

На правах рукописи



Григорьев Павел Александрович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТРЕЛОВЫХ САМОХОДНЫХ
КРАНОВ ПРИ РАБОТЕ НА СЛАБОНЕСУЩИХ ГРУНТАХ**

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и
детали машин

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сладкова Любовь Александровна

Официальные оппоненты: **Савельев Андрей Геннадьевич**,
доктор технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
«Русский сертификационный центр»,
генеральный директор

Ивашков Николай Ильич,
кандидат технических наук,
Общество с ограниченной ответственностью
научно-производственное предприятие
«Подъемтранссервис», генеральный директор

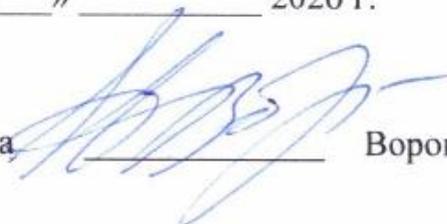
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Защита состоится 3 декабря 2020 г., в 15 часов 00 мин на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.rut-miit.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воронин Николай Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение устойчивости стреловых самоходных кранов при выполнении работ на слабонесущих грунтах является важной задачей. Это связано с тем, что значительная часть всех аварий грузоподъемных машин данного типа сопровождается опрокидыванием. Потеря устойчивости, как правило, приводит к разрушению самой машины без возможности её дальнейшего восстановления и эксплуатации и к возможным вторичным разрушениям и человеческим жертвам. Опрокидывание крана может произойти по различным причинам, но, как правило, это связано со значительным превышением опрокидывающего момента по сравнению с удерживающим. Одной из причин потери устойчивости стреловых самоходных кранов может быть просадка выносных опор крана (аутригеров) при выполнении работ на слабонесущих грунтах. В процессе исследований для подтверждения актуальности темы проанализированы ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору за 2008-2018 года.

В результате проведенного анализа выявлено, что среднее соотношение количества аварий зафиксированных при работе грузоподъемных кранов, приходящихся на стреловые самоходные краны (на гусеничном и автомобильном шасси) составляет 45 % от общего количества аварий.

По результатам анализа одной из основных причин опрокидывания стреловых самоходных кранов при их эксплуатации является потеря устойчивости при выполнении работ, в том числе значительное количество аварий происходит по причине неравномерной просадки грунта под аутригерами.

Таким образом, специфика и сложность работ, количество аварий, зафиксированных при эксплуатации стреловых самоходных кранов на слабонесущих грунтах, по отношению к другим видам грузоподъемного оборудования свидетельствуют об актуальности диссертационной работы.

Степень разработанности темы:

Вопросы нормирования методик расчёта устойчивости стреловых самоходных кранов отражены в работах В.С. Котельникова, А.А. Зарецкого, Г.А. Емельяновой, Е.В. Куликовой и др.

Исследованиям безопасной эксплуатации и обеспечения устойчивости стреловых кранов посвящены работы отечественных авторов Л.Г. Кифера, И.И. Абрамовича, М.П. Александрова, Я.С. Ватулина, М.М. Гохберга,

А.А. Зарецкого, С.А. Зыряновой, Ф.К. Иванченко, А.А. Ковина, М.В. Козлова, М.С. Корицова, К.М. Мамаева, Е.А. Потахова, Д.А. Потахова, А.В. Редькина, П.А. Сорокина, Л.А. Сладковой, А.В. Чернова и др.

Вопросы обеспечения грузовой устойчивости стреловых самоходных кранов были рассмотрены такими зарубежными авторами: R. Abo-Shanab, X. Ai, L.P. Bao, Z. Budniak, W.H. Chieng, D.D. Fujioka, T. Geisler, S.L. Jeng, T. Jones, W. Kacalak, M. Majewski, J.B. Qian, A. Rauch, N. Sepehri, W. Singhose, C.F. Yang и др.

Устойчивость мобильных грузоподъемных машин при выполнении работ на слабонесущих грунтах рассмотрена в работах авторов И.Д. Бровкина, И.С. Бычкова, С.И. Вахрушева, А.П. Грачева, А.В. Лагерева, И.А. Лагерева, А.В. Редькина, В.В. Сизова, Л.А. Сладковой, П.А. Сорокина, А.В. Чернова, В.С. Щербакова и др.

Объектом исследования являются краны стреловые самоходные общего назначения.

Предмет исследования – усилия под опорами и просадка их при работе стрелового самоходного крана на слабонесущих грунтах.

Цель диссертационного исследования – повышение устойчивости стреловых самоходных кранов при работе на слабонесущих грунтах.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи диссертационного исследования:**

- выявить классификационные признаки обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов;

- провести теоретические и экспериментальные исследования способа обеспечения устойчивости для работы стреловых самоходных кранов на слабонесущих грунтах;

- разработать научно обоснованное устройство и рекомендации по его практической реализации для обеспечения устойчивости при эксплуатации стреловых самоходных кранов на слабонесущих грунтах.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- выявлены классификационные признаки обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов;

- разработан способ обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов при работе на слабонесущих грунтах;

- разработана методика проведения эксперимента и получены результаты экспериментальных исследований обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов при работе на слабонесущих грунтах;

- предложено научно обоснованное усовершенствование конструкции стрелового самоходного крана для работы на слабонесущих грунтах.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что:

- разработанная методика проведения эксперимента и полученные результаты экспериментальных исследований позволяют проводить исследования по оценке усилий под опорами и их просадке при работе стрелового самоходного крана на слабонесущих грунтах любого состояния;

- теоретически и экспериментально подтверждена целесообразность усовершенствования конструкции стрелового самоходного крана для работы на слабонесущих грунтах.

Методология и методы исследования.

В диссертационной работе использованы обобщение, системный анализ справочной и научно-технической литературы по направлению исследования. Применены методы масштабного моделирования для проведения экспериментальных исследований. Обработка полученных результатов выполнялась в программных комплексах: Microsoft Excel, Mathcad Prime 4.0, Wolfram Mathematica 11.2.

Положения, выносимые на защиту:

- классификационные признаки обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований обеспечения устойчивости при работе стреловых самоходных кранов на слабонесущих грунтах;

- научно обоснованный способ и устройство обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов на слабонесущих грунтах.

Степень достоверности результатов.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы основана на достижениях в области теоретических и экспериментальных исследований в данном направлении.

Результаты экспериментальных исследований подтверждены критериями:

- воспроизводимости – Кохрена с доверительной вероятностью 0,95, числе степеней свободы 4, числе опытов 8;

- значимости коэффициентов уравнений регрессии – Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95, числе степеней свободы 7;

- адекватности уравнений регрессий – Фишера с доверительной вероятностью 0,95 и числами степеней свободы f_1 , f_2 .

