



ТАНСКИЙ Вячеслав Владимирович

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

Специальность 05.05.04. - Дорожные, строительные и подъемно-транспортные
машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)».

Научный руководитель:

СУХАРЕВ Роман Юрьевич,

кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов и электротехника» (г. Омск)

Официальные оппоненты:

КУТУМОВ Алексей Анатольевич,

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), директор Рубцовского индустриального института (РИИ) (г. Рубцовск)

САВИНКИН Виталий Владимирович,

доктор технических наук, доцент, Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения «Северо-Казахстанский государственный университет имени Манаша Козыбаева» (СКГУ им. М. Козыбаева), заведующий кафедрой «Транспорт и машиностроение» (Казахстан, г. Петропавловск)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно - строительный университет (Сибстрин) (НГАСУ(Сибстрин))» (г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится «31» октября 2018 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета ВАК РФ Д 212.250.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, ауд. 3124. Тел.: 8(3812) 65-03-23, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistrature-i-aspirantury/studies/dissertations/60819/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5. Тел. 8 (3812) 65-03-23, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

Автореферат разослан «10» сентября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Кузнецова
Виктория Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Для успешного выполнения ныне реализуемых и последующих объектов магистрального трубопровода 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.

В ходе производства работ при строительстве магистральных трубопроводов кран-трубоукладчик (КТ) является основной рабочей машиной. Проблема колебаний трубопровода при преодолении краном неровностей микрорельефа ведет к снижению точности выполняемых работ и, как следствие, повышению времени на их выполнение, вероятности удара трубы о стрелу или кромку траншеи. Колебания трубопровода в ходе изоляционно-укладочных работ приводят к колебанию грузового момента в широком диапазоне и могут 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 проблема снижения неуправляемых колебаний груза, перемещаемого КТ, до настоящего времени не решена. В связи с этим совершенствование рабочего оборудования КТ с целью снижения неуправляемых колебаний груза является актуальной темой для научных исследований 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. Вопросы оптимизации основных технологических параметров процесса подъема плети трубопровода рассмотрены в работах Р.Д. Габелая, В.А. Славова, В.Я. Кершенбаума, Н.Е. Перова, И.П. Петрова, А.Г. Камерштейна, В.Д. Тарана, Б.А. Аникина. Работы А.И. Гальперина, И.А. Тютнева, А.П. Куляшова, И.В. Степанова направлены на изучение динамического процесса взаимодействия трубопровода с кранами-трубоукладчиками. В работах Ю.А. Дудолодова, Е.И. Перчиковского, А.Л. Липовича и Ц.С. Хайтовича предложены новые конструктивные схемы навесного оборудования КТ, усовершенствованы системы управления навесным оборудованием. Вопросы совершенствования систем управления колонной КТ рассмотрены в работах таких авторов, как Ю.Б. Тихонов, В.Ф. Раац, Е.В. Загороднюк, А.Н. Шабалин и др.

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. Разработана математическая модель сложной динамической системы процесса перемещения груза КТ, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием. Выявлены зависимости влияния координат точек крепления уравнивающего каната на колебательность груза, позволяющие определить наиболее эффективное расположение уравнивающего каната для соответствующего вылета стрелы.

Разработана инженерная методика выбора координат крепления уравнивающего каната.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Применение полученных результатов при проектировании КТ позволяет сократить время на разработку машины. Разработаны перспективные конструкции рабочего оборудования КТ, позволяющие снизить неуправляемые колебания груза, перемещаемого КТ, разработки подтверждены патентами РФ на полезные модели. Результаты диссертационного исследования 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. Использованы следующие программные комплексы: MATLAB (приложения Simulink, 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 параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика.

Степень достоверности исследований обеспечивается адекватностью математической модели, корректностью принятых допущений, корректным использованием методов математического моделирования и достаточным объемом экспериментальных данных.

Апробация результатов работы. Международная научно-практическая конференция «Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов в освоении стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки», Омск, декабрь 2014 г.; 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», 10.04.15 г.; Международная научно-практическая конференция «АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛЬСТВО, ТРАНСПОРТ» (К 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»), декабрь 2015 г.; II этап XIII Научно-технической конференции 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.

Публикации по работе. По материалам исследований опубликовано 16 печатных работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 патента РФ на полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 165 страниц, включая 18 таблиц и 59 рисунков. Список литературы содержит 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертационной работы, излагаются цель и основные задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ тенденций развития КТ, обзор математических моделей КТ, рассмотрены основные инженерные решения по усовершенствованию системы управления навесным оборудованием, решения, направленные на снижение негативного влияния колебаний груза на стреле КТ. Описано влияние крена и тангажа КТ на изменение высотной координаты точки подвеса груза.

Во второй главе представлена общая методика исследований, базирующиеся на методологии системного анализа. Математическое моделирование процесса перемещения груза КТ, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием, было проведено в программном продукте MATLAB Simulink с использованием пакета SimMechanics. Комплексный метод исследований предполагает проведение как теоретических, так и экспериментальных исследований. В работе использована методология пассивного и активного эксперимента. В качестве оценки достоверности экспериментальных данных использовалась доверительная вероятность P_x . В данной работе достаточной считалась доверительная вероятность $P_x \approx 0,95$.

В третьей главе описывается модель объекта исследования, как сложная динамическая система, состоящая из подсистем: КТ, груз, микрорельеф (рисунок 1). Подсистемы соединены одно- и многопараметрическими связями, отражающими взаимодействие блоков в ходе процесса.

Обоснована объемная расчетная схема КТ, обладающая элементами научной новизны (рисунок 2). Известные математические модели КТ были составлены для серийно выпускаемых машин. В данной работе проведена модернизация рабочего оборудования КТ, предложена новая конструкция, включающая в себя дополнительную связь между грузом и КТ, уравновешивающий канат. Предлагаемая конструкция позволяет значительно снизить амплитуду колебания груза на стреле за счет ограничения его степени свободы.

Статические и динамические свойства любой машины полностью описываются дифференциальными уравнениями движения, позволяющими исследовать природу и физическую сущность параметров системы. С целью написания дифференциальных уравнений движения КТ были заданы следующие системы координат: инерциальная система координат $O_0X_0Y_0Z_0$ с началом в точке O_0 , совпадающей с центром масс базового трактора, в исходном положении. И четыре локальных системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$, связанных с базовой машиной, $O_2X_2Y_2Z_2$ со стрелой, $O_3X_3Y_3Z_3$ с грузовым канатом. Положение в пространстве груза определяется при помощи $O_4X_4Y_4Z_4$. Пространственная расчетная схема КТ, оснащенного модернизированным рабочим оборудованием, имеет 9 степеней свободы (таблица 1).

