

На правах рукописи



Потахов Егор Александрович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ
ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО СТРЕЛОВОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ
КРАНОВ**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные
и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

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

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

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

Толоконников Александр Сергеевич,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет», кафедра «Подъемно-транспортные
машины и оборудование», доцент.

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого».**

Защита состоится 01.02.2022 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.02** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220). Тел./Факс: (812) 316-58-73, e-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/potahov-egor-aleksandrovich>.

Автореферат разослан «15» декабря 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Олещенко Е. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно статистическим данным Ростехнадзора, подавляющая часть аварий и случаев смертельного травматизма при эксплуатации подъемных сооружений в 2012–2019 годах соответствуют эксплуатации грузоподъемных кранов (79–96 % аварий). При этом 80 % случаев отказов грузоподъемных машин связано с динамическими нагрузками. Из всех типов грузоподъемных кранов наибольшее распространение получили стреловые самоходные краны (ССК), оборудованные телескопическим стреловым оборудованием. Нагрузки, оказывающие воздействие на телескопическую стрелу, являются одним из факторов, приводящих кран к аварийной ситуации. Отклонение оголовка стрелы, вызванное свободными и вынужденными колебаниями, повышает амплитуды и время раскачивания груза, что приводит к усложнению точной установки груза и увеличению времени затухания его колебаний. В результате этого снижается производительность ССК. Также, телескопическая стрела является наиболее дорогостоящим элементом (без учета шасси) ССК. Следовательно, актуальность исследования динамической нагруженности телескопического стрелового оборудования обусловлено критериями безопасной эксплуатации ССК и экономическими факторами.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиям оценки технического состояния, нагруженности и взаимодействия элементов телескопической стрелы ССК посвящены работы: Вайнсона А.А., Гохберга М.М., Александрова М.П., Ряхина В.А., Фам Хонг Куанга, Башковой Н.В., Соломатиной Л.А., Гривезирского Ю.В., Сальникова В.Г., Ватулина Я.С. Гордиенко В.Е., Репина С.В., Соколова С.А., Geisler T., Sochacki W., Bold M., Savkovic M., Pavlovic G., Makinen J. и других.

Тем не менее, в этой сфере недостаточно изучено: влияние вертикальных и горизонтальных (боковых) зазоров между секциями на нагруженность и общую жесткость телескопической стрелы в условиях динамического нагружения; нагружение и жесткость телескопической стрелы при учете взаимодействия телескопических секций с опорными элементами, гидроцилиндрами телескопирования и гидроцилиндром подъема в динамическом режиме нагружения; совместное действие вертикальных и горизонтальных, внешних и местных нагрузок на телескопическую стрелу в динамическом режиме нагружения; нагружение телескопической стрелы от воздействия внезапного снятия нагрузки.

Целью исследования является разработка методики оценки динамической нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов и повышение уровня безопасной эксплуатации стреловых самоходных кранов.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих методов исследования нагруженности телескопических стрел грузоподъемных кранов.

2. Разработка математических моделей движения и нагружения системы «Рабочее оборудование – груз» для определения основных динамических параметров телескопической стрелы и крана в целом при колебаниях их в вертикальной и горизонтальной плоскостях с учетом взаимодействия металлоконструкции стрелы с опорными элементами, гидроцилиндрами телескопирования и гидроцилиндром подъема-опускания стрелы, жесткости контактирующих элементов, а также с учетом влияния вертикальных и горизонтальных межсекционных зазоров.

3. Разработка методики контроля общей и местной устойчивости телескопической стрелы, учитывающей совместное действие внешних и местных горизонтальных и вертикальных нагрузок и позволяющей помимо контроля устойчивости устанавливать максимальное динамическое напряженное состояние элементов телескопической стрелы в функции времени.

4. Разработка математических моделей общей жесткости телескопического стрелового оборудования, учитывающих влияние межсекционных вертикальных и горизонтальных зазоров, податливости опорных элементов, изгибной жесткости секций, гидроцилиндров телескопирования и гидроцилиндра подъема стрелы на общую жесткость и нагруженность стрелового оборудования.

5. Разработка методики оценки динамической нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов, объединяющей положения пунктов 2 – 4.