Апробация работы. Основные и промежуточные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» РУТ(МИИТ) в 2018-2020 годах, а также на шести научно-технических конференциях и форумах российского и международного уровня:

- Международная научно-техническая конференция «Наземные транспортно-технологические комплексы и средства» (2019 год, ФГБОУ ВО «ТИУ», г. Тюмень);

- XXIII Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (4 апреля 2019 года, НИУ МГСУ, г. Москва);

- Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Энергоэффективность автотранспортных средств: Нанотехнологии, информационно-коммуникационные системы, альтернативные источники энергии» (4-7 июня 2019 года, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», г. Воронеж);

- Профессорский форум 2019 «Наука. Образование. Регионы» (2019 год, г. Москва);

- XXIV Московская международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы» (2020 год, МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва);

- Международный военно-технический форум «Армия-2020» (Круглый стол ФГБУ «ЦНИИИ ИВ» Минобороны России «Особенности подконтрольной эксплуатации средств инженерного вооружения при их жизненном цикле», 26 августа 2020 года).

Реализация и внедрение результатов работы:

Результаты исследований внедрены в учебный процесс в ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» на кафедре «Наземные транспортно-технологические средства» при изучении дисциплин: «Грузоподъемные машины и оборудование», «Испытания подъемно-транспортных, строительных, дорожных средств и оборудования».

Теоретические разработки диссертации и их практическая реализация рекомендованы к внедрению на предприятиях ООО «Т-СЕРВИС» (г. Брянск) и ФГБУ «ЦНИИИ ИВ» Минобороны России.

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 10 печатных работ, из них 3 работы в рецензируемых научных изданиях и получен 1 патент на изобретение RU 2 723 503 C1.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения с основными результатами и выводами, списка литературы из 161 наименования, 5 приложений. Общий объем диссертации составляет 269 страниц, включая 57 рисунков и 23 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **первом разделе** при анализе аварий грузоподъемных машин и причин их возникновения за период с 2008 по 2018 годы было выявлено, что на башенные краны приходится (38 %), далее приоритет принадлежит кранам самоходным на автомобильном ходовом оборудовании (26 %) и кранам на гусеничном ходовом оборудовании (19 %). На другие типы грузоподъемных машин приходится 17 %. В зависимости от характера возникновения причины аварий можно классифицировать следующим образом:

- техногенного характера (неисправность устройств, приборов безопасности);
- природного характера (ураган, шквалистый ветер);
- организационного характера (нарушение технологической и трудовой дисциплины, неправильные действия персонала, несвоевременная регистрация подъемных средств и. п.);

- эксплуатационного характера (перегруз, выполнение погрузочно-разгрузочных работ на слабонесущих грунтах, нарушение правил эксплуатации кранов при производстве работ).

Большая часть аварий связана с опрокидыванием крана при работе на слабонесущих грунтах в результате потери устойчивости, что в настоящее время не в полной мере отражено в исследованиях других авторов. В классическом варианте для оценки устойчивости крана было принято использовать коэффициент устойчивости k_y определяемый согласно нормативным документам, как отношение опрокидывающего момента к удерживающему относительно ребра опрокидывания (расчёт грузовой и собственной устойчивости, расчёт на прочном основании при их движении и при ударе, расчёт на сейсмоустойчивость).

Проведенный анализ патентной литературы с глубиной поиска более 40 лет, позволил выявить способы и классификационные признаки обеспечения устойчивости: обеспечение безопасности и повышение надежности; повышение удобства эксплуатации и монтажа. Осуществляются они за счёт: позиционирования опор; горизонтирования платформы; изменения конструкции аутригеров; контроля устойчивости; повышения несущей способности опор; изменения системы гидропривода выносных опор. Выявлено, что к классификационным признакам для стреловых самоходных кранов необходимо добавить показатель устойчивости работы на слабонесущих грунтах.

При анализе методик теоретических и экспериментальных исследований обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов, с учетом накладываемых ограничений, было выявлено, что они не в полной мере отражают изменение неравномерности просадки грунта под опорами в зависимости от веса поднимаемого груза, положения стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Результаты идентично проведенных экспериментов отличаются друг от друга с точки зрения графической интерпретации и числовыми значениями, что свидетельствует о необходимости разработки методики проведения экспериментальных исследований, позволяющей оценить противоречие в указанных работах.

Во втором разделе:

- рассмотрены типы и механические характеристики слабонесущих грунтов с позиций оценки их несущей способности;

- установлено допустимое давление на грунт опор стрелового самоходного крана которое зависит от его грузоподъёмности и лежит в пределах от 0,4 до 1,8 МПа (для кранов грузоподъёмностью до 400 т).

Для разработки усовершенствованного устройства обеспечения устойчивости самоходных стреловых кранов проседание выносных опор A , B , D_1 и D_2 в грунт представлено в виде расчетной схемы (рисунок 1).

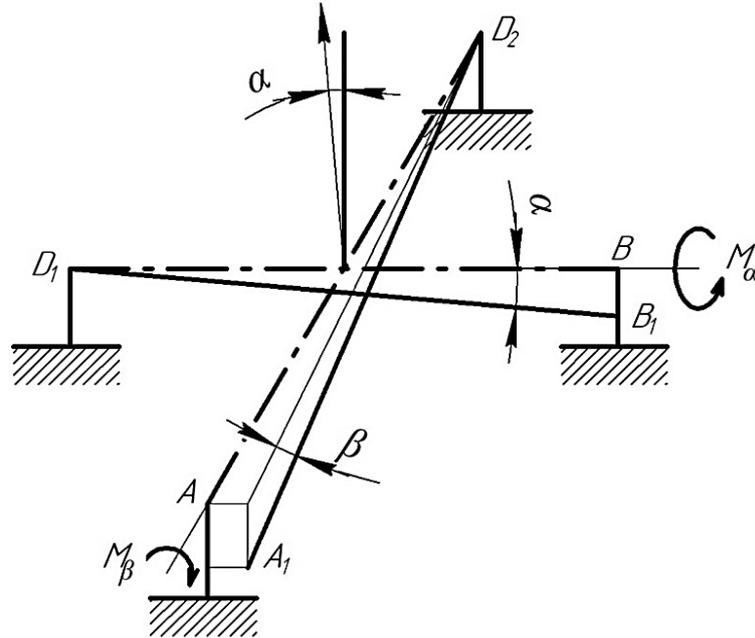


Рисунок 1 – Модель взаимодействия выносных опор с грунтом

Предполагается, что опоры D_1 и D_2 имеют допустимую величину погружения, которая принята за точку отсчета. Тогда при погружении опоры B в грунт, она переместится в положение B_1 , что повлечёт смещение опоры A вниз и вправо, т.е. в положение A_1 и смещение вертикальной оси системы на угол α .