Для описания кинематики звеньев пространственной расчетной схемы КТ был исполь-

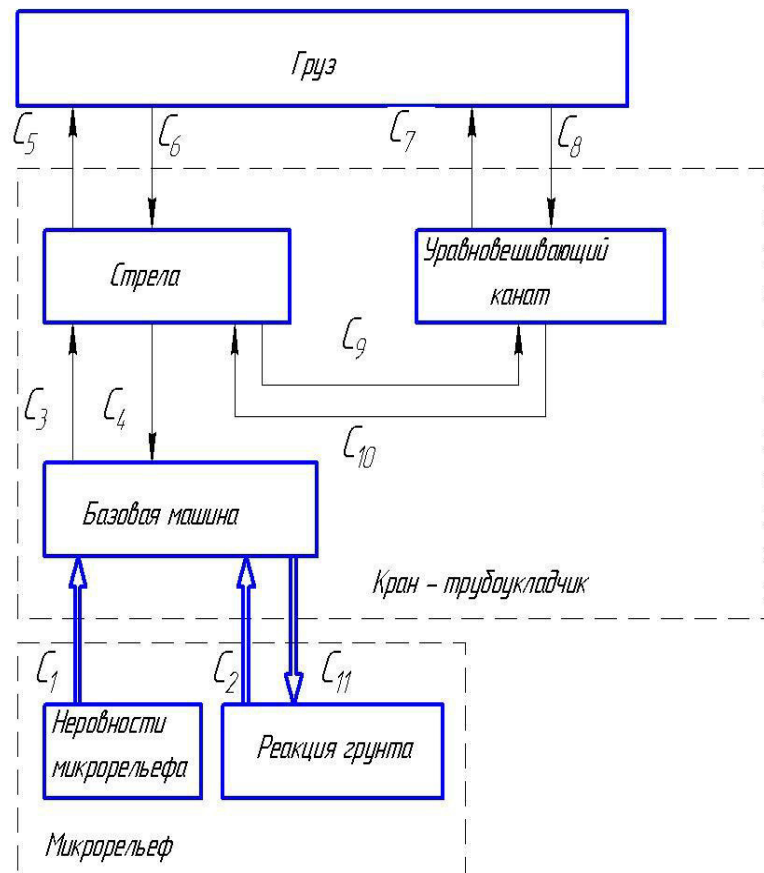


Рисунок 1 – Блок-схема сложной динамической системы процесса перемещения груза краном-трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием

зован метод однородных координат. Составлены матрицы перехода, учитывающие перемещения в пространстве одной системы координат относительно другой. С целью получения матриц скоростей матрицы перехода были продифференцированы путем перемножения на соответствующие дифференцирующие матрицы, что позволило перейти к написанию уравнений движения подвижных звеньев крана-трубоукладчика.

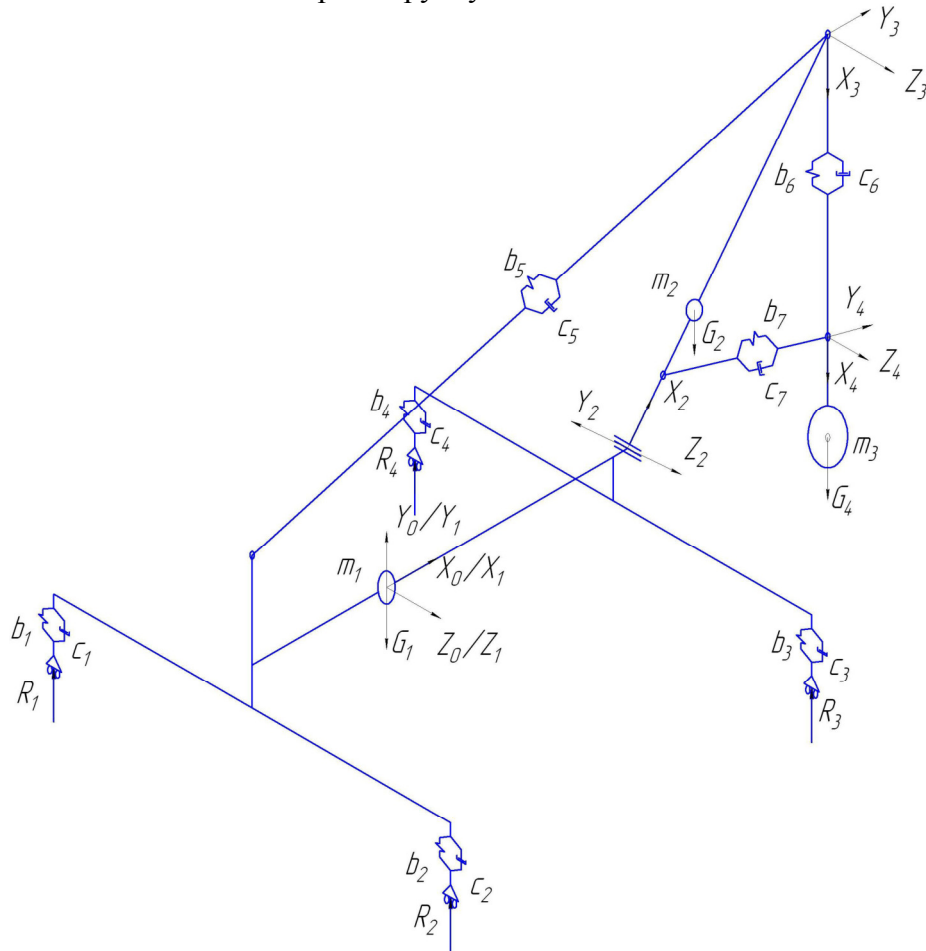


Рисунок 2 – Пространственная расчетная схема модернизированного крана-трубоукладчика

Таблица 1 – Обобщенные координаты динамической системы модернизированного крана-трубоукладчика

