза при использовании уравновешивающего каната (при условии, что масса груза $m_3 = 95$ кг; угол наклона стрелы $q_5 = 52^\circ$; длина грузового каната $l_{4,3} = 3,94$ м; $l_2 = 3,52$ м; $l_5 = 3,64$ м; $q_6(0) = -9^\circ$; $\dot{q}_6(0) = 0$ рад/с)

Как видно из рисунка 5.6 и таблицы 5.1, расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 8% (при допустимых 15%), что позволяет сделать вывод об адекватности математической модели КТ, оснащенного модернизированным рабочим оборудованием.

С целью проведения сравнительного анализа эффективности работы инженерного решения, эксперимент был проведен для случая свободно весящего груза, без уравновешивающего каната, полученные данные приведены в Таблица 5.2

Таблица 5.2 Результаты экспериментальных исследований

		1	2	3	4	5	6	7	8
Измер. №1	t, с	0,00	2,28	4,25	6,20	8,19	10,12	12,06	14,01
	$l_{гр.э}$, м	3,55	4,91	3,61	4,92	3,71	4,85	3,72	4,78
Измер. №2	t, с	0,00	2,12	4,09	6,04	8,02	9,96	11,93	13,87
	$l_{гр.э}$, м	3,55	4,80	3,58	4,81	3,68	4,78	3,69	4,74
Измер. №3	t, с	0,00	2,18	4,14	6,10	8,08	10,02	11,97	13,92
	$l_{гр.э}$, м	3,55	4,88	3,60	4,89	3,70	4,83	3,71	4,77

Измер. №4	t, с	0,00	2,16	4,13	6,08	8,06	10,00	11,96	13,90
	$l_{гр.э}, м$	3,55	4,83	3,59	4,84	3,69	4,80	3,70	4,78
Измер. №5	t, с	0,00	2,07	4,03	5,99	7,96	9,91	11,88	13,82
	$l_{гр.э}, м$	3,55	4,86	3,60	4,87	3,70	4,82	3,71	4,76
m_x		3,55	4,855	3,595	4,865	3,695	4,815	3,705	4,765
D_x		0	0,001891	0,00014	0,001891	0,000141	0,000766	0,000141	0,00025
σ_x		0	0,043481	0,01186	0,043481	0,011859	0,02767	0,011859	0,015811
Расхождение, %		0	7,26	7,80	7,15	7,92	7,71	6,01	6,16

Полученные в результате киносъемки точки были нанесены на переходную характеристику, полученную при помощи математической модели (рисунок 5.7).

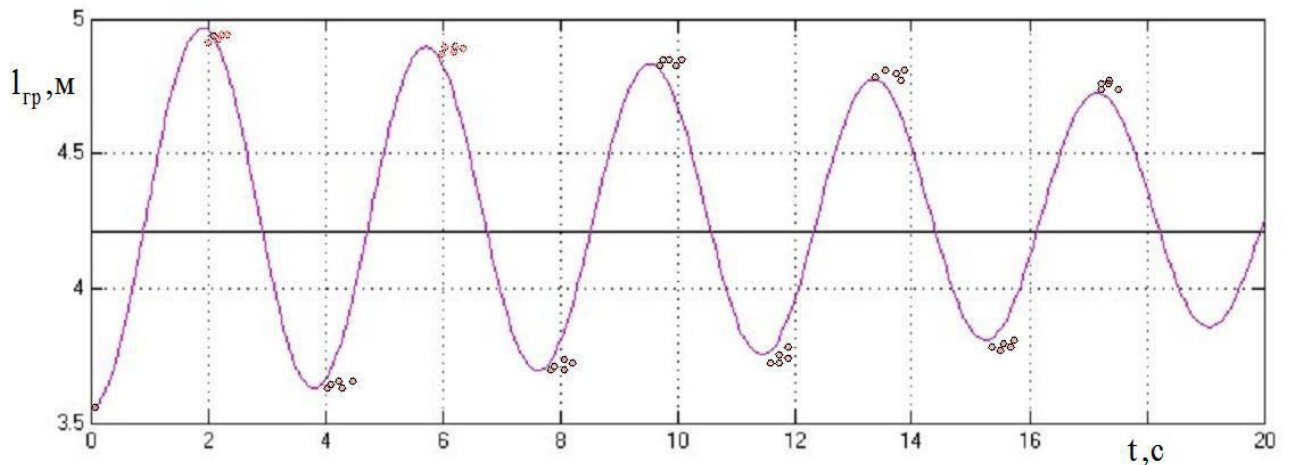


Рисунок 5.7 – График переходного процесса груза без использования уравнивающего каната (при условии, что масса груза $m_3 = 95$ кг; угол наклона стрелы $q_5 = 52^\circ$; длина грузового каната $l_{4,3} = 3,94$ м; $q_6(0) = -9^\circ$; $\dot{q}_6(0) = 0$ рад/с)

Для каждого случая было посчитано среднее значение колебательности, с применением уравнивающего каната 58,49% и без 93,99 %, откуда следует, что для данного расчетного случая применение уравнивающего каната позволило снизить колебательность груза на 35,5%.