Дифференциальное уравнение второго порядка, характеризующее движение четырехопорной системы, имеет вид:

$$\begin{cases} J \cdot \ddot{\alpha} + h \cdot \dot{\alpha} - \mu \cdot \beta - H \cdot \dot{\beta} = 0 \\ J \cdot \ddot{\beta} + h \cdot \dot{\beta} - \mu \cdot \beta + H \cdot \dot{\alpha} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где J – момент инерции системы, кг·м²; $\ddot{\alpha}$, $\ddot{\beta}$ – угловые ускорения системы, рад/с²; h – коэффициент момента сил сопротивления, с; $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$ – угловые скорости системы, рад/с; μ – коэффициент Пуассона; β – угол поворота системы, рад; $H = I \cdot \Omega$ – кинетический момент инерции относительно оси вращения, кг·м²/с; I – собственный момент инерции системы относительно оси вращения, кг·м²; Ω – угловая скорость вращения системы относительно собственной оси вращения, рад/с.

Решение системы (1) при наличии сил сопротивления позволяет оценить коэффициент момента сил сопротивления:

$$h \geq \frac{\mu \cdot J}{H} = \frac{\mu \cdot J}{I \cdot \Omega}. \quad (2)$$

Для обеспечения горизонтирования крана необходимо определить сопротивление в опорах при условии выполнении неравенства (2).

Помимо напряжений в грунте при погружении в него одной опоры в точке B (рисунок 2) возникает боковой увод опоры A , который возможен при невыполнении условия:

$$[\sigma] > \frac{P \cdot A \cdot \Delta l_1 \cdot \sin \alpha}{2}, \quad (3)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение сжатия в грунте, МПа; P – усилие сжатия грунта, Н; A – площадь опоры, м²; Δl_1 – длина сжатого грунта под опорой, м; α – угол смещения вертикальной оси системы от вертикали.

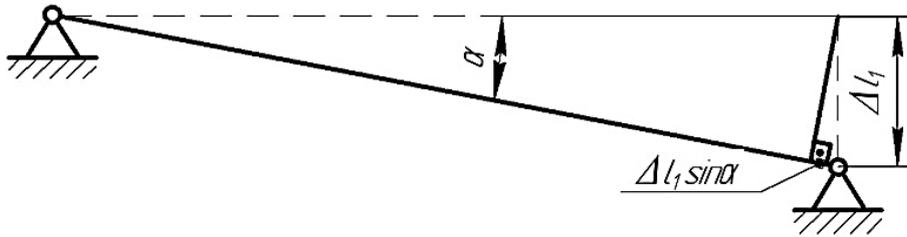


Рисунок 2 – Усилие увода опоры A в сторону

Используя под опорами сплошную подкладку в виде ленты, можно изменить состояние опорной поверхности. Установлено, что напряжения под опорой будут распределяться по дуге окружности радиуса R и определяются как:

$$R = |\alpha| = \sqrt{\frac{P}{2\sigma}} \Rightarrow \sigma = \frac{P}{a^2 \cdot 2} = \varepsilon_2 \cdot E, \quad (4)$$

где a – сторона опоры, м; ε_2 – модуль деформации грунта с использованием ленты; E – модуль упругости грунта, МПа.

Оценка деформации опорной поверхности при наличии сплошной подкладки (ленты) и без нее проводится с помощью соотношения:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{2R^2}{A}, \quad (5)$$

где ε_1 – модуль деформации грунта без использования ленты; A – площадь опоры, м².

Из соотношения (5) выявлено, что давление под опорами в первом случае (для не модернизированной системы) будет в два и более раз выше.

Рассмотрение работы крана в условиях статического равновесия позволило получить зависимости для определения усилий под его опорами:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1 = A \\ R_2 = \frac{G_{ш}}{2} + \frac{G}{2} + \frac{G_{п}}{2} + \frac{G_{пов.ч.}}{2} - \frac{G \cdot l \cos \alpha \sin \beta - G_{п} \cdot k \sin \beta}{b} - A \\ R_3 = \frac{G \cdot l \cos \alpha \sin \beta - G_{п} \cdot k \sin \beta}{b} - \\ - \frac{P \cdot l \cos \alpha \cos \beta - G_{п} \cdot k \cos \beta - G_{ш} \cdot a_1}{a} \\ R_4 = \frac{-\frac{G_{ш}}{2} - \frac{G}{2} - \frac{G_{п}}{2} - \frac{G_{пов.ч.}}{2} + \frac{(G_{ш} + G + G_{п} + G_{пов.ч.})a_2}{a}}{a} + A \\ \frac{G \cdot l \cos \alpha \cos \beta - G_{п} \cdot k \cos \beta - G_{ш} \cdot a_1}{a} + G_{ш} + G + G_{п} + G_{пов.ч.} - \\ - \frac{(G_{ш} + G + G_{п} + G_{пов.ч.})a_2}{a} - A \end{array} \right. \quad (6)$$

где A - начальное (допускаемое) проседание одной из опор в грунт ($A \in [0; G]$), кН; G_n - вес противовеса, кН; $G_{ш}$ - вес шасси крана, кН; $G_{пов.ч.}$ - вес поворотной части крана, кН; G - вес груза, кН; R_i - реакции в опорах, кН; l - длина стрелы, м; a - база выносных опор, м; b - расстояние между выносными опорами, м; a_1 - расстояние от оси вращения поворотной части до центра массы шасси крана, м; a_2 - расстояние от оси вращения поворотной части крана до оси, проходящей через опоры R_1 и R_4 , кН; k - расстояние от оси вращения поворотной части до центра массы противовеса крана, м; α - угол наклона стрелы к горизонту (вылет стрелы); β - угол отклонения стрелы от оси, совпадающей с продольной осью крана.

Полученные выражения для определения опорных реакций (усилий под опорами) позволяют получить зависимости для массы поднимаемого груза G и углов α и β при выборе рационального положения стрелы крана, обеспечивающего горизонтирование платформы и устойчивую работу самоходного крана при эксплуатации на слабонесущих грунтах.

В третьем разделе на основе теории планирования трехфакторного эксперимента, обусловленного теоретическими исследованиями второго раздела, при числе опытов $N = 2^3 = 8$ и числе параллельных опытов $k = 5$ была проведена оценка распределения усилий под выносными опорами стрелового самоходного крана и определены численные значения величин их проседания на грунтах с различными физико-механическими характеристиками, что является научной задачей диссертационной работы.

Входными параметрами при проведении эксперимента являлись вес поднимаемого груза G и углы отклонения стрелы крана в вертикальной α и горизонтальной β плоскостях с заданными граничными условиями, которые установлены согласно руководству по эксплуатации моделируемого крана.