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

Динамика подвижных звеньев КТ описывается системой уравнений Лагранжа 2-го рода, имеющей вид формулы (1). Первое слагаемое которой отражает силы, создаваемые кинетической энергией, второе – силы, создаваемые потенциальной энергией, третье – силы, создаваемые упруго-вязкими элементами, в правой части – обобщенные внешние силы.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 \text{tr}[U_{ij} H_i U_{iv}^T] q_j'' + \sum_{u=1}^7 \sum_{j=1}^9 \text{tr}[M_{uj} B_u M_{uv}^T] q_j' + \\ & + \sum_{u=1}^7 \sum_{j=1}^9 \text{tr}[M_{uj} N_u M_{uv}^T] q_j + \sum_{i=1}^3 m_i g G^T U_{iv} \bar{R}_i = \sum_{r=1}^m \bar{F}_r U_{iv} \bar{R}_{ir}, \end{aligned} \quad (1)$$

где 3 – количество звеньев, 9 – количество степеней свободы, 7 – количество упруго-вязких элементов, U_{ij} – матрица скорости центра масс i -го элемента по j -й координате, H_i – матрица инерционности i -го элемента, M_{uj} – матрица деформации u -го упруго-вязкого элемента по j -й координате, N_u – матрица упругости, B_u – матрица вязкости u -го упруго-вязкого элемента, G^T – вектор сил тяжести звеньев системы, $\bar{R}_i$ – радиус вектор центра масс i -го звена, m_i – масса i -го звена, M_{uj}^T – транспонированная матрица деформации u – упруго-вязкого элемента; U_{iv}^T – транспонированная матрица скорости i -го элемента; q – обобщенная координата малых перемещений по степени свободы j , $\bar{F}_r$ – вектор внешних сил, приложенных к звену расчетной схемы; $\bar{R}_{ir}$ – вектор координат точки приложения силы к звену i в локальной системе координат этого звена.

Для численного решения дифференциальных уравнений движения подвижных звеньев КТ применялся продукт MATLAB. Полученная модель (рисунок 3) позволяет получить любые переходные процессы, в том числе и искомое изменение положения груза в пространстве. Для решения дифференциальных уравнений при помощи полученной модели использовался метод Рунге – Кутты 4-го порядка.

Для изучения неуправляемых перемещений груза на стреле КТ, в процессе преодоления им неровностей микрорельефа, использовались методы статистической динамики с применением стохастических моделей микрорельефа. Подавляющее большинство уравнений грунтовых поверхностей, по которым передвигается трубоукладочная колонна, имеют следующие корреляционные функции:

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

$$R(t) = \sigma_k^2 \cdot e^{-\alpha_k |t|} \cos(\beta_k \cdot t), \quad (3)$$

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

Для моделирования на персональном компьютере использовались рекуррентные уравнения, которые имели вид:

$$\begin{aligned} y_n(n) &= Q \cdot x(n) + a \cdot x(n-1) + q_1 \cdot y(n-1) + q_2 \cdot y(n-2); \\ Q &= \sigma_k c = \sigma_k \sqrt{\frac{c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 4 \cdot c_0^2}}{2}}; \quad a = \frac{\sigma_k \cdot c_0}{c}; \quad q_1 = 2 \cdot \rho \cdot \cos \gamma_0; \\ q_2 &= -\rho^2; \quad c_0 = \rho \cdot (\rho^2 - 1) \cdot \cos \gamma_0; \quad c_1 = 1 - \rho^4; \quad \gamma_k = \alpha_k \cdot h; \quad \rho = e^{-\gamma_k}; \quad \gamma_0 = \beta_k \cdot h. \end{aligned} \quad (4)$$

В четвертой главе обоснован критерий эффективности процесса перемещения груза модернизированным краном-трубоукладчиком. За критерий принята колебательность груза на стреле μ , как отношение двух соседних максимальных положительных отклонений переходной характеристики от установившегося значения. Целевая функция и граничные условия имеют вид формулы (5):

$$\left. \begin{aligned} \mu &= f(l_2; l_5) \rightarrow \min; \\ 2,3 &\leq l_2 \leq 5,5; \\ 1,0 &\leq l_5 \leq 4,2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где l_2 – координата крепления уравнивающего каната к стреле по оси $O_2 X_2$; l_5 – координата крепления уравнивающего каната к грузовому канату по оси $O_3 X_3$.

Рисунок 3 – Имитационная модель процесса перемещения груза краном-
трубоукладчиком, оснащенным модернизированным рабочим оборудованием в Matlab
SimMechanics

Выдвинута гипотеза, что точки крепления уравнивающего каната к стреле и грузовому канату влияют на эффективность работы модернизированного рабочего оборудования. С целью изучения данного вопроса был проведен анализ влияния координат точек крепления уравнивающего каната на колебательность груза. Машинный эксперимент проводился в широких пределах параметров. В качестве примера представлены результаты при следующих параметрах: начальное отклонение грузового каната от вертикали $q_6(0) = -9^\circ$; значение начальной скорости вращения груза относительно оголовка стрелы $\dot{q}_6(0) = 0$ рад/с, масса груза $m_3 = 595,5$ кг; длина грузового каната $l_{4,3} = 4,2$ м. Значение координат точек крепления уравнивающего каната к стреле l_2 варьировалось в диапазоне от 2,3 м до 5,5 м, для точек крепления к грузовому канату l_5 диапазон составил от 1,0 м до 4,2 м. Такие диапазоны продиктованы конструктивными особенностями крана-трубоукладчика и позволяют рассмотреть все возможные варианты крепления уравнивающего каната. Величина шага в первом и втором случаях составила 0,8 м.

С целью оценки влияния координат точек крепления уравнивающего каната на колебательность груза фиксировалась временная зависимость отклонения груза по оси X_0 . По полученным данным рассчитывалось значение колебательности для данного расчетного случая. Исследования проводились для диапазона углов наклона стрелы от 30° до 80° с шагом 10° . В результате анализа были получены зависимости (рисунок 4).