6. Исследование нагруженности телескопической стрелы от воздействия мгновенного снятия веса груза и при повороте системы «Рабочее оборудование – груз» с учетом взаимодействия телескопической стрелы с опорными элементами, гидроцилиндрами телескопирования и гидроцилиндром изменения вылета стрелы, жесткости контактирующих элементов, а также с учетом влияния вертикальных и горизонтальных межсекционных зазоров.

7. Анализ результатов исследований, вывод рекомендаций по повышению безопасной эксплуатации, предложение устройства, повышающего надежность эксплуатации стреловых самоходных кранов, оборудованных телескопической стрелой.

Объектом исследования являются стреловые самоходные краны, оснащенные телескопическим стреловым оборудованием.

Предметом исследования являются методы исследования динамической нагруженности телескопической стрелы грузоподъемных кранов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработаны динамические математические модели движения и нагружения телескопического стрелового оборудования в вертикальной и горизонтальной плоскости, учитывающие взаимодействие телескопических секций, опорных элементов, гидроцилиндров телескопирования, гидроцилиндра подъема, жесткости (деформации) контактирующих элементов, а также влияние межсекционных зазоров.

2. Разработана методика контроля общей и местной устойчивости телескопической стрелы, учитывающая совместное действие внешних и местных горизонтальных и вертикальных нагрузок, и позволяющая помимо контроля устойчивости отслеживать максимальное динамическое напряженное состояние телескопической стрелы.

3. Разработана методика оценки динамической нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов, объединяющая разработанные математические модели и методики.

4. Разработано изобретение (способ и устройство), позволяющее предотвратить или снизить последствия аварий стреловых самоходных кранов, вызванных потерей собственной и грузовой устойчивости, внезапным снятием нагрузки, что способствует повышению степени безопасной эксплуатации стреловых кранов.

5. Установлено влияние вертикальных и горизонтальных зазоров между секциями на нагруженность и общую жесткость телескопической стрелы в условиях динамического режима нагружения.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии:

1. Математической модели движения и динамического нагружения элементов телескопического стрелового оборудования в продольной и поперечной плоскостях.

2. Математической модели динамической нагруженности телескопической стрелы от совместного действия внешних и местных нагрузок.

3. Методики оценки динамической нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов.

Практическая значимость исследования состоит в разработке:

1. Методики контроля местной и общей устойчивости телескопической стрелы грузоподъемного крана, математических моделей общей жесткости телескопического стрелового оборудования, численной и аналитической моделей движения и нагружения телескопической стрелы, включение которых в систему безопасности крана, позволяет повышать уровень безопасной эксплуатации грузоподъемных машин, оснащенных телескопической стрелой.

2. Методики оценки динамической нагруженности телескопической стрелы, разработанных аналитической и численной математических моделей движения и нагружения, результаты применения которых позволяют установить и уточнить параметры, характеризующие критическое состояние телескопического стрелового оборудования, которые представляется возможным включить в модель представления знаний приборов безопасности стрелового самоходного крана.

3. Изобретения (способ и устройство), позволяющего предотвратить или снизить последствия аварий, вызванных потерей собственной и грузовой устойчивости грузоподъемного крана, внезапным снятием нагрузки.

Методология и методы диссертационного исследования: анализ существующих исследований в области расчета, конструирования

и эксплуатации телескопической стрелы; аналитическое моделирование: методы аналитической механики, механики деформирования твердого тела; методы численного моделирования: комплексный динамический и кинематический модуль SolidWorks Motion, модули проведения расчетов методом конечных элементов SolidWorks Simulation и Solid Edge Simulation, система компьютерной алгебры Mathcad; теория планирования эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная аналитическая математическая модель колебательного движения телескопического стрелового оборудования в вертикальной и горизонтальной плоскости, учитывающая взаимодействие телескопических секций, опорных элементов, гидроцилиндров телескопирования, гидроцилиндра подъема, жесткости контактирующих элементов, а также влияние межсекционных зазоров.

2. Разработанная численная математическая модель движения и нагружения телескопического стрелового оборудования в вертикальной и горизонтальной плоскости, учитывающая взаимодействие телескопических секций, опорных элементов, гидроцилиндров телескопирования, гидроцилиндра подъема, жесткости контактирующих элементов, а также влияние межсекционных зазоров.