5.4 Инженерная методика оптимизации параметров модернизированного рабочего оборудования крана–трубоукладчика

Проведенные в работе исследования легли в основу инженерной методики оптимизации параметров модернизированного рабочего оборудования КТ. Методика заключается в следующем:

1. Для имеющейся математической модели КТ, оснащенного модернизированным рабочим оборудованием, определяются значения постоянных параметров:

а) длина базы Z_1 , ширина базы X_1 , длина стрелы $X_{2\text{стр}}$, длина грузового каната X_3 , масса базовой машины m_1 , масса стрелы m_2 , масса груза m_3 , угол наклона стрелы q_5 , координаты центров масс звеньев, осевые и центробежные моменты инерции $J_{ix}, J_{iy}, J_{iz}, J_{ixy}, J_{ixz}, J_{izy}$;

2. Определяются диапазон и шаг изменения оптимизируемых параметров, координат крепления уравнивающего каната к стреле:

а) диапазон и шаг изменения координаты крепления к стреле $l_2(l_{2\text{min}}; \Delta l_2; l_{2\text{max}})$;

б) диапазон и шаг изменения длины грузового каната $l_3(l_{3\text{min}}; \Delta l_3; l_{3\text{max}})$;

3. Проводятся вычисления на ПК. Оптимизируются параметры модернизированного рабочего оборудования по критерию эффективности $K_{\text{Э}}$, составляется массив зависимостей значений $K_{\text{Э}}$ по оптимизируемым параметрам l_2, l_3 .

4. Проводится аппроксимация полученных численных значений $K_{\text{Э}}$ от l_2, l_3 методом наименьших квадратов.

5. Проводится оптимизация параметра l_2 для требуемого значения l_3 по полученным регрессионным зависимостям ($K_{\text{Э}}(l_2, l_3)$).

6. Вывод результата, оптимального значения l_2 .

На рисунке 5.8 представлена блок-схема алгоритма методики.