Выходные параметры при проведении эксперимента (усилие давления на грунт P и величину проседания грунта под каждой опорой h) описывается функционалом вида:

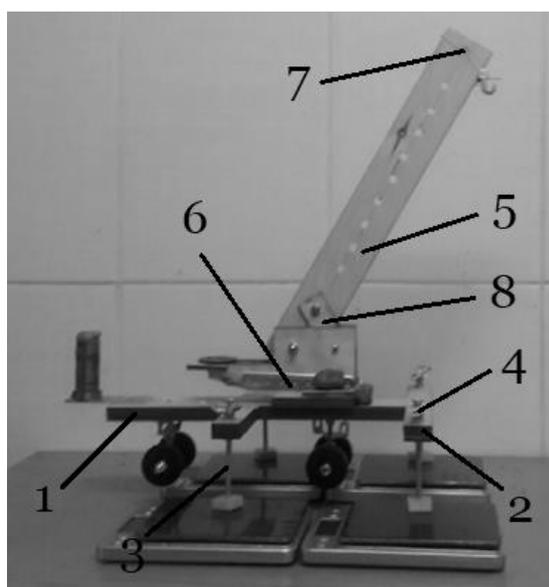
$$P = f(\alpha, \beta, G). \quad (7)$$

Эксперимент проводился в два этапа. Алгоритм проведения экспериментальных исследований, цель и задачи представлены на рисунке 3.

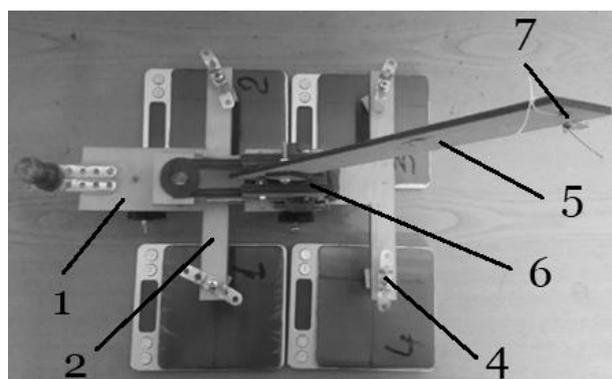


Рисунок 3 – Алгоритм проведения экспериментальных исследований

На 1-м этапе для проведения исследований (рисунок 4) была изготовлена модель крана с масштабным коэффициентом линейного моделирования $k_l = 31,6$. Экспериментальная установка для проведения исследований содержит раму 1, на которой расположены в перпендикулярном к ней направлении две поперечные балки 2 по концам которой размещены с соблюдением линейного масштаба четыре выносные опоры 3. Высота опор регулируется гайками 4. Стрела 5 размещается на поворотном круге 6, и на не защемленном конце имеет кольцо 7 для крепления подвеса с грузом. Стрела 5 имеет возможность поворота относительно вертикальной оси, обеспечивая исследуемый фактор $X_2(\beta)$ и изменения угла наклона к горизонту – фактор $X_1(\alpha)$ за счет наличия шарнира 8.



а)



б)

а) главный вид; б) вид сверху
Рисунок 4 – Экспериментальная установка (фото)

Оценку воспроизводимости результатов эксперимента проводили по критерию Кохрена. Результаты проведения эксперимента для одного из восьми опытов (при максимальных значениях исследуемых факторов), по определению усилий под каждой опорой, представлены в таблице 1 и свидетельствуют о неравномерности распределения усилий под опорами.

Таблица 1 – Результаты проведения эксперимента

№ опыта	Факторы			$Y_1 (P_1)$, г	$Y_2 (P_2)$, г	$Y_3 (P_3)$, г	$Y_4 (P_4)$, г
	$X_1 (\beta)$, °	$X_2 (\alpha)$, °	$X_3 (G)$, г	Измер. величина	Измер. величина	Измер. величина	Измер. величина
1 опыт							
1	60°23′	90°	443,130	0,000	161,850	474,230	311,820
2	60°23′	90°	443,130	0,000	163,880	471,230	308,930
3	60°23′	90°	443,130	0,000	164,830	471,690	308,190
4	60°23′	90°	443,130	0,000	161,870	473,770	310,920
5	60°23′	90°	443,130	0,000	160,390	470,920	313,720

Обработка результатов первого этапа трехфакторного эксперимента представлена регрессионной зависимостью, которая имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 , \quad (8)$$

где $b_0, b_1 \dots$ – коэффициенты уравнения регрессии.

Значимость коэффициентов уравнений регрессии проверялась по критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95. Полученные уравнения регрессии представлены в таблице 2.

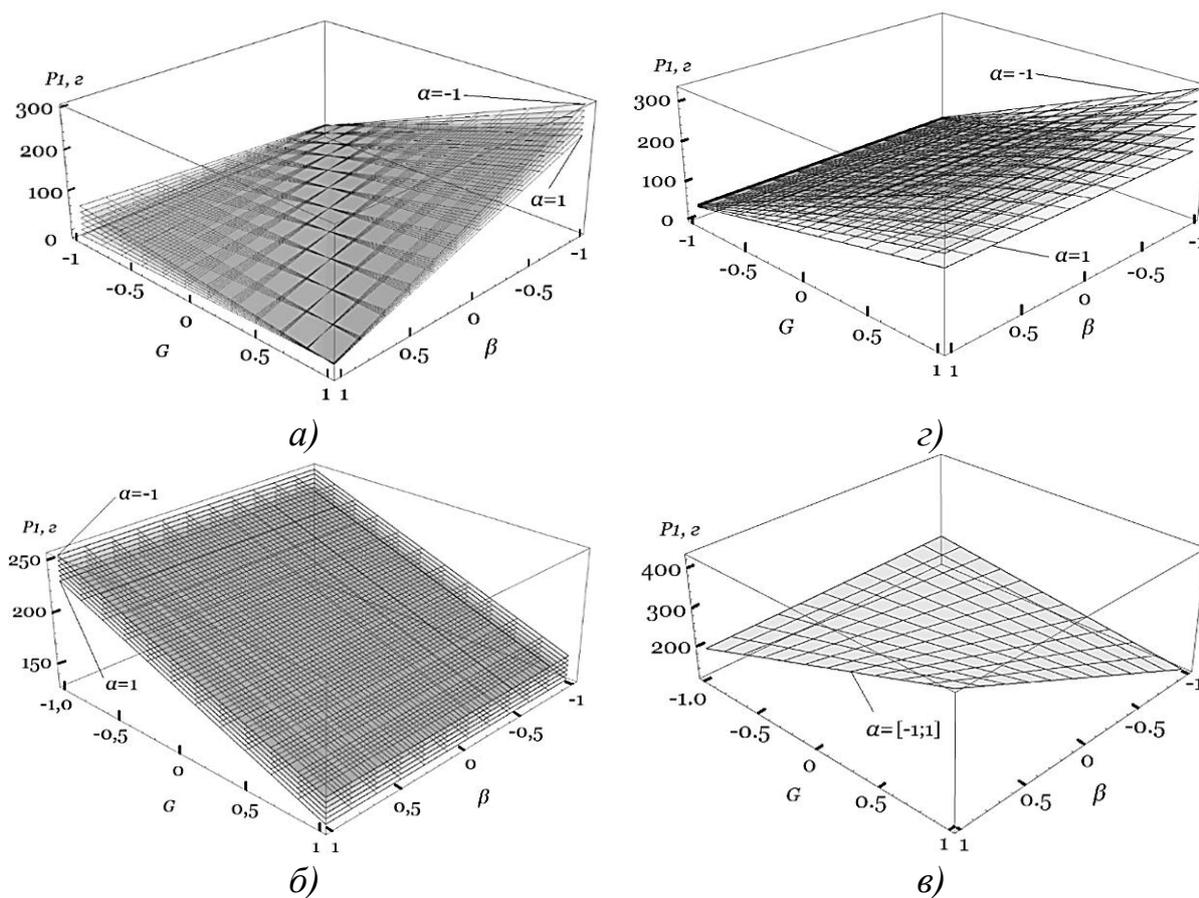
Проверку адекватности полученных уравнений регрессии выполнена по критерию Фишера при доверительной вероятности 0,95.