3. Разработанная методика контроля общей и местной устойчивости телескопической стрелы, учитывающая совместное действие внешних и местных горизонтальных и вертикальных нагрузок, позволяющая помимо контроля устойчивости определять максимальное динамическое напряженное состояние телескопической стрелы в функции времени.

4. Разработанные аналитические математические модели жесткости телескопической стрелы, позволяющие установить влияние межсекционных вертикальных и горизонтальных неравномерных зазоров, податливости опорных элементов, изгибной жесткости секций, гидроцилиндров телескопирования и гидроцилиндра подъема стрелы на нагруженность и общую жесткость телескопической стрелы в условиях динамического режима нагружения.

5. Разработанная методика оценки динамической нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов, объединяющая разработанные математические модели и методики.

6. Предложение разработанного изобретения (способ и устройство) для предотвращения или снижения последствий аварий стреловых самоходных кранов, вызванных потерей собственной и грузовой устойчивости, внезапным снятием нагрузки.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины, а именно: п. 2 «Методы моделирования, прогнозирования, исследований, расчета технологических параметров, проектирования, испытаний машин, комплектов и систем, исходя из условий их применения»; п. 5 «Методы

повышения долговечности, надежности и безопасности эксплуатации машин, машинных комплексов и систем».

Степень достоверности научных положений и результатов обеспечивается корректностью поставленных задач, решение которых базируется на использовании фундаментальных и достоверно изученных положений аналитической механики и механики деформирования твердого тела; применением современных вычислительных методов, методики планирования и проведения эксперимента, проверкой сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, использованием апробированных методов и поверенной аппаратуры, сравнением теоретических положений и опытных данных с результатами исследований известных авторов.

Апробация результатов исследования. Основные положения, результаты, рекомендации и выводы диссертации докладывались, обсуждались на конференциях и семинарах: IX и X Международный симпозиум. «Прорывные технологии электрического транспорта Eltrans'» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2017 г., 2019 г.); V и VII Международная научно-техническая конференция «Локомотивы. Транспортно-технологические комплексы. XXI век» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2017 г., 2020 г.); Национальная конференция «Перспективы будущего в образовательном процессе» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2018 г., 2019 г.); Научно-практическая конференция, посвященная 100-летию Е.Я. Красковского (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2018 г.); VIII и IX Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы автоматизированного проектирования на транспорте» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2019 г., 2021 г.); LXXIX и LXXXI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы» (г. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2019 г., 2021 г.). Результаты исследования внедрены в процесс проведения лабораторных и практических работ кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы» ФГБОУ ВО ПГУПС.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 23 печатных научных публикаций, в состав которых входят 10 работ, опубликованных в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ; 1 патент на изобретение; 1 авторское свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертационного исследования. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, включающего 125 наименований. Диссертация изложена на 173 страницах основного текста, содержит 87 рисунков, 20 таблиц и 76 формулы.

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

В первой главе выполнен анализ режимов нагружения стрелового оборудования и анализ существующих методов исследования нагруженности телескопических стрел ССК. Определен ряд нерешенных вопросов в области исследования телескопической стрелы.

Во второй главе были разработаны: аналитическая математическая модель движения, численная математическая модель движения и нагружения, аналитическая математическая модель нагруженности и аналитическая математическая модель жесткости телескопической стрелы. Выполнено аналитическое и численное исследование динамической нагруженности системы «рабочее оборудование-груз» ССК при внезапном снятии нагрузки, при внезапной просадке аутригера в процессе поворота.

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований и выполнено сравнение их с результатами разработанных математических моделей.

В четвертой главе в качестве рекомендаций по повышению безопасной эксплуатации ССК, предлагается: усовершенствование системы безопасности ССК; разработанное изобретение для предотвращения или снижения последствий аварий, вызванных потерей устойчивости крана, мгновенным снятием нагрузки.

В качестве объекта исследования выбран железнодорожный кран «Сokol 80.01М».