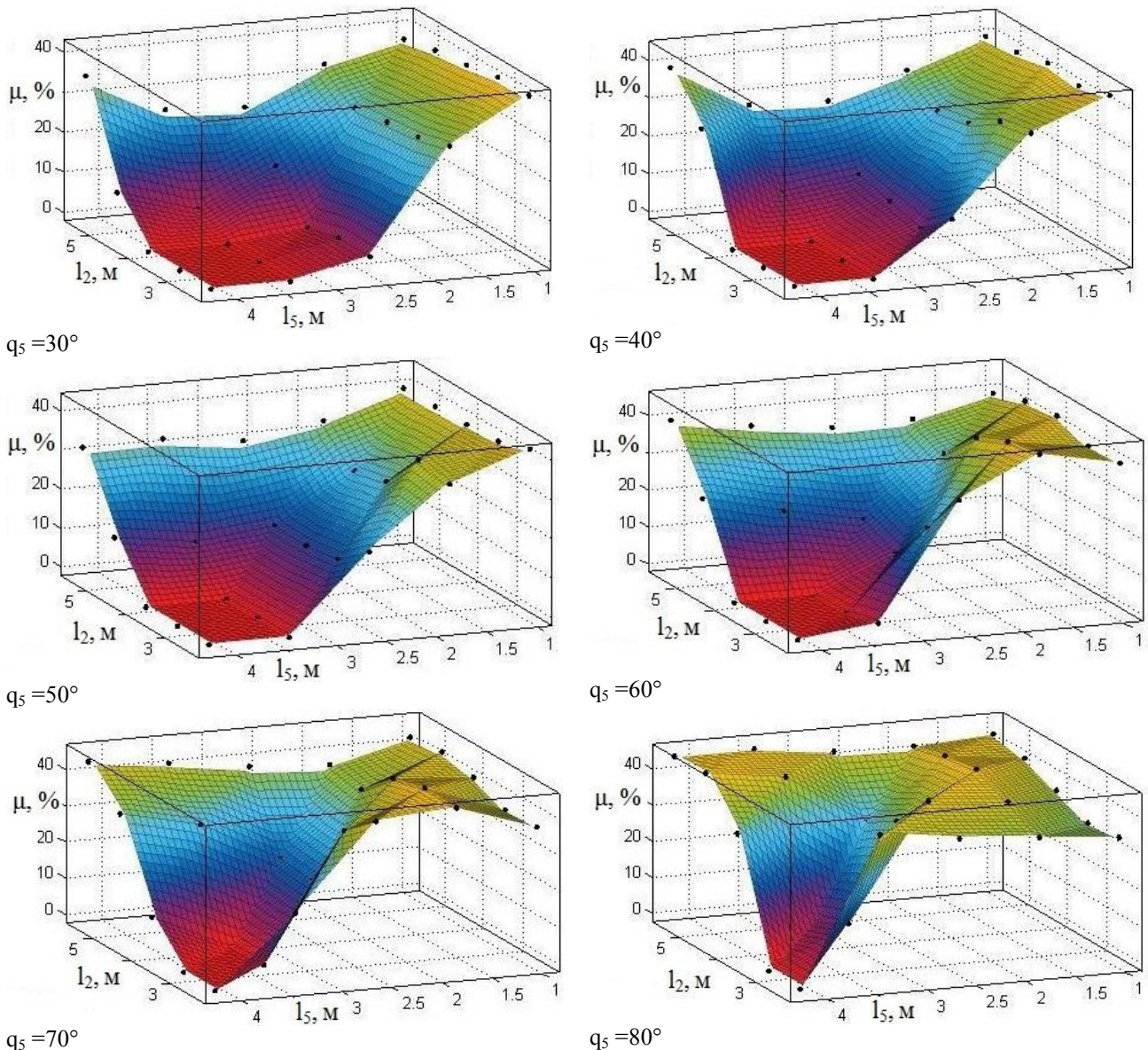


Рисунок 4 – Зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната для различных углов наклона стрелы q_5

Из графиков видно, что точки у основания стрелы (2,3;3,1;3,9) и точки на конце грузового каната (3,4;4,2) являются наиболее приоритетными, так как колебательность в этих точках близка к нулю. Но такой вывод правомерен для данной длины грузового каната.

С целью изучения зависимости колебательности груза от координат крепления уравнивающего каната к стреле и длины грузового каната был проведен машинный эксперимент. В данном случае координата точки крепления уравнивающего каната к грузовому канату была фиксированной (0,3 м от центра масс груза). Варьируемыми параметрами являлись: координата точки крепления уравнивающего каната к стреле, длина грузового каната. Остальные условия проведения машинного эксперимента остались прежними. Исследования проводились для того же диапазона углов наклона стрелы от 30° до 80° с шагом 10° . В результате анализа были получены зависимости (рисунок 5).