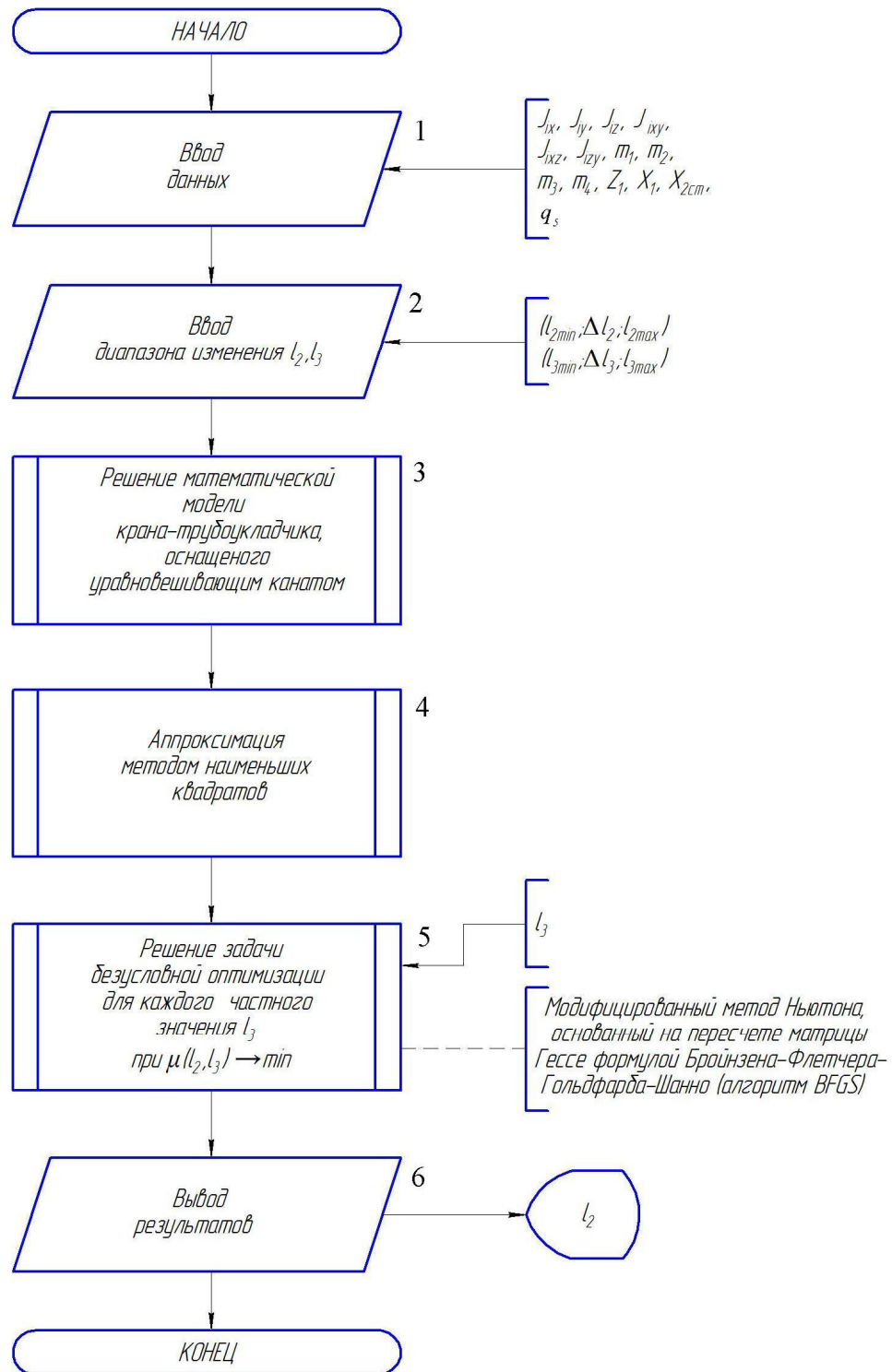


Рисунок 5.8 – Алгоритм инженерной методики, выбора оптимальных параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика

Данная методика позволяет определить оптимальные значения координат крепления уравновешивающего каната к стреле и грузовому канату, для заданных параметров КТ.

Выводы по главе

1. Разработано устройство для снижения амплитуды колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика, уравнивающий канат, а так же способ установки дополнительной канатной лебедки, уравнивающего каната.
2. Разработано устройство, демпфирующая рама, позволяющее защитить стрелу от удара о нее груза и эффективно гасить возникающие после удара колебания.
3. Экспериментальные исследования подтверждают адекватность разработанной математической модели процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием.
4. Разработана инженерная методика оптимизации основных параметров уравнивающего каната, позволяющая определить оптимальные значения координат крепления уравнивающего каната к стреле и грузовому канату.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Проведенный анализ существующих инженерных решений, направленных на снижение негативного влияния колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика, позволил разработать новый подход к снижению неуправляемых колебаний перемещаемого груза.

2. Разработана математическая модель процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием, позволяющая решить задачи анализа и синтеза оптимальных значений параметров модернизированного рабочего оборудования, оказывающих влияние на снижение неуправляемых колебаний груза.

3. Обоснованный критерий эффективности процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием, позволяет оценить эффективность инженерных решений по снижению неуправляемых колебаний груза.

4. Выявленные зависимости критерия эффективности от конструктивных параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика позволяют оптимизировать значения параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика.

5. Разработаны инженерные решения и методика выбора оптимальных конструктивных параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика, которые позволяют снизить неуправляемые колебания груза за счет снижения амплитуды колебаний груза на стреле. (Колебательность, в зависимости от расчетного случая, снижается в среднем на 35%).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КТ – кран-трубоукладчик;

СУ – система управления;

ДУГ – датчик угла поперечного наклона;

УК – уравнивающий канат;

ПК – персональный компьютер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1652289 СССР, МКИз В 66 С 23/90. Устройство для автоматического управления грузовой лебедкой трубоукладчика / В.С.Щербаков, В.Ф.Раац, А.А.Руппель, Е.И.Романов, В.В.Шмидт (СССР). – N 4442264/11; заявл. 15.06.88; опубл. 30.05.91, Бюл. N 20. – 4 с.
2. А.с. 177056 СССР, МПК В 66С. Ограничитель нагрузки на стреле трубоукладчика / А.Л.Липович (СССР). – № 920930/29-14; заявл. 12.09.64; опубл. 01.12.65, Бюл. № 24. – 4 с.
3. А.с. 226814 СССР, МПК В 66 С 3/16. Устройство для автоматического регулирования нагрузки крана-трубоукладчика / Д.Я.Паршин, М.Э.Шошиашвили, Г.Г.Гудиков (СССР). – № 4371330/24-24; заявл. 27.01.88; опубл. 07.01.90, Бюл. № 1. – 4 с.
4. А.с. 796183 СССР, МПК5 В66 С23/88, В66 С13/42. Устройство для контроля грузового момента крана-трубоукладчика / В.С.Щербаков, В.Ф.Раац, А.А.Руппель, Д.С.Матвейчук, С.В.Разоренов, Г.В.Кузьмин (СССР). – № 4236269/27-11; заявл. 27.04.87; опубл. 07.03.89, Бюл. № 9. – 4 с.
5. Амелькин, Н.И. Динамика твердого тела/ Н.И. Амелькин. – М., 2012.
6. Байкалов, А.Ф. Совершенствование системы стабилизации положения отвала рабочего органа, с целью повышения эффективности профилировочных работ : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Байкалов Александр Федорович. – Омск : СибАДИ, 1981. – 197 с.
7. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1994. – 432с.
8. Беляев, В.В. Повышение точности планировочных работ автогрейдерами с дополнительными опорными элементами рабочего органа : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Беляев Владимир Владимирович. – Омск : СибАДИ, 1987. – 266 с.
9. Ващук, И.М. Трубоукладчики / И.М. Ващук, В. И. Уткин, Б.И. Харкун. – М. : Машиностроение, 1989. – 184 с.

10. Габелая, Р.Д. Исследование повышения групповой устойчивости трубоукладчиков при укладке магистральных стальных трубопроводов больших диаметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.07 / Габелая Резо Дементьевич. – М. : МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1974. – 128 с.