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Аналитическая математическая модель колебательного движения телескопического стрелового оборудования в вертикальной и горизонтальной плоскости, учитывающая взаимодействие телескопических секций, опорных элементов, гидроцилиндров телескопирования и гидроцилиндра подъема стрелы, жесткости контактирующих элементов, а также влияние межсекционных зазоров

Составляются две отдельные динамические модели (рис. 1, 2), *семимассовая*, описывает движение груза и элементов телескопической стрелы в вертикальной плоскости, а *шестимассовая*, – описывает движение элементов стрелы в горизонтальной плоскости, и в случае отсутствия груза – вертикальной. *Шестимассовая* динамическая аналитическая модель включает массы: средней и верхней секций, верхнего и нижнего штока, верхнего и нижнего поршня, приведенные массы соединены между собой упруго-вязкими элементами. *Семимассовую* динамическую аналитическую модель составляют те же элементы и дополнительно – масса груза и жесткость каната.

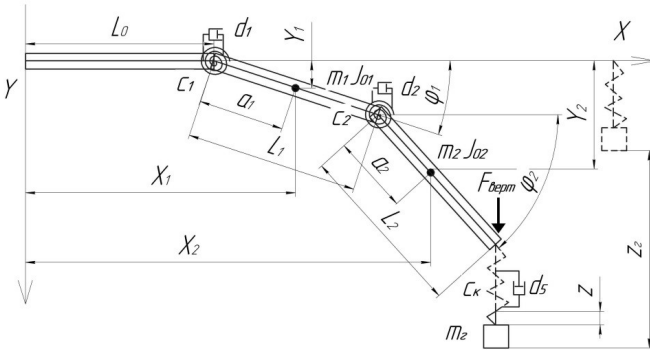


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы семимассовой модели телескопического стрелового оборудования

Колебания секций воспроизводят упруговязкие связи в узлах сочленений (c_1, c_2, d_1, d_2) динамической модели. Деформирование элементов гидроцилиндра телескопирования учитывается наличием упругого шарнира в узле «шток – поршень» (c_3, d_3) и в штоке (c_4, d_4). За обобщенные координаты математической модели принимаются углы отклонения: средней (φ_1) и верхней (φ_2) секций, поршня нижнего (β_1) и верхнего (β_2) гидроцилиндра телескопирования. Упруговязкие свойства каната моделируются коэффициентом жесткости (c_k) и демпфирования (d_5).

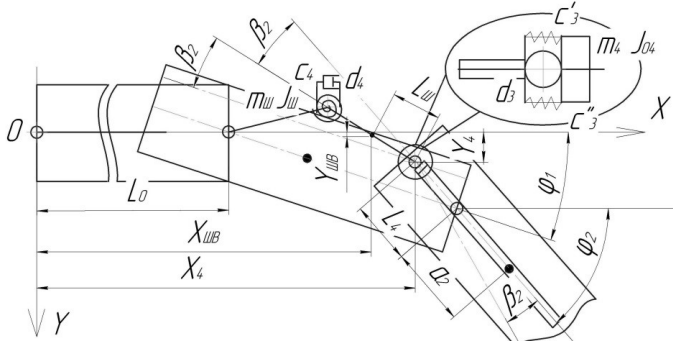


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия верхней секции и верхнего гидроцилиндра телескопирования

Уравнения движения динамических моделей телескопического стрелового оборудования выводятся из уравнения Лагранжа II рода. После дифференцирования выражений кинетической, потенциальной и диссипативной

энергии для элементов системы, получаем дифференциальные уравнения вынужденных колебаний системы с четырьмя степенями свободы.

Общее решение системы уравнений *семимассовой системы* определяется как сумма статического прогиба элементов системы, собственных затухающих колебаний, вынужденного отклонения в результате воздействия кратковременной силы и последующих свободных затухающих колебаний:

$$q_j = F_{\text{ТЯЖ}i} / s_i + \left[\sum_{i=1}^4 A_j^i e^{-n_i t} \cos(k_i t + \alpha_i) \right]_{t < \tau_1} + \left[A_{jB} e^{-n_i t} \cos(k_B t + \delta_i) \right]_{t \geq \tau_1}, \quad j = 1-4, \quad (1)$$

где: A_j^i – амплитуды главных свободных колебаний; A_{jB} – амплитуда вынужденного колебания; δ_i, α_i – начальные фазы главных колебаний; n_i – коэффициенты демпфирования, k_i – собственные частоты демпфированной системы; k_B – частота свободных колебаний системы после внешнего воздействия; s_i – коэффициенты жесткости.