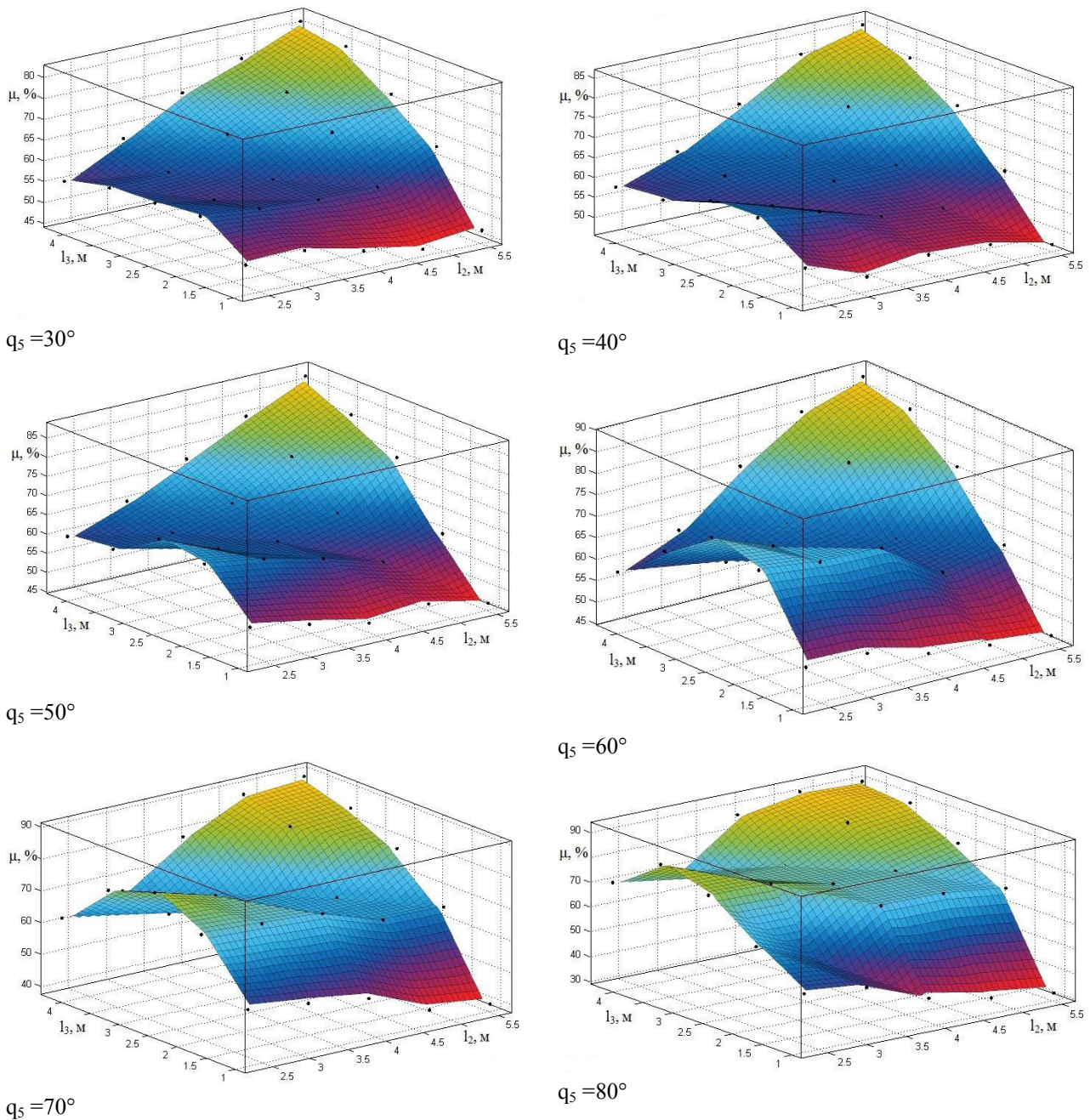


Рисунок 5 – Зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната для различных углов наклона стрелы q_5

Графики показывают, что для длин грузового каната от 1 до 2 м более эффективными 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 закономерна зависимость: чем ближе к шарниру крепления стрелы, тем эффективнее.

С целью получения целевых функций и решения задачи оптимизации, данные зависимости (рисунок 5) были аппроксимированы и получены уравнения регрессии, представленные в таблице 2. Была проведена оптимизация параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика. Необходимость обеспечить минимальную колебательность груза задается целевой функцией и граничными условиями (6).

$$\left. \begin{aligned} \mu(l_2, l_3) &= f(l_2, l_3) \rightarrow \min; \\ sl_2 &\leq l_2 \leq nl_2; \\ sl_3 &\leq l_3 \leq nl_3. \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где $\mu(l_2, l_3)$ – 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 (длина грузового каната). Границы варьирования независимого параметра l_2 от 2,3 до 5,5 м продиктованы геометрическими параметрами стрелы крана-трубоукладчика, 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. Результаты представлены в виде графиков (рисунок 6,7)

Таблица 2 – Регрессионные зависимости колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната к стреле 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 зависимости (рисунок 6,7) позволяют определить оптимальное значение координаты крепления уравнивающего каната для рассмотренного диапазона длин грузового каната и углов наклона стрелы.

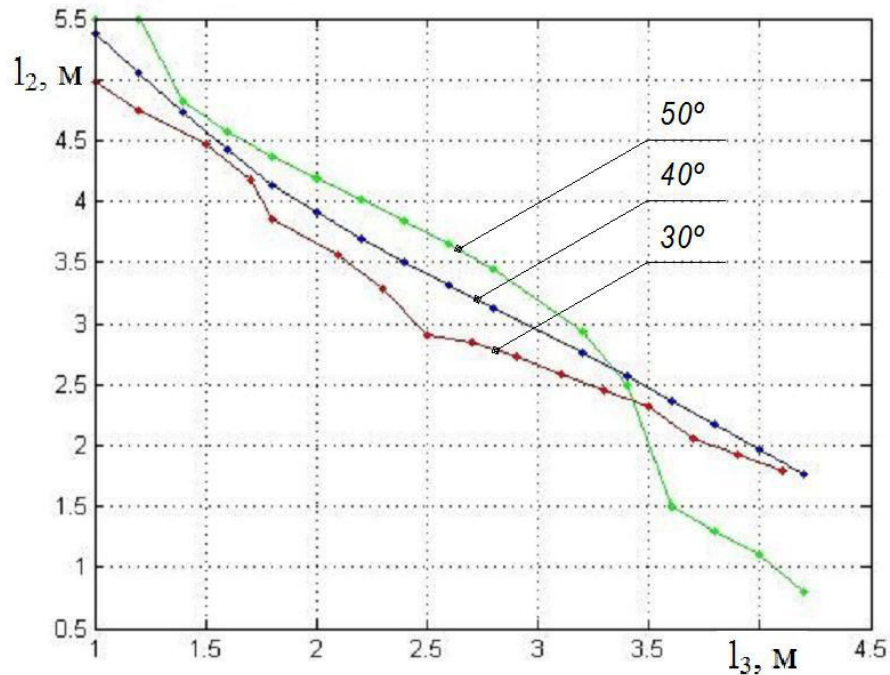


Рисунок 6 – Оптимальные значения координат точки крепления уравнивающего каната к стреле l_2 для соответствующей длины грузового каната l_3 , $q_5 = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$