11. Гальперин, А.И. Краны-трубоукладчики / А. И. Гальперин. – М. : Машгиз, 1961. – 163 с.

12. Гальперин, А.И. Некоторые вопросы расчета трубоукладчиков / А.И.Гальперин, В.А.Славов, В.К.Андриенко // Труды ВНИИСТ. – М., 1963. – Вып.15. – С. 23–25.

13. Гальперин, А.И. Статические свойства макропрофиля пути в условиях бездорожья / А.И.Гальперин, С.М.Крайзельман // Труды ВНИИСтройдормаш. – 1964. – №11. – С. 11–13.

14. Гальперин, А.И. Строительно-монтажные машины : учебник для техникумов / А.И.Гальперин. – М. : Недра, 1982. – 214 с.

15. Горбатиков В.А., Соколов С.М., Пальянов П.А. Проектирование обустройства нефтяных месторождений и его научное обоснование// Нефтяное хозяйство. 2005. №9. С. 114-119.

16. Гроше, Г. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов : пер. с нем. Г.Гроше, В.Циглер. – М. : Наука, 1980. – 976 с.

17. Демпфирующее устройство крана-трубоукладчика/ В.В. Танский // Материалы Международной научно-практической конференции Сибирского Федерального Университета «Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства», г. Красноярск 2016. – С. 325 – 327.

18. Дудоладов, Ю.А. Исследование повышения устойчивости трубоукладчиков : дис. ...канд. техн. наук: 05.05.04 / Дудоладов Юрий Анатольевич. – М., 1966. – 251 с.

19. Дудоладов, Ю.А. Исследование повышения устойчивости трубоукладчиков : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Дудоладов Юрий Анатольевич. – М., 1966. – 215 с.

20. Дудолодов, Ю.А. Нагрузки и устойчивость трубоукладчиков в статических и динамических режимах работы / Ю.А.Дудолодов // Научно-технический обзор. – М. : ВНИИЭГазпром, 1972. – С. 31–34.

21. Загороднюк, Е.В. Математическое моделирование систем управления трубоукладочными робототехническими комплексами для строительства газопроводов : дис. ... канд. техн. наук: 05.02.05 / Загороднюк Елена Вячеславовна. – Новочеркасск, 2000. – 176 с.

22. Кершенбаум, Н.Я. Зависимость усилий на крюке трубоукладчиков от параметров изогнутой плети / Н.Я.Кершенбаум, Ю.Б.Петраков // Строительство трубопроводов. – 1969. – №9. – С. 15–18.

23. Комаров, Д.Б. Кинематический анализ подвески рабочего органа манипулятора для монтажа раструбных трубопроводов / Д.Б. Комаров// Гидропривод и системы управления строительных и дорожных машин. – Омск : ОмПИ, 1986. – С. 72 - 73.

24. Коновалов, В.Ф. Динамическая устойчивость тракторов / В.Ф.Коновалов. – М. : Машиностроение, 1981. – 144 с.

25. Корчагин, П. А. Совершенствование одноковшового экскаватора с целью снижения динамического воздействия на рабочее место человека-оператора (на примере экскаватора второй размерной группы) : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Корчагин Павел Александрович. – Омск : СибАДИ, 1997. – 188 с.

26. Кoryтов М.С. Автоматизация оптимальных траекторий перемещения грузов мобильными грузоподъемными кранами в неоднородном организованном трехмерном пространстве : монография / М.С. Кoryтов; СибАДИ. – Омск: СибАДИ, 2012. – 380 с.

27. Кoryтов, М. С. Разработка методов измерения массы материала в ковше и запаса устойчивости фронтального погрузчика : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Кoryтов Михаил Сергеевич. – Омск : СибАДИ, 1999. – 226 с.

28. Кoryтов, М.С. Система автоматизации и моделирования стреловых грузоподъемных кранов : монография / М.С. Кoryтов, В.С. Щербаков, С.В. Котькин. – Омск : СибАДИ, 2012. – 143 с.

29. Корятов, М.С. Статическая и динамическая устойчивость фронтальных погрузчиков : монография / М.С. Корятов, В.С. Щербаков. – Омск: СибАДИ, 1998. – 100 с.
30. Куляшов, А.П. Нагрузки, действующие на трубоукладчики при выполнении технологического процесса / А.П.Куляшов, И.А.Тютнев // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 1. – С. 148–152.
31. Лазута, И.В. Система автоматизации проектирования устройства управления рабочим органом бульдозерного агрегата : дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 / Лазута Иван Васильевич. – Омск, 2010. – 149 с.
32. Липович, А.Л. Новые трубоукладчики для строительства трубопроводов / А.Л.Липович, Ц.С.Хайтович // Строительные машины, механизмы и оборудование в газовой промышленности : науч. техн. обзор ВНИИЭГазпром. – М., 1970. – С. 60–64.
33. Липович, А.Л. Пути снижения неравномерности нагружения трубоукладчиков в изоляционно-укладочной колонне / А.Л.Липович // Механизация строительства : реф. сб. ВНИИЭГазпром. – 1969. – №1. – С. 23–27.
34. Лобановский, М.Г. Исследование работы электромеханического ограничителя грузоподъемности в зависимости от динамической устойчивости стреловых кранов : дис. ...канд. техн. наук / Лобановский Максим Геннадьевич. – М., 1961. – 247 с.
35. Любченко, Е.А. Планирование и организация эксперимента : учебное пособие. Часть 1 / Е.А.Любченко, О.А.Чуднова. – Владивосток : Изд-во ТГЭУ, 2010. – 156 с.
36. Малиновский Е.Ю. Математическое моделирование в исследовании строительных машин / Е.Ю. Малиновский, Л.Б. Зарецкий Л.Б. – М., 1966. – 113 с.
37. Математические основы теории автоматического регулирования / под ред. Б.К. Чемоданова. – М. : Высшая школа, 1977. – 366 с.
38. Механика промышленных роботов : учеб. пособие для вузов: в 3 кн. / под ред.: К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. – М. : Высшая школа, 1988. – 367 с.