Общее решение системы дифференциальных уравнений, описывающих движение *шестимассовой динамической модели в вертикальной плоскости* определяется как сумма собственных колебаний семимассовой системы и вынужденного отклонения шестимассовой системы в результате воздействия кратковременной силы и последующих свободных затухающих колебаний:

$$q_j = \left[\sum_{i=1}^4 A_j^i e^{-n_i t} \cos(k_i t + \alpha_i) \right]_{t < \tau_1} + [F_{\text{ТЯЖ}1i} / s_i]_{t < \tau_1} + \left[A_{jBK} e^{-n_i t} \cos(k_B t + \delta_i) \right]_{t \geq \tau_1} + [F_{\text{ТЯЖ}2i} / s_i]_{t \geq \tau_1}, \quad j = 1-4, \quad (2)$$

где: $F_{\text{ТЯЖ}1i}$ – сила тяжести при учете веса груза; $F_{\text{ТЯЖ}2i}$ – сила тяжести при отсутствии веса груза.

Общее решение системы дифференциальных уравнений, описывающих движение *шестимассовой динамической модели в горизонтальной плоскости* определяется как сумма собственных колебаний; отклонения в результате действия инерционной силы при повороте; вынужденных колебаний от действия циклической нагрузки раскачивания груза; вынужденного отклонения в результате воздействия кратковременной силы и последующих свободных затухающих колебаний:

$$q_j = \left[\sum_{i=1}^4 A_j^i e^{-n_i t} \cos(k_i t + \alpha_i) \right]_{t < \tau_1} + [Q_{\text{И}i} / s_i]_{t \geq \tau_1} + [A_{j\text{ВП}} \cos(p_i t + \delta_1)]_{t \geq \tau_2} + \left[A_{j\text{BK}} e^{-n_i t} \cos(k_B t + \delta_2) \right]_{t \geq \tau_3}, \quad j = 1-4, \quad (3)$$

где: $A_{\text{п}}$ – амплитуда при постоянной нагрузке; $A_{\text{к}}$ – амплитуда при кратковременной нагрузке.

2. Численная математическая модель движения и нагружения телескопического стрелового оборудования в вертикальной и горизонтальной плоскости, учитывающая взаимодействие телескопических секций, опорных элементов, гидроцилиндров телескопирования, гидроцилиндра подъема, жесткости контактирующих элементов, а также влияние межсекционных зазоров

Идентичность численной модели (рис. 3) прототипу определяется: конструктивным подобием натурному ССК; точностью воссоздания механического контактирования взаимодействующих элементов; равенством реакций аутригеров натурального и численного крана; воспроизведением изгибной жесткости телескопической стрелы, гидроцилиндров телескопирования, гибких элементов механизма подъема груза; учетом реологических свойств опорной поверхности; имитированием ветрового воздействия на груз.

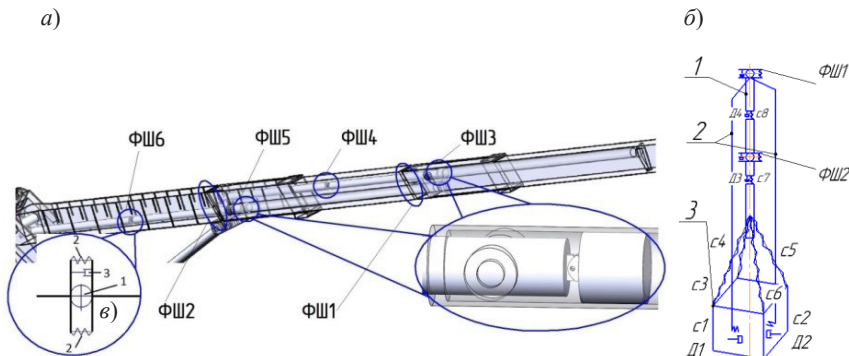


Рис. 3. Численная динамическая модель телескопической стрелы:
 а – модель телескопического стрелового оборудования: ФШ – «фиктивные шарниры»; 1, 2 – межсекционные; 3, 4, 5, 6 – гидроцилиндров телескопирования;
 б – схема механизма подъема груза: 1 – канат; 2 – вспомогательные стойки;
 3 – груз; ФШ1, ФШ2 – фиктивные шарниры 2-го рода; c1, c2, d1, d2 – вязкоупругие элементы системы «груз-вспомогательные стойки»; c3, c4, c5, c6 – упругие элементы системы «груз-канат»; c7, c8, d3, d4 – вязкоупругие продольные элементы; в – схема ФШ (1 – шарнир; 2 – пружина; 3 – демпфер)