Таблица 2 – Уравнения регрессии усилий в опорах крана

№	Уравнение регрессии
1	$P_1 = 76,7235 - 65,434X_2 + 54,242X_3 - 18,0655X_1X_2 - 65,5315X_2X_3 + 19,4415X_1X_3$
2	$P_2 = 191,6033 + 11,7973X_1 - 50,1763X_3$
3	$P_3 = 283,0505 + 72,9625X_2 + 36,134X_3 + 80,62X_2X_3$
4	$P_4 = 142,693 + 40,5645X_1 + 107,721X_3 + 37,3855X_1X_3$

При анализе уравнений регрессии установлено, что усилия под первой и четвертой опорах достигают максимального значения при минимальных значениях фактора X_1 и максимальной величине фактора X_3 , причём под первой опорой при минимальном значении фактора X_2 , а под четвертой изменение усилия не зависит от этого фактора. Под второй опорой максимальное усилие достигается при минимальных значениях факторов X_3 и X_1 и не зависит от фактора X_2 . Под третьей опорой при максимальных значениях факторов X_2 и X_3 и не зависит от фактора X_1 .

Графическая интерпретация изменения усилий под опорами в зависимости от исследуемых факторов представлена на рисунке 5.



а – 1-я опора; б – 2-я опора; в – 3-я опора; г – 4-я опора.

Рисунок 5 - Изменение усилия P в опорах в зависимости от угла отклонения β стрелы от оси, совпадающей с продольной осью крана (X_2), и массы поднимаемого груза G (X_3) при изменении угла наклона α стрелы к горизонту (вылет стрелы) (X_1) от -1 до 1

На 2-м этапе проводилась оценка величины погружения опоры в грунт h . В качестве опоры использовался плоский штамп, размеры которого с высокой степенью точности соответствовали масштабной модели опорной поверхности аутригера крана. В процессе этого этапа эксперимента изменялась величина нагрузки на штамп в зависимости от изменения усилий под опорами, полученными при проведении первого этапа эксперимента. Экспериментальная установка, представленная на рисунке 6, состоит из: штатива 1 с установленным направляющим стержнем 2 на который нанесена шкала 3 для оценки уровня просадки штампа; направляющей втулки 4 с возможностью установки штампов различной площади; грузов 5 различной массы для нагружения штампа; кюветов 6 с грунтами, обладающими различными механическими характеристиками; ленты 7 для оценки эффективности предлагаемого способа.

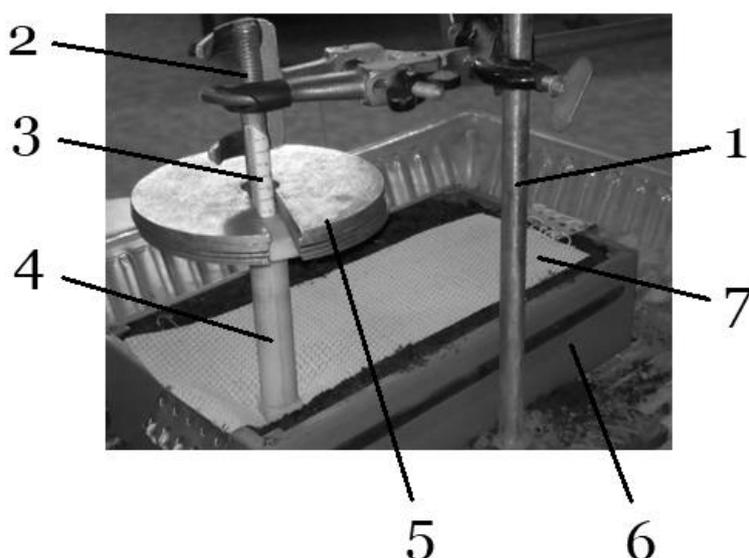


Рисунок 6 – Установка для определения глубины вдавливания штампа

Исследования проседания штампа в грунт были проведены в сравнительном варианте для базовой модели крана и с применением предлагаемого способа обеспечения устойчивости на запланированных типах грунтов (песок и супесь). Формат линии тренда зависимости $h = f(P)$ дает наилучшие показатели при линейном распределении результатов экспериментальных исследований, о чем свидетельствует величина среднеквадратического отклонения R^2 . Результаты обработки представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Результаты обработки экспериментальных данных

№ п/п	Тип грунта	Вид рабочего оборудования	Эмпирическая зависимость $h = f(P)$	Среднеквадратическое отклонение R^2
1	Песок сухой	До модерн.	$h = 0,012 \cdot P - 0,0846$	0,941
2		После модерн.	$h = 0,0039 \cdot P + 0,624$	0,886
3	Супесь сухая	До модерн.	$h = 0,0352 \cdot P + 2,3076$	0,974
4		После модерн.	$h = 0,0179 \cdot P + 0,6502$	0,979
5	Песок влажный	До модерн.	$h = 0,0025 \cdot P + 0,3953$	0,865
6		После модерн.	$h = 0,0022 \cdot P + 0,1885$	0,945
7	Супесь влажная	До модерн.	$h = 0,0263 \cdot P + 1,2506$	0,989
8		После модерн.	$h = 0,0164 \cdot P + 1,3577$	0,963

Графическая интерпретация результатов представлена на рисунке 7.