39. Минкин М.А. Особенности обустройства нефтяных и газовых месторождений России и основания и фундаменты зданий и сооружений / М.А. Минкин, О.А. Потапова // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2006. – №1. – С. 180 – 187.

40. Пархиловский, И.Г. Сравнительный анализ вероятностных характеристик микропрофиля дорог / И.Г.Пархиловский // Автомобильная промышленность. – 1969. – № 4. – С. 52–54.

41. Пат. 131 371 Российская Федерация, МПК В66С23/88. Кран-трубоукладчик / Щербаков В.С., Шабалин А.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2013115403/11; заявл. 01.04.2013; опубл. 20.08.2013. Бюл. №23. – 2 с.

42. Пат. 140 144 Российская Федерация, МПК В66С23/88. Кран-трубоукладчик / Щербаков В.С., Шабалин А.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2013155120/11; заявл. 11.12.2013; опубл. 27.04.2014. Бюл. №12. – 2 с.

43. Пат. 140 492 Российская Федерация, МПК В66С23/88. Кран-трубоукладчик / Щербаков В.С., Шабалин А.Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2013155099/11; заявл. 11.12.2013; опубл. 10.05.2014. Бюл. №13. – 2 с.

44. Пат. 146 007 Российская Федерация, МПК В66С23/88. Кран-трубоукладчик / Щербаков В.С., Шабалин А.Н., Корытов М.С.; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-

дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2014117386/11; заявл. 29.04.2014; опубл. 27.09.2014. Бюл. №27. – 2 с.

45. Пат. 158 094 Российская Федерация, МПК В66С23/26. Кран-трубоукладчик / Щербаков В.С., Корытов М. С., Танский В.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2015120191/11; заявл. 27.05.2015; опубл. 20.12.2015. Бюл. №35. – 2 с.

46. Пат. 158 181 Российская Федерация, МПК В66С23/26. Кран-трубоукладчик / Щербаков В.С., Танский В.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU); № 2015120193/11; заявл. 27.05.2015; опубл. 20.12.2015. Бюл. №35. – 2 с.

47. Пат. 180 279 Российская Федерация, МПК В66С23/44. Кран-трубоукладчик / Щербаков В.С., Сухарев Р.Ю., Танский В.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)" (RU); № 2017140125; заявл. 17.11.2017; опубл. 07.06.2018. Бюл. №16. – 2 с.

48. Перчиковский, Е.И. Исследование и совершенствование метода стабилизации рабочей нагрузки на крюке трубоукладчика при сооружении магистральных трубопроводов большого диаметра : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Перчиковский Евгений Иванович. – М., 1970. – 137 с.

49. Петраков, Ю.Б. Теоретические и экспериментальные исследования режимов нагружения кранов-трубоукладчиков : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Петраков Юрий Борисович. – М., 1970. – 131 с.

50. Петров, И.П. Расстановка механизмов и выбор типа трубоукладчиков при производстве изоляционно-укладочных работ на трубопроводах большого диаметра / И.П.Петров, К.И.Калошин // Труды ВНИИСТ. – М. : 1968. – Вып.15. –

С. 86–90.

51. Петров, И.П. Расчет напорных стальных трубопроводов на прочность / И.П.Петров, А.Г.Камерштейн, В.К.Долгов. – М. : Госстройиздат, 1955. – 166 с.

52. Пивцаев, А.Н. Исследование экскаватора с активным рабочим органом с целью снижения динамических воздействий на человека-оператора : дис... канд. техн. наук : 05.05.04 / Пивцаев Анатолий Николаевич. – Омск: СибАДИ, 1982. – 223 с.

53. Пивцаев, А.Н. Математическая модель экскаватора / А.Н. Пивцаев, В.С. Щербаков. – Омск, 1982. – 43 с.

54. Пол, Р. Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора : пер. с англ. Р.Пол. – М. : Наука, 1976. – 104 с.

55. Попов, М.Ю. Особенности эксплуатации стреловых кранов и кранов-трубоукладчиков в режиме перемещения с грузом в условиях промышленного бездорожья/ М.Ю. Попов, С.П. Осипов // Механизация строительства. – 2013. – № 11 (833). – С. 22 – 25.