Физико-механические свойства материалов элементов ССК определяются кривой напряжения-деформации и характеристиками материала, заложенными для выбранного типа из библиотеки материалов программного комплекса или заданными пользователем. С целью учета физико-механических свойств опорной поверхности разработан механизм, состоящий из податливой втулки и демпфера. С целью воспроизведения изгибной

деформации элементов телескопической стрелы динамической модели (в SolidWorks Motion) создан специальный элемент — «фиктивный шарнир» (ФС), который представляет собой шарнир Гука, оснащенный демпферами и пружинами.

Определение мест расположения ФС производится на основе частотного и модального анализа. Свойства вязкоупругих шарниров телескопической стрелы и гидроцилиндров телескопирования подбираются таким образом, чтобы получить удовлетворительное подобие форм колебаний и траекторий перемещений в контрольных точках конструкции в Motion с формами колебаний в модальном-частотном анализе и траекториями перемещений тех же контрольных узлов в статическом исследовании Simulation.

3. Методика контроля общей и местной устойчивости телескопической стрелы, учитывающая совместное действие внешних и местных горизонтальных и вертикальных нагрузок, позволяющая помимо контроля устойчивости определять максимальное напряженное состояние стрелы в функции времени

На первом этапе методики посредством введения входных параметров стрелового оборудования формируются матрицы жесткости, инерции и диссипации системы (рис. 4).

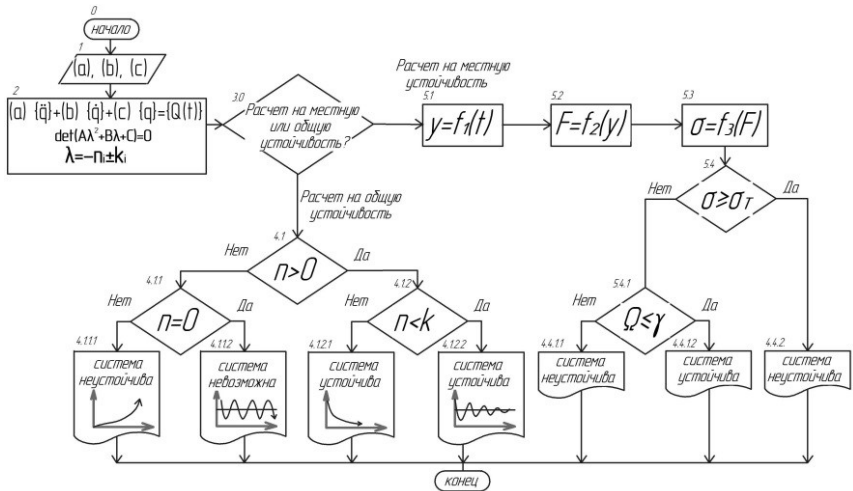


Рис. 4. Схема методики контроля общей и местной устойчивости телескопической стрелы

Оценка общей устойчивости телескопической стрелы

На основе первого блока составляется и затем решается система дифференциальных уравнений, описывающая колебания динамической модели

в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 4, блок 2). Определения устойчивости системы производится по коэффициентам демпфирования (n_i) и собственным частотам демпфированной системы (k_i) корней характеристического уравнения (рис. 4, блоки: 4.11, 4.12).

Оценка местной устойчивости телескопической стрелы

Вертикальные и горизонтальные перемещения оголовка (считанные датчиком при эксплуатации ССК или полученные в результате решения дифференциальных уравнений) разделяются в соответствии с тремя расчетными положениями стрелы (рис. 4, блок 5.1). Для колебаний каждого расчетного положения находится возмущающая нагрузка в функции перемещений (рис. 4, блок 5.2). Для каждого расчетного положения определяется максимальное напряжение стрелы в функции возмущающей нагрузки (рис. 4, блок 5.3).