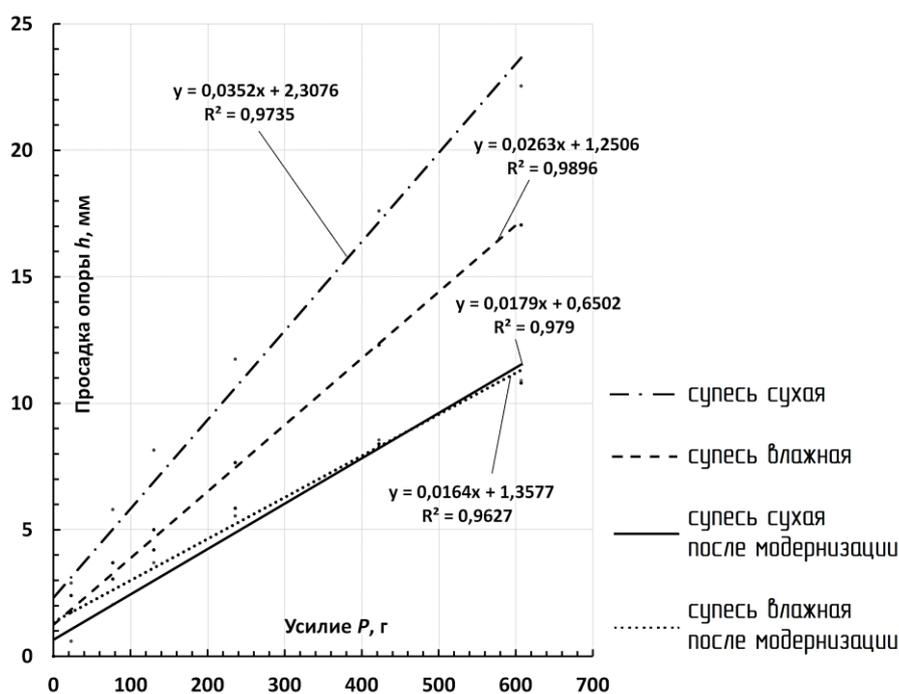
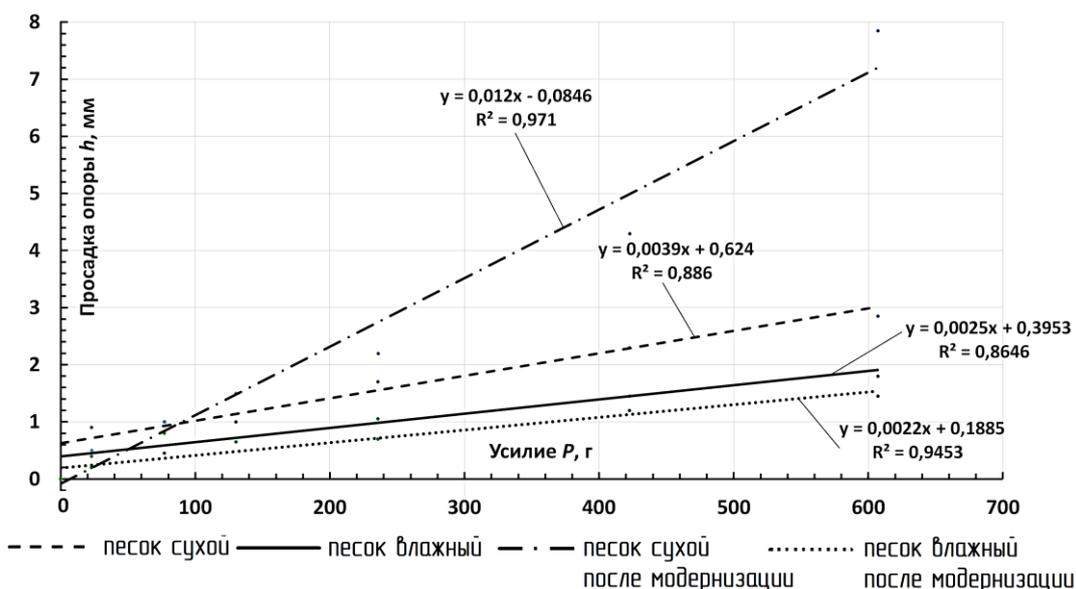


Рисунок 7 – Номограмма просадки штампа h в различные типы грунтов при изменении значений усилий вдавливания P

Очевидно, что величина просадки аутригеров модернизированного крана при работе на неустойчивых грунтах ниже, чем у не модернизированного независимо от типа грунта. Выявлено, что при изменении веса груза для условий проведенных исследований, эффективность применения предлагаемой модернизации увеличивается с 1,25 до 2,27 раз

В четвертом разделе для подтверждения достоверности проведенных исследований была проведена сравнительная оценка результатов теоретических и экспериментальных исследований (таблица 4).

Таблица 4 – Оценка погрешности результатов теоретических и экспериментальных исследований

№ п/п	Тип грунта	Вид рабочего оборудования	Величина проседания h , мм		Относительная погрешность
			экспериментальные	теоретические	
1	Песок сухой	До модерн.	69	51	0,261
		После модерн.	43	37	0,140
2	Супесь сухая	До модерн.	283	231	0,184
		После модерн.	128	101	0,211
3	Песок влажный	До модерн.	27	24	0,111
		После модерн.	19	16	0,158
4	Супесь влажная	До модерн.	197	157	0,203
		После модерн.	141	116	0,177

Анализ таблицы 4 показывает, что величина погрешности экспериментальных и теоретических исследований не превышает величины суммарной ошибки показаний приборов при проведении экспериментальных исследований на модели крана. Следовательно, полученные зависимости, представленные на рисунке 7 возможно использовать в качестве номограммы для определения проседания грунта под опорами крана для грунтов различного состояния в зависимости от их физико-механических свойств.

Для повышения устойчивости стреловых самоходных кранов при работе на слабонесущих грунтах предлагается устройство, которое работает следующим образом. Машина, состоящая из ходового оборудования 1, выносных опор 2, рамы 5 с расположенной на ней поворотной платформой 3 и установленным на ней рабочим оборудованием 4 (рисунок 8), останавливается. После остановки, во вращение приводится горизонтально установленная ось барабана 6 с лентой 9, установленная в кронштейнах 8 спереди (сзади) машины. Барабан 7 с лентой 9, состоящий из двух частей и, располагающийся на оси 6 перемещается вдоль этой оси. Крайние точки оси, которая выполнена телескопической раздвигаются так, чтобы они лежали за

внешней линией аутригеров 2. Ширина барабана 7 должна быть не менее расстояния между крайними внутренними точками ходового оборудования и внешними точками выносных опор (рисунок 9). При свободном вращении барабана 6 происходит опускание ленты 9, горизонтальная поверхность которой соприкасается с колесом машины. После этого машина начинает движение вперед (назад) при соответствующем расположении барабана спереди (сзади), наезжая на ленту до тех пор, пока все ходовое оборудование 1 не будет расположено на ленте. Длина ленты (горизонтальной поверхности) должна быть не менее расстояния от линии сбегания ленты с барабана 6 до точки касания ходового оборудования 1 с поверхностью грунта, причём общая длина ленты 9 не менее базы машины. После этого опускаются аутригеры 2, и располагаются на ленте 9.