56. Портнова, А.А. Совершенствование рулевого управления автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Портнова Александра Андреевна. – Омск : СибАДИ, 2015. – 191 с.

57. Раац, В.Ф. Совершенствование систем управления грузоподъемным механизмом трубоукладчика с целью повышения эффективности укладочной колонны : дис. ...канд.техн.наук: 05.05.04 /Раац Виктор Фердинантович. – Омск : СибАДИ, 1989. – 231 с.

58. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / под ред. Е.Ю.Малиновского. – М. : Машиностроение, 1980. – 216 с.

59. Реброва И.А. Планирование эксперимента: учеб. пособие для вузов / И.А. Реброва : – Омск: СибАДИ, 2010. – 105 с.

60. Реброва, И.А. Теория планирования эксперимента учеб. пособие для вузов / И.А. Реброва // Омск: СибАДИ, 2016. – 106 с.

61. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9 кн. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств : учеб. пособие для вузов / С.В.Пантюшин, В.М.Назаретов,

О.А.Тягунов и др.; под ред. И.М.Макарова. – М. : Высшая школа, 1986. – 175 с.

62. Руппель, А.А. Повышение точности разработки грунта одноковшовым экскаватором с гидроприводом : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Руппель Алексей Александрович. – Омск : СибАДИ, 1986. – 266 с.

63. Савенко, В.А. Комплексная механизация сооружения магистральных трубопроводов / В.А. Савенко. – М. : Недра, 1981. – 295 с.

64. Семин, Е.Л. Капитальный ремонт магистральных трубопроводов с применением грунтовых и инвентарных опор / Е.Л. Семин // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – №4(26). – С. 25 – 27.

65. Система управления краном-трубоукладчиком, исключая опрокидывание трубоукладочной колонны/ А.Н. Шабалин // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования», г. Омск, 2012. – С. 83 – 87.

66. Степанов, К.В. Исследование динамических характеристик магистральных трубопроводов при строительстве: дис. ... канд. техн. наук : 05.15.07 / Степанов Константин Викторович. – М., 1970. – 198 с.

67. Сухарев, Р.Ю. Влияние горизонтальных колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика на изменение грузового момента / Р.Ю. Сухарев, В.В. Танский // Вестник СибАДИ, 2017. – Выпуск 6 (58). – С. 17 – 22.

68. Сухарев, Р.Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Сухарев Роман Юрьевич. – Омск, 2008. – 170 с.

69. Танский, В.В. Влияние координат точки крепления уравнивающего каната на колебания груза крана-трубоукладчика / В.В. Танский // Вестник СибАДИ, 2017. – Выпуск 1 (53). – С. 48 – 53.

70. Танский, В.В. Обоснование расчетной схемы крана-трубоукладчика / В.В. Танский // Техника и технологии строительства. – 2017. – Выпуск 4 (8). – С. 54-60.

71. Таран, В.Д. Исследование напряженного состояния трубопроводов при

капитальном ремонте / В.Д.Таран, Е.А.Аникин // Проектирование и строительство трубопроводов: реф. сб. – М. : ВНИИЭГазпром, 1968. – №3. – С. 56–59.

72. Титенко, В.В. Повышение производительности автогрейдера, выполняющего планировочные работы, совершенствованием системы управления : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Титенко Владимир Владимирович. – Омск : СибАДИ, 1997. – 172 с.

73. Тихонов, Ю.Б. Повышение устойчивости изоляционно-укладочной колонны путем совершенствования систем управления кранами-трубоукладчиками : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Тихонов Юрий Борисович. – Омск: СибАДИ, 1989. – 231 с.

74. Устройство защиты стрелы крана-трубоукладчика/ В.В. Танский // Материалы Международной научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» «Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых», г. Омск, 2016. – С. 309 – 311.

75. Федоров, В.М. Динамика передвижения строительно-монтажных гусеничных кранов с грузом на крюке : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Федоров Владимир Михайлович. – М. : ВНИИМССР, 1976. – 210 с.

76. Шабалин А.Н. Система стабилизации нагрузки на кран-трубоукладчик / А.Н. Шабалин // Вестник СибАДИ. – 2013. – Выпуск 2 (30). – С. 29 – 34.

77. Шабалин, А.Н. Модель взаимодействия гусеничного движителя с грунтом для моделирования дорожных строительных машин в Matlab SimMechanics / А.Н. Шабалин // Вестник СибАДИ, 2013. – Выпуск 9 (831). – С. 38 – 40.

78. Шабалин, А.Н. Система управления краном-трубоукладчиком, исключающая опрокидывание трубоукладочной колонны : матер. VII Всерос. науч.-практ. конф. (с межд. участием) / А.Н.Шабалин. – Омск : СибАДИ, 2012. – Кн.2. – 83 с.

79. Шершнева Е.О. Повышение эффективности процесса перемещения груза мостовым краном : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Шершнева Елена Олеговна. – Омск : СибАДИ, 2017. – 187 с.