Максимальные напряжения телескопической стрелы, образуемые в сечениях давления опорных элементов (где происходит суммирование деформаций от вертикальных внешних нагрузок и сил, действующих со стороны опорных элементов (местных нагрузок), а также проявляется стеснение депланацией):

$$\sigma_{Эi} = \sqrt{(\sigma_X^{BH} + \sigma_{XM})^2 + \sigma_{YM}^2 - (\sigma_X^{BH} + \sigma_{XM}) \cdot \sigma_{YM} + 3 \cdot (\tau_k + \tau_M + \tau_{cq})}, \quad (4)$$

где σ_X^{BH} – продольные нормальные напряжения от внешней нагрузки с учетом мембранных напряжений (σ_{MEM}); σ_{XM} – продольные напряжения от местных нагрузок; σ_{YM} – поперечные напряжения от местных нагрузок; τ_M – касательные напряжения от местных нагрузок; τ_k , τ_{cq} – касательные напряжения соответственно от кручения и поперечной силы, вызванные внешними нагрузками.

В результате ряда прочностных расчетов методом конечных элементов (рис. 5) установлено, что максимальная нагруженность телескопической стрелы, вызванная горизонтальными силами, образуется в сечениях давления боковых упоров. Эквивалентные напряжения от действия усилий боковых упоров и внешних горизонтальных нагрузок предлагается определять по формуле (4), но при замене вертикальных нагрузок на горизонтальные.

Была установлена следующая зависимость для определения максимальных суммарных эквивалентных напряжений полок и стенок телескопической стрелы (с прямоугольным профилем) от совместного действия внешних и местных горизонтальных и вертикальных нагрузок:

$$\sigma_{max}^j \approx \sqrt{[\sigma_{max, гор}^j]^2 + [\sigma_{max, верт}^j]^2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{гор}^j$ – напряжения от горизонтальных внешних и местных усилий; $\sigma_{верт}^j$ – напряжения от вертикальных внешних и местных усилий.

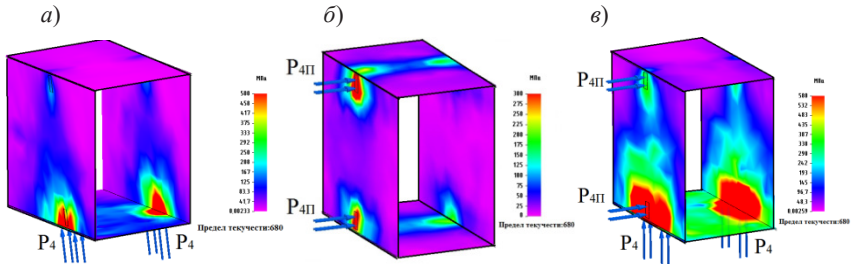


Рис. 5. Нагруженность элемента телескопической стрелы в результате действия местных сил: *а* – вертикальные силы; *б* – горизонтальные силы; *в* – совместное действие вертикальных и горизонтальных сил

С целью проверки полок и стенок на развитие пластических деформаций максимальные напряжения сравниваются с пределом текучести (рис. 4, блок 5.4). По известной методике выполняется проверка полок и стенок на местную устойчивость на стадии упругой деформации (рис. 4, блок 5.4.1).

Разработанная методика при включении в систему безопасности ССК, позволяет отслеживать общее устойчивое состояние механической системы в функции характеристик телескопической стрелы в режиме реального времени, а также отслеживать максимальное напряженное состояние телескопической стрелы, являющееся критерием местной устойчивости.