Предлагаемое устройство позволяет значительно увеличить площадь опорной поверхности, что ведет к обеспечению горизонтирования стреловых самоходных кранов на слабонесущих грунтах.

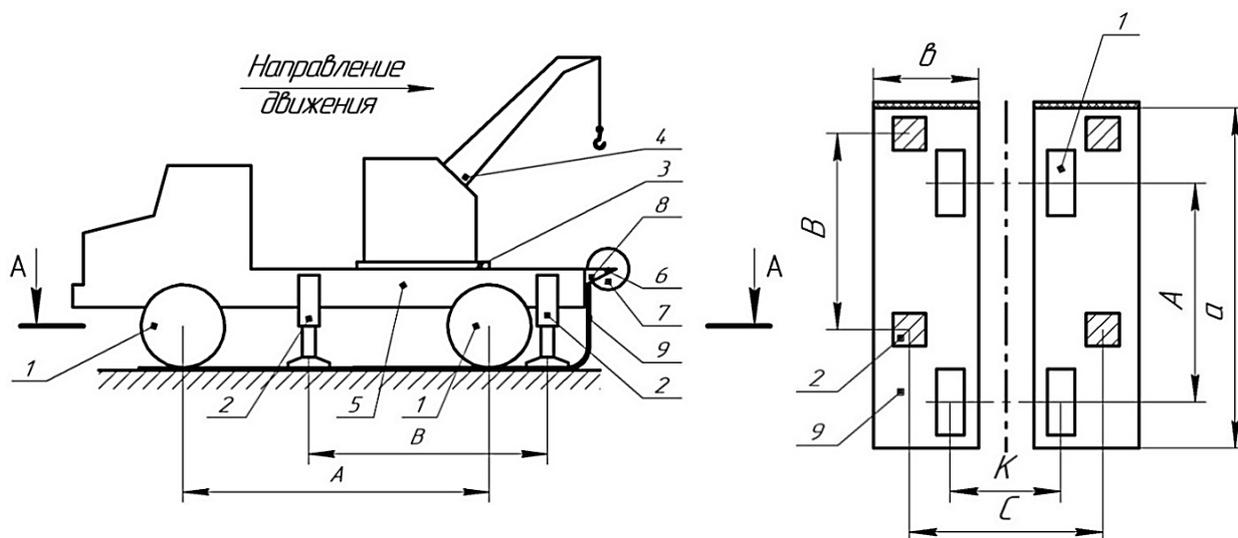


Рисунок 8 - Стреловой кран на колесном ходу

Рисунок 9 - Стреловой кран на колесном ходу (сечение А-А)

Для оценки сцепления колес с лентой, обеспечивающего разматывание ее с барабана при наезде крана на ленту перед его остановкой для выполнения работ, рассмотрено изменение давления колеса на грунт, находившегося в состоянии движения. В результате чего перемещение центра тяжести указанной системы равно:

$$x = \frac{V_0}{\sqrt{gl}}, \quad (9)$$

где V_0 – скорость перемещения машины; l – колесная база машины.

Очевидно, что смещение центра тяжести от положения равновесия зависит от скорости перемещения транспортного средства и колесной базы машины. При малых скоростях движения величина смещения будет стремиться к нулю, что обеспечит равномерность распределения нагрузки под опорами. При более высокой скорости необходимо изменять моменты инерции системы относительно положения центра тяжести. При остановке крана величина смещения будет равна нулю и распределение давления под опорами должно быть равномерным.

Для оценки начальных условий натяжения ленты рассмотрена работа в условиях статического равновесия системы.

Реакция между колесом и лентой определяется по зависимости:

$$X = -F_{\text{тр.к}} - F_{\text{тр.л}} + T = \frac{N}{V}\eta - g(mf - m_1f_1), \quad (10)$$

где $F_{\text{тр.к}}$, $F_{\text{тр.л}}$ – силы трения колеса и ленты, соответственно, Н; m , m_1 – массы колеса и ленты (весом ленты пренебречь), кг; T – сила тяги, Н; f – коэффициент трения качения колеса; f_1 – коэффициент трения скольжения ленты; N – мощность, Вт; V – скорость движения, м/с; η – КПД.

Сила натяжения в ленте определяется по зависимости:

$$P = g \cdot [m \cdot f + m_1 \cdot (f_1 + 1)]. \quad (11)$$

Из выражения (11) выявлено, что для обеспечения нормальной работы установки необходимо, чтобы величина тягового усилия была больше суммарной силы трения качения колеса и скольжения ленты. В противном случае будет происходить «убегание» ленты перед ходовым оборудованием машины.

Исследование работы устройства в кинематике позволяет определить соотношение между скоростью перемещения машины и скоростью сбега ленты с барабана.

Скорость движения машины определяется как:

$$V_M = \omega_2 R - V, \quad (12)$$

где R – радиус колеса, м; ω_2 – угловая скорость вращения колеса, рад/с.

Исследование работы устройства в динамике позволило определить соотношение между угловыми скоростями барабана и колеса, в результате чего скорость у барабана 1 и колеса 2 равны:

$$V = \omega_1 r = \omega_2 R, \quad (13)$$

где r – радиус барабана, м; ω_1 – угловая скорость вращения барабана, рад/с.

Сила натяжения ленты P в динамическом режиме определяется по формуле:

$$P = -\frac{J_{x_1}}{J_{x_2}} \cdot \frac{(M - S_2 R) R}{r} + S_1 r - M_C, \quad (14)$$

где J_{x_1} – момент инерции барабана, кг·м²; J_{x_2} – момент инерции системы, кг·м²; M – момент на колесе, Н·м; S_1 – силы сопротивления ленты, Н; S_2 – силы сопротивления на колесе, Н; M_C – момент препятствующий движению, Н·м.

Проведенные исследования в статическом, кинематическом и динамическом режимах нагружения позволили определить соотношением скоростей движения крана и разматывания ленты с барабана, а также определить силу натяжения в ленте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Анализ состояния вопроса, проводимый по результатам статистики аварийности стреловых самоходных кранов, методам расчета устойчивости крановых конструкций, современным техническим решениям в области обеспечения их устойчивости и методикам проведения эксперимента позволил выявить:

- актуальность работы, определяемую числом аварий, сопровождаемых человеческими жертвами, которое для стреловых самоходных кранов на автомобильном и гусеничном ходовом оборудовании превышает аварийность башенных кранов на 7 %;

- дополнительные классификационные признаки обеспечения устойчивости самоходных кранов, связанные с работой на слабонесущих грунтах;

- необходимость уточнения отдельных теоретических положений для получения расчетных зависимостей, позволяющих регулировать работу самоходных кранов в процессе эксплуатации на слабонесущих грунтах;

- отсутствие четких рекомендаций по усовершенствованию стреловых самоходных кранов для обеспечения устойчивой работы на слабонесущих грунтах. Они направлены, в основном, на обеспечение безопасности и повышение надежности за счет обеспечения и контроля устойчивости от опрокидывания и повышение удобства эксплуатации и монтажа выносных опор за счет изменения их конструкции, что сопряжено с ее усложнением;

- что используемые методики проведения экспериментальных исследований при работе самоходного кранового оборудования, с учетом

накладываемых ограничений, не в полной мере отражают изменение неравномерности просадки грунта под опорами в зависимости от веса поднимаемого груза, положения стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

2 При проведении теоретических исследований устойчивости самоходных кранов получены зависимости, позволяющие выбрать новое усовершенствование самоходного крана за счет увеличения опорной поверхности, обеспечивающей ее изменение. Исследования изменения сжатия грунта под опорами проводимые с учетом энергетического состояния потенциала системы «опора-грунт» позволили доказать, что сжатие грунта под опорами по глубине происходит по закону показательной функции.