80. Шимкович, Д.Г. Динамические нагрузки при колебаниях груза на канате / Д.Г. Шимкович // Лесной Вестник. – 2012. – № 4. – С. 141 – 146.

81. Щербаков, В.С. Моделирование и визуализация движений механических систем в MATLAB / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, А.А. Руппель, В.А. Глушец, С.А. Милюшенко // – Омск : СибАДИ, 2007. – 85 с.

82. Щербаков, В.С. Автоматизация процесса моделирования траектории движения рабочего органа робота-манипулятора / В.С. Щербаков, И.А. Реброва, М.С. Корытов // – Омск : СибАДИ, 2009. – 106 с.

83. Щербаков, В.С. Исследование системы управления одноковшового гидравлического экскаватора с целью повышения точности разработки грунта : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Щербаков Виталий Сергеевич. – Омск : СибАДИ, 1974. – 148 с.

84. Щербаков, В.С. Математическая модель строительного манипулятора на базе одноковшового экскаватора с гидроприводом / В.С. Щербаков, Д.Б. Комаров. – Омск, 1987. – 36 с.

85. Щербаков, В.С. Математическое описание механических систем в однородных координатах / В.С. Щербаков // Роботы и робототехнические системы : сб. науч. тр. – 1984. – С. 82 – 84.

86. Щербаков, В.С. Методы управления комплектом машин трубоукладочной колонны : монография / В.С. Щербаков, А. Н. Шабалин, М.С. Корытов – Омск : СибАДИ, 2014. – 151 с.

87. Щербаков, В.С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами : дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.04 / Щербаков Виталий Сергеевич. – Омск : СибАДИ, 2000. – 416 с.

88. Щербаков, В.С. Повышение точности и скорости перемещения груза по требуемой траектории грузоподъемным краном мостового типа / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, Е.О. Вольф // Системы. Методы. Технологии. – Братск : БГУ. – 2014. – №4(24). – С. 52 – 57.

89. Щербаков, В.С. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора / В.С. Щербаков, Р.Ю. Сухарев // – Омск: СибАДИ, 2011. – 149 с.

90. Щербаков, В.С. Теория автоматического управления. Линейные непрерывные системы / В.С. Щербаков, И.В. Лазута. – Омск : СибАДИ, 2013. – 143 с.

91. Щербаков, Е.С. Исследование неуправляемых перемещений рыхлительного агрегата с целью повышения эффективности разработки мерзлых грунтов : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Щербаков Евгений Сергеевич. – Омск : СибАДИ, 1980. – 207 с.

92. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА. – М. : Радио и связь, 1983. – 312 с.

93. Giles, D. Wood, Dallas C. Kennedy. Simulating Mechanical Systems in Simulink. – Natick, MA : The MathWorks, 2003. – 25 p.

94. Manfred, G.A/ Time-optimal control of and overhead crane model / G.A. Manfred // Optimal Control Applications & Methods. 1982. – Vol. 3. – №2. – P. 115 – 120.

95. Matlab. Reference Manual, 2013.

96. Matlab. SimMechanics First-Generation Reference Manual, 2013.

97. Optimization Theory Overview [Электронный ресурс] // MathWorks: [сайт]. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/optimization-theory-overview.html> (дата обращения: 15.01.2018).

98. Problems Handled by Optimization Toolbox Functions [Электронный ресурс] // MathWorks: [сайт]. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/problems-handled-by-optimization-toolbox-functions.html#tblminprobs> (дата обращения: 15.01.2018).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 158181

КРАН-ТРУБОУКЛАДЧИК

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2015120193

Приоритет полезной модели 27 мая 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 30 ноября 2015 г.

Срок действия патента истекает 27 мая 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.И. Ивлиев



Приложение Б
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 158094

КРАН-ТРУБОУКЛАДЧИК

Патентообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)" (RU)**

Автор(ы): **см. на обороте**

Заявка № **2015120191**

Приоритет полезной модели **27 мая 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **27 ноября 2015 г.**

Срок действия патента истекает **27 мая 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



Приложение В
(справочное)



Приложение Г
(справочное)



Акт

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
Танского В.В. на тему «Совершенствование рабочего оборудования крана-
трубоукладчика с целью снижения неуправляемых колебаний
перемещаемого груза»

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс, осуществляемый в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирском государственном автомобильно-дорожном университете (СибАДИ)», Результаты диссертационных исследований, инженерные решения, предложенные в работе, используются в курсовом и дипломном проектировании при подготовке студентов на кафедре «ПТТМ и гидропривод» по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», бакалавров по направлению 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», магистров по направлению 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Зав. кафедрой «ПТТМ и гидропривод»
д.т.н., профессор


02.07.2018г.
Н.С. Галдин

Приложение Д
(справочное)

ООО "Управление механизации № 8"	
Р/сч. 40702010700311000785 Филиал ПТБ (ОАО) г. Омск БИК 045279529	644065 г. Омск, ул. Заводская 13
Ю/сч. 30101810800000000828 КПП 550101001 ИНН 5501218048	Тел./факс (3812) 64-03-50, 64-31-38
	um8@ok.ru

Акт

внедрения «Способа подвеса груза на стреле крана-трубоукладчика при помощи уравнивающего каната»

В ООО «Управление механизации №8» г. Омск принят к использованию «Способ подвеса груза на стреле крана-трубоукладчика при помощи уравнивающего каната» разработанный аспирантом Танским В.В. в соавторстве с д.т.н. профессором Щербаковым В.С., д.т.н. профессором Корытовым М.С., патент на полезную модель № 158094 «Кран-трубоукладчик».