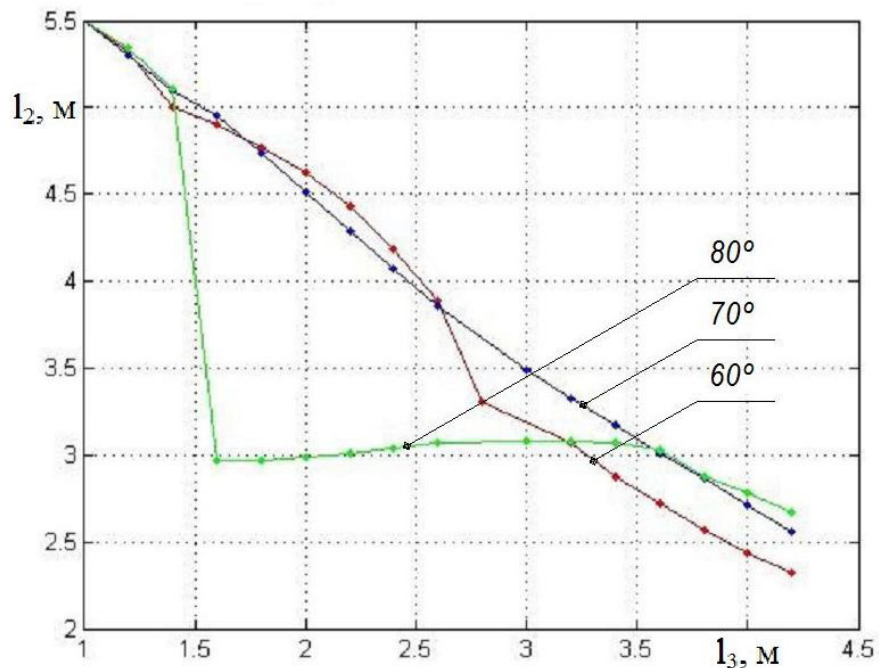


Рисунок 7 – Оптимальные значения координат точки крепления уравнивающего каната к стреле l_2 для соответствующей длины грузового каната l_3 , $q_5 = 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$

В ходе анализа данных (рисунок 5) для длин грузового каната от 3,4–4,2 м была выявлена зависимость изменения угла τ_1 (рисунок 8) на значение колебательности груза. Было установлено: чем ближе значение угла наклона уравнивающего каната к горизонтالي $\tau_1 \rightarrow 0$, тем ниже колебательность (7).

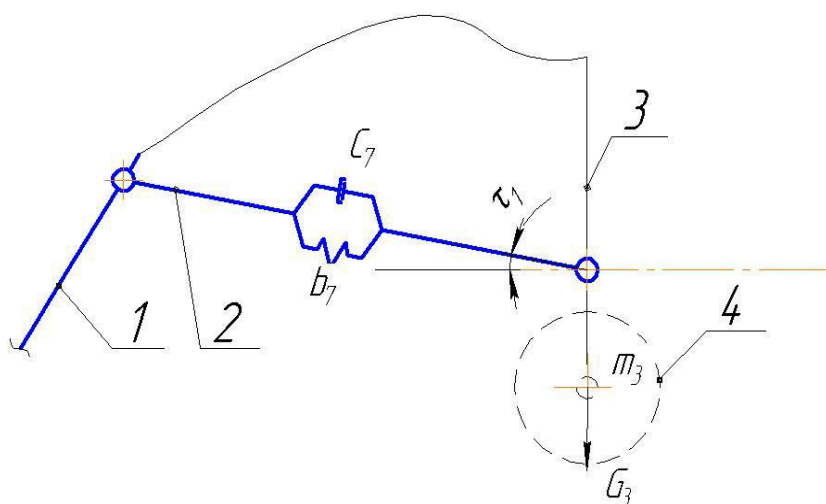


Рисунок 8 – Схема установки дополнительной связи уравнивающего каната, где 1 – стрела, 2 – уравнивающий канат, 3 – грузовой канат, 4 – груз

$$\left. \begin{array}{l} \tau_1 \rightarrow 0; \\ \mu \rightarrow \min \end{array} \right\}. \quad (7)$$

Это подтвердили результаты регрессионного анализа зависимостей колебательности груза от координат точек крепления уравнивающего каната и длины грузового каната (таблица 3). В инженерной методике для длин грузового каната от 3,4 м до 4,2 м рекомендуется выбор координаты крепления уравнивающего каната к стреле производить так, чтобы угол наклона уравнивающего каната к горизонтали τ_1 стремился к нулю.

Таблица 3 – 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 пятой главе подтверждена адекватность математической модели процесса перемещения груза КТ, оснащенного модернизированным рабочим оборудованием. Предложены перспективные конструкции КТ. Описана инженерная методика выбора параметров модернизированного рабочего оборудования КТ.

Экспериментальные исследования проводились в ФГБОУ ВО «СибАДИ» в специализированной лаборатории кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» (г. Омск, 2018 г.).

Суть эксперимента заключалась в следующем: груз подвешивался при помощи двух канатов, грузового и уравнивающего (рисунок 9). Длина уравнивающего каната выбиралась из условия наличия начальной силы натяжения. Грузу сообщалось начальное отклонение (9° от вертикали). Полученные колебания груза на фоне планшета (рисунок 10) снимались на видеокамеру с частотой кадров 50 кадров в секунду. По полученной видеозаписи фиксировалась временная зависимость отклонения груза в вертикальной плоскости. Полученные в результате киносъемки точки были нанесены на переходную характеристику, полученную при помощи математической модели (рисунок 11, 12).

Адекватность подтверждается сравнением результатов, полученных расчетным путем с помощью математической модели с экспериментальными данными, расхождение между которыми не превысило 8%, что является достаточной точностью для решения поставленных в работе задач.



Рисунок 9 – Закрепление груза при помощи уравнивающего каната



Рисунок 10 – Установка планшета

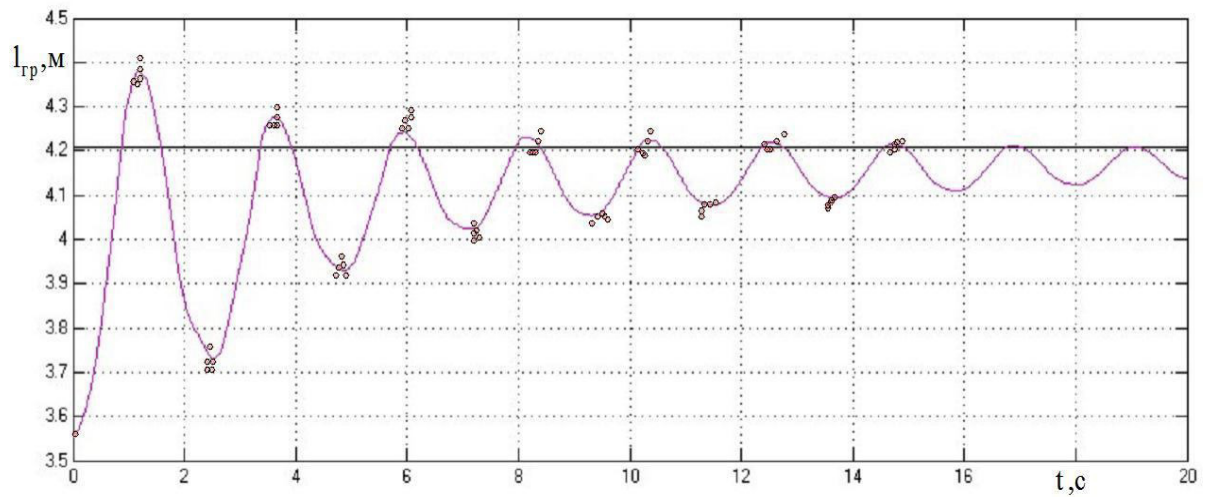


Рисунок 11 – График переходного процесса груза при использовании уравнивающего каната (при условии, что масса груза $m_3 = 96$ кг; угол наклона стрелы $q_5 = 52^\circ$; длина грузового каната $l_{4,3} = 3,94$ м; $l_2 = 3,52$ м; $l_5 = 3,64$ м; $q_6(0) = -9^\circ$; $\dot{q}_6(0) = 0$ рад/с)