3 Разработанная методика трехфакторного эксперимента на модели крана КС-3577-4-1 с масштабом моделирования 31,6, проводимого в два этапа при доверительной вероятности 0,95 и проверкой результатов по критериям Кохрена, Стьюдента и Фишера позволила:

- установить неравномерность распределения усилий в зависимости от влияющих факторов (угол наклона α стрелы к горизонту (вылет стрелы), угла поворота стрелы β в вертикальной плоскости и массы поднимаемого груза G), что подтверждено теоретическими исследованиями; исследованиями, приведенными выше;

- получить уравнения регрессии изменения усилий под опорами крана для традиционного способа обеспечения устойчивости и предлагаемого. Установлено преимущество работы на слабонесущих грунтах крана предлагаемого способа обеспечения устойчивости перед традиционным до 2,27 раз в зависимости от типа грунта и его состояния.

4 Зависимости, предлагаемые для оценки погружения опор в грунт для различных типов грунтов были апробированы, при этом величина погрешности экспериментальных и теоретических исследований не превышает величины суммарной ошибки при определении показаний приборов при проведении экспериментальных исследований на модели крана. Следовательно, полученные зависимости, представленные на рисунке 3.18 возможно использовать в качестве номограммы для определения проседания грунта под опорами крана для грунтов различного состояния в зависимости от их физико-механических свойств.

5 Предложено конструктивное решение устройства обеспечения устойчивости, которое предполагает увеличение площади опорной

поверхности под крановыми опорами и (или) ходовым оборудованием и изменение несущей способности грунта за счет размещения под выносными опорами гибкой ленты, которая сматывается с барабанов, установленных спереди (сзади) на раме крана.

б) Была выявлена физическая природа неравномерности распределения давления под ходовым оборудованием для транспортного средства, находящегося в равновесии в произвольный момент времени t и оценена скорость наезда колеса на ленту, которая должна согласовываться со скоростью разматывания ленты с барабана в момент установки крана перед началом работ. Проведенные исследования предлагаемого устройства обеспечения устойчивости стрелового самоходного крана при работе на слабонесущих грунтах в статическом, кинематическом и динамическом режимах нагружения позволили определить соотношением скоростей движения базового тягача и барабана, определить силу натяжения в ленте. Установлено, что сила натяжения в ленте зависит от соотношения радиуса барабана и радиуса колеса ходового оборудования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

а) публикации в рецензируемых научных изданиях

1 Сладкова, Л.А. Моделирование усилий в опорах машин основного технологического назначения на примере стрелового самоходного крана / Л.А. Сладкова, П.А. Григорьев, В.В. Крылов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2019. – №4. – С.516-522. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-04-516-522>

2 Григорьев, П.А. Теоретическое и экспериментальное обоснование изменения усилий в опорах стрелового самоходного крана / П.А. Григорьев, Л.А. Сладкова, В.В. Крылов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2020. – №2. – С.43-52. DOI: <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-2020-2-43-52>

3 Григорьев, П.А. Патентный анализ современных технических решений для обеспечения устойчивости крановых конструкций / П.А. Григорьев, Л.А. Сладкова // Строительные и дорожные машины. – 2020. – №7. – С.38-42.

б) зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности

4 Патент 2723503 Российская Федерация, МПК7 В66С 23/78, В66С 23/72, В66С 23/62, В66С 23/18. Устройство обеспечения горизонтирования кранов на слабонесущих грунтах / П.А. Григорьев, В.В. Крылов,

Л.А. Сладкова; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Российский университет транспорта" (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), РУТ (МИИТ). – № 2019121342; заявл. 08.07.2019; опубл.: 11.06.2020, Бюл. № 17. – 9 с.

в) публикации в научных журналах, материалах конференций

5 Григорьев, П.А. Анализ работы и способов обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов на слабонесущих грунтах / П.А. Григорьев, В.В. Крылов, М.В. Горелова, Л.А. Сладкова // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства. Материалы международной научно-технической конференции. – 2019. – С.55-60.

6 Григорьев, П.А. Классификационные признаки обеспечения безопасности крановых конструкций / П.А. Григорьев // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник докладов XXIII Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – М., 2019. – С.300-304.

7 Сладкова, Л.А. Моделирование устройства горизонтирования поверхности транспортных средств при работе на слабонесущих грунтах / Л.А. Сладкова, П.А. Григорьев // Профессорский форум 2019 «Наука. Образование. Регионы». – 2019. – С.164-170.

8 Сладкова, Л.А. Устройство обеспечения горизонтирования машин на слабонесущих грунтах / Л.А. Сладкова, П.А. Григорьев, В.В. Крылов // Энергоэффективность автотранспортных средств: нанотехнологии, информационно-коммуникативные системы, альтернативные источники энергии: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4-7 июня 2019 года – 2019. – С.209-217.

9 Григорьев, П.А. Анализ методов исследования и оценки обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов при работе на слабонесущих грунтах / П.А. Григорьев, В.В. Крылов // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы. Сборник докладов XXIV Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – М., 2020. – С.53-55.

г) учебно-методическое пособие (по материалам диссертации)

10 Сладкова, Л. А. Грузоподъемные машины и оборудование: Учебно-методическое пособие к лабораторным работам / Л.А. Сладкова, П.А. Григорьев, В.В. Крылов, И.В. Трошко. – М.: РУТ (МИИТ). – 2020. – 40 с.

Григорьев Павел Александрович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТРЕЛОВЫХ САМОХОДНЫХ КРАНОВ ПРИ РАБОТЕ НА СЛАБОНЕСУЩИХ ГРУНТАХ

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и
детали машин

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 20 г. Изд. № _____ Формат бумаги 60x84/16

Заказ № _____ Объем 1,5 усл. п.л. Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9,
ЦСО Отдел дизайна, верстки и печати РУТ (МИИТ)