Способ позволяет снизить колебание груза на стреле, что ведет к снижению динамических воздействия на рабочее оборудование крана, повышению точности работ, уменьшению затрат времени на процесс перемещения груза краном, оснащенным уравнивающим канатом, что представляет для ООО «Управление механизации №8» несомненный интерес.

Генеральный директор
ООО «Управление механизации №8»


В.А. Волков



Приложение Е
(справочное)

Расчет экономической эффективности внедрения инженерного решения

Расчет экономической эффективности внедрения инженерного решения проведен в соответствии с методическими указаниями по определению экономической эффективности капитальных вложений и технических решений в транспортном строительстве [57, 86]. Расчет производился для колонны из пяти кранов-трубоукладчиков, оснащенных уравновешивающим канатом. Марка крана ТГ-503. Объект строительства расположен на территории Российской Федерации.

Экономического эффект достигается за счет снижения неуправляемых колебаний груза на стреле КТ, повышению точности и скорости проведения работ, что приводит к повышению эффективности использования КТ и сокращению неплановых ремонтов техники. Годовой экономический эффект от внедрения инженерного решения определяется по формуле (Е.1):

$$\mathcal{E}_Г = \Delta Z_{ГП} + D_{\mathcal{E}} - (P_A + E_H) Z_K, \quad (\text{Е.1})$$

где $\Delta Z_{ГП}$ – экономия годовых приведенных затрат, руб./год; $D_{\mathcal{E}}$ – дополнительная экономия годовых текущих затрат, связанная с сокращением неплановых ремонтов, руб./год; P_A – доля амортизационных отчислений на реновацию и капитальный ремонт; E_H – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $E_H = 0,15$; Z_K – дополнительные капитальные затраты на изготовление, монтаж уравновешивающего каната, определяются по формуле (Е.2) [57, 86].

$$Z_K = n(C_L + C_{УП} + 2 \cdot C_{ОБ} + C_P), \quad (\text{Е.2})$$

где n – число КТ в колонне; C_L – стоимость лебедки; $C_{УП}$ – стоимость упругого элемента; $C_{ОБ}$ – стоимость обводных блоков; C_P – стоимость монтажных работ.

$$Z_K = 5(3000 + 500 + 2 \cdot 1500 + 5000) = 57500 \text{ руб.} \quad (\text{E.3})$$

Экономия годовых приведенных затрат определяется по формуле (E.4) [57]:

$$\Delta Z_{ГП} = C_{МС} \cdot T_{Г} - Z_{Т}, \quad (\text{E.4})$$

где $C_{МС}$ – себестоимость машиносмены работы КТ, руб./сут; $T_{Г}$ – годовой фонд рабочего времени трубоукладчика средний по РФ; $Z_{Т}$ – текущие затраты на техническое обслуживание инженерного решения [86].

$$\Delta Z_{ГП} = 2400 \cdot 267 - 36000 = 604800 \text{ руб.} \quad (\text{E.5})$$

Дополнительный экономический эффект формула (E.6) $D_{Э}$ образован за счет экономии годовых текущих затрат на проведение неплановых (аварийных) ремонтов КТ. Эффект складывается из следующих статей [86]: экономия затрат на заработную плату слесарей $Z_{ЗП}$; экономия затрат на проведение ТР $Z_{ТР}$.

$$D_{Э} = Z_{ЗП} + Z_{ТР}; \quad (\text{E.6})$$

$$D_{Э} = 19500 + 45000 = 64500 \text{ руб.} \quad (\text{E.7})$$

Значение P_A определяется по формуле (E.8) [86]:

$$P_A = P + \frac{A_{КР} \cdot K_{НП}}{100}; \quad (\text{E.8})$$

$$P_A = 0,11 + 11,7 \cdot 1,1 / 100 = 0,24, \quad (\text{E.9})$$

где P – доля амортизационных отчислений на реновацию, $P = 0,11$; $A_{КР}$ – амортизационные отчисления на капитальный ремонт; $A_{КР} = 11,7 \%$; $K_{НП}$ – коэффициент накладных расходов, $K_{НП} = 1,1$ [86]. В итоге получим:

$$\Delta_{Г} = 604800 + 64500 - (0,15 + 0,24) \cdot 57500 = 646875 \text{ руб.} \quad (\text{E.10})$$

Проведенный расчет экономической эффективности от внедрения инженерного решения позволил определить ожидаемый эффект. Особо стоит отметить, что внедрение инженерного решения приводит не только к экономическому эффекту, а в первую очередь к повышению безопасности

производимых работ, за счет снижения неуправляемых колебаний груза на стреле
КТ.