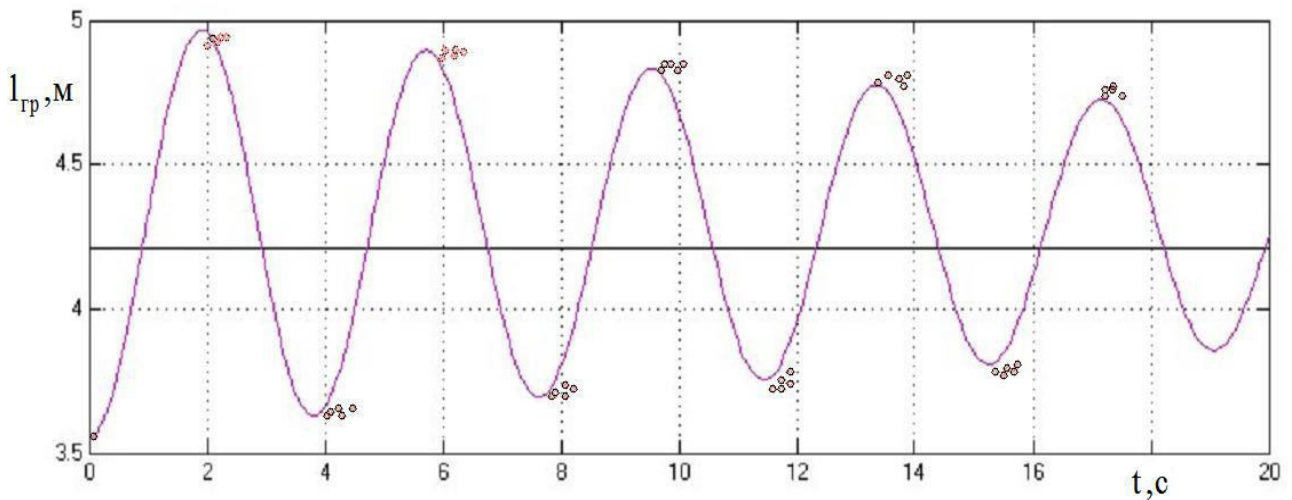


Рисунок 12 – График переходного процесса груза без использования уравнивающего каната (при условии, что масса груза $m_3 = 96$ кг; угол наклона стрелы $q_5 = 52^\circ$; длина грузового каната $l_{4,3} = 3,94$ м; $q_6(0) = -9^\circ$; $\dot{q}_6(0) = 0$ рад/с)

С целью снижения неуправляемых колебаний груза, перемещаемого КТ, путем ограничения степени свободы груза в поперечной вертикальной плоскости, была предложена перспективная модель КТ, оснащенного модернизированным рабочем оборудованием (патент на полезную модель №158094). В целях повышения эффективности работы, вышеизложенного инженерного решения, была предложена новая конструкция (Патент на полезную модель №180279), позволяющая более эффективно гасить колебания груза с большой амплитудой за счет вращения дополнительной канатной лебедки. Задачей устройства демпфирующая рама (Патент на полезную модель №158181) является защита стрелы от удара о нее груза.

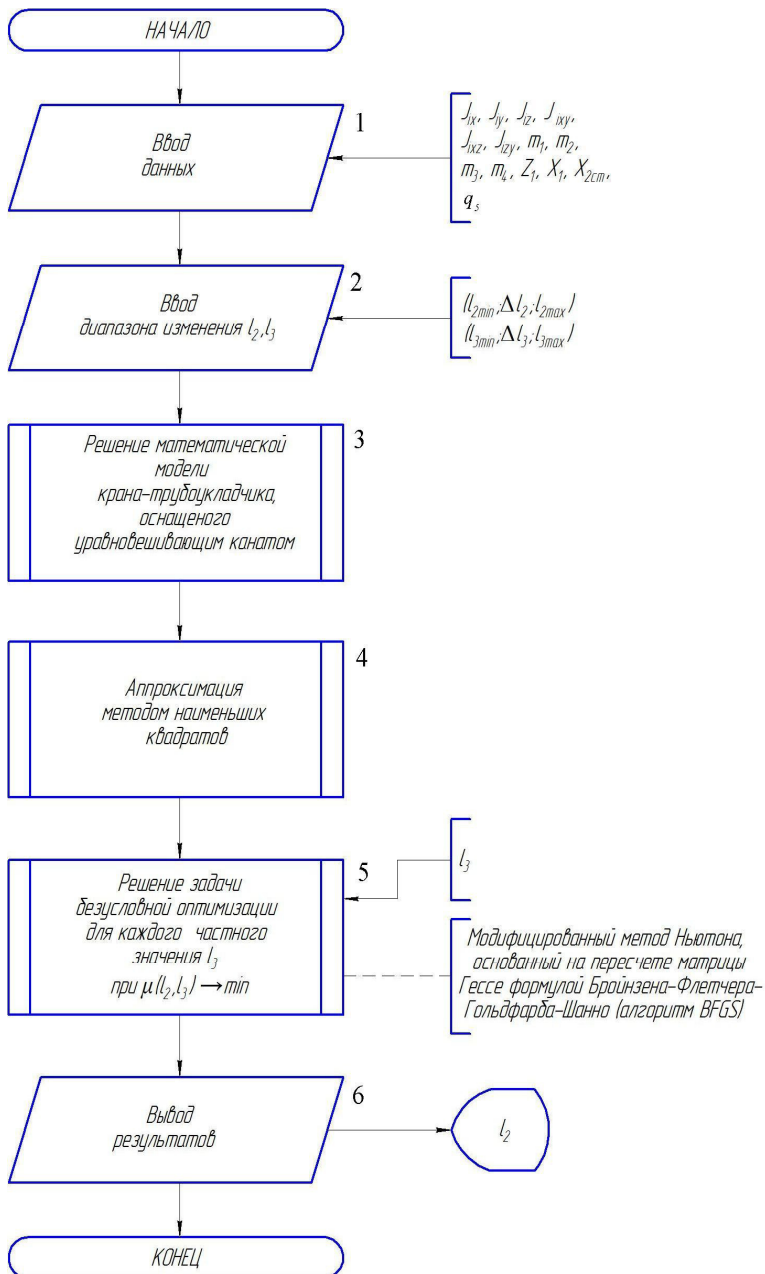


Рисунок 13 – Алгоритм инженерной методики, выбора оптимальных параметров модернизированного рабочего оборудования крана-трубоукладчика

4. Проводится аппроксимация полученных численных значений K_3 от l_2, l_3 методом наименьших квадратов. 5. Проводится оптимизация параметра l_2 для требуемого значения l_3 по полученным регрессионным зависимостям ($K_3(l_2, l_3)$). 6. Вывод результата, оптимального значения l_2 .

Разработан алгоритм методики оптимизации параметров модернизированного рабочего оборудования КТ (рисунок 13). 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 $X_{2ст}$, 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 $J_{ix}, J_{iy}, J_{iz}, J_{ixy}, J_{ixz}, J_{iyz}$.

2. Определяются диапазон и шаг изменения оптимизируемых параметров: а) диапазон и шаг изменения координаты крепления к стреле $l_2(l_{2min}; \Delta l_2; l_{2max})$; б) диапазон и шаг изменения длины грузового каната $l_3(l_{3min}; \Delta l_3; l_{3max})$;

3. Проводятся вычисления на персональном компьютере. Оптимизируются параметры модернизированного рабочего оборудования, по критерию эффективности K_3 составляет массив значений K_3 по оптимизируемым параметрам l_2, l_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

Направлениями и перспективами дальнейшей разработки темы являются исследования неуправляемых колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика, работающего в составе трубоукладочной колонны, и совершенствование конструкции рабочего оборудования крана-трубоукладчика.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Танский, В.В. Влияние координат точки крепления уравнивающего каната на колебания груза крана-трубоукладчика // Вестник СибАДИ, 2017. – Выпуск 1 (53). – С. 48–53.

2. Танский, В.В. 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.

3. Танский, В.В. Анализ влияния координат точек крепления уравнивающего каната на колебательность груза на стреле крана-трубоукладчика / Р.Ю. Сухарев, В.В. Танский // Вестник СибАДИ, 2018. – Выпуск 2 (60). – С. 199–206.

Патенты и свидетельства:

4. 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 образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)" (RU); № 2015120191/11. – заявл. 27.05.2015; опубл. 20.12.15, Бюл. №35. – 2 с.

5. 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 образования "Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)" (RU); № 2015120193/11. – заявл. 27.05.2015; опубл. 20.12.15, Бюл. №35. – 2 с.

6. 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. 07.06.18, Бюл. №16. – 2 с.

Статьи в сборниках материалов конференций и других изданиях:

7. Танский, В.В. Анализ тенденций развития кранов-трубоукладчиков / В.В. Танский // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки : материалы Международной практической конференции

(Омск, 15–16 дек. 2014 г.). – Омск : СибАДИ, 2014. – С. 118–120.

8. Танский, В.В. Анализ математических моделей трубопровода / В.В. Танский // Прогрессивные технологии и процессы : сборник статей Международной молодежной научно-практической конференции (Курск, 24–25 сен. 2015). – Курск : Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2015. – С. 74–77.

9. Танский, В.В. Анализ систем автоматического управления грузоподъемным оборудованием крана-трубоукладчика / В.В. Танский // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Международной практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО "СибАДИ") (Омск, 02–03 дек. 2015 г.). – Омск : СибАДИ, 2015. – С. 778–783.

10. Танский, В.В. Анализ математических моделей кранов-трубоукладчиков / В.В. Танский // Фундаментальные и прикладные науки - основа современной инновационной системы : материалы Международной практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Омск, 02–13 фев. 2015 г.). – Омск : СибАДИ, 2015. – С. 364–367.

11. Танский, В.В. Обоснование расчетной схемы крана-трубоукладчика / В.В. Танский // Техника и технологии строительства. – 2016. – №4(8). – С. 54–60.

12. Танский, В.В. Демпфирующее устройство крана-трубоукладчика / В.В. Танский // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства : материалы Международной научно-практической конференции (Красноярск, 07–08 апр. 2016 г.). – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2016. – С. 325–327.

13. Танский, В.В. Устройство защиты стрелы крана-трубоукладчика / В.В. Танский // Актуальные проблемы науки и техники глазами молодых ученых : материалы Международной практической конференции (Омск, 08–09 фев. 2016 г.). – Омск : СибАДИ, 2016. – С. 309–311.

14. Танский, В.В. Исследование горизонтальных колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика / В.В. Танский // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации : материалы II Международной научно-практической конференции / Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (Омск, 15–16 нояб. 2017 г.). – Омск : СибАДИ, 2017. – С. 56–60.

15. Танский, В.В. Анализ инженерных решений, направленных на снижение колебаний груза на стреле крана-трубоукладчика / В.В. Танский // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных : сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных / Министерство образования и науки Российской Федерации; Правительство Омской области; Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (Омск, 08–09 фев. 2018 г.). – Омск : СибАДИ, 2018. – С. 25–28.

16. Танский, В.В. Математические модели крана-трубоукладчика / Р.Ю. Сухарев, В.В. Танский // ОБРАЗОВАНИЕ. ТРАНСПОРТ. ИННОВАЦИИ. СТРОИТЕЛЬСТВО : сборник научных трудов национальной научно-практической конференции / Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (Омск, 19–20 апр. 2018 г.). – Омск : СибАДИ, 2018. – С. 79–82.

ТАНСКИЙ ВЯЧЕСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 22.08.2018
Формат 60х90 1/18. Бумага писчая.
Оперативный способ печати.
Усл. п. л. 1,0
Тираж 150

Отпечатано в типографии ИПК СибАДИ
644080, г. Омск, пр. Мира, 5