4. Аналитические математические модели жесткости телескопической стрелы, позволяющие установить влияние межсекционных вертикальных и горизонтальных неравномерных зазоров, податливости полиамидных опорных элементов, изгибной жесткости секций, гидроцилиндров телескопирования и гидроцилиндра подъема-опускания стрелы на нагруженность и общую жесткость телескопической стрелы в условиях динамического режима нагружения

Жесткость многосекционной телескопической стрелы в вертикальной и горизонтальной плоскости определяется как сумма жесткостей параллельно и последовательно расположенных упругих элементов, приведенных к оси подвеса груза:

$$c_{TC}^B = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{c_{1ЭCAj}^B} + \frac{1}{c_{2ЭCAj}^B} + \frac{1}{c_{ПЭCAj}^B} \right) + \frac{1}{c_{KCA}^B} + \sum_{b=1}^m \frac{1}{c_{ГЦА}^B}} + \sum_{i=1}^h c_{ГЦТАi}^B; \quad (6)$$

$$c_{TC}^Г = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{c_{1ЭCAj}^Г} + \frac{1}{c_{2ЭCAj}^Г} + \frac{1}{c_{ПЭCAj}^Г} \right) + \frac{1}{c_{KCA}^Г}} + \sum_{i=1}^h \frac{1}{c_{ГЦТАi}^Г}, \quad (7)$$

где: n – число подвижных секций, m – число гидроцилиндров изменения вылета, h – количество гидроцилиндров телескопирования. $c_{1ЭСАj}$, $c_{2ЭСАj}$ – жесткости опорных элементов, $c_{ПЗСАj}$ – коэффициент жесткости подвижной секции телескопической стрелы с учетом межсекционных зазоров, $c_{КСАj}$ – коэффициент жесткости корневой секции, $c_{ГЦАj}$ – жесткость гидроцилиндра подъема, $c_{ГЦТАi}$ – жесткость гидроцилиндра телескопирования.

Разработанные математические модели позволяют определить влияние межсекционных вертикальных и горизонтальных неравномерных зазоров, податливости опорных элементов, изгибной жесткости секций, гидроцилиндров телескопирования и гидроцилиндра изменения вылета стрелы на общую жесткость и нагруженность телескопического стрелового оборудования (через влияние жесткости стрелы на коэффициент динамичности нагрузки ССК).

5. Методика оценки динамической нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов

Разработанная методика предполагает шесть этапов.

1. Расчет коэффициентов жесткости упругих шарниров аналитической математической модели колебательного движения стрелы и численной математической модели ССК.

2. Расчет перемещений (углов отклонений) телескопической стрелы при свободных колебаниях:

2.1. Составление аналитической математической модели колебательного движения телескопического стрелового оборудования (положение 1).

2.2. Разработка численной динамической математической модели ССК (положение 2).

2.3. Сравнение перемещений (углов отклонений) телескопической стрелы при свободных колебаниях, рассчитанных пунктами 2.1 и 2.2.

3. Проведение виртуального эксперимента динамического режима нагружения телескопической стрелы ССК; получение временных зависимостей перемещений (углов отклонений), реакций, кинематических и динамических характеристик движения элементов телескопической стрелы.

4. Математические преобразования результатов пункта 3 по определению внешних возмущающих нагрузок.

5. Расчет перемещений (углов отклонений) телескопической стрелы при вынужденных колебаниях:

5.1. С учетом результатов пункта 4 производится расчет уравнений, описывающих вынужденное движение шестимассовой и семимассовой динамических аналитических моделей (положение 1).

5.2. Сравнение перемещений (углов отклонений) телескопической стрелы при вынужденных колебаниях, рассчитанных пунктами 3 и 5.1.

6. Определение максимальных напряжений телескопической стрелы:

6.1. Определение максимальных напряжений телескопической стрелы согласно методике контроля общей и местной устойчивости телескопической стрелы (положение 3).

6.2. Определение напряженно-деформированного состояния телескопической стрелы методом конечных элементов.

6.3. Сравнение максимальных напряжений телескопической стрелы, рассчитанных пунктами 6.1 и 6.2.

Разработанная методика позволяет объединить разработанные математические модели и методики для оценки максимальной динамической нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования ССК.

6. Изобретение (способ и устройство) для предотвращения или снижения последствий аварий, вызванных потерей собственной и грузовой устойчивости, внезапным снятием нагрузки

Для предотвращения или снижения последствий аварий ССК, возникших в результате потери устойчивости, а также внезапного снятия нагрузки со стрелы, предлагается «Способ повышения безопасности и система безопасности стрелового грузоподъемного крана» (рис. 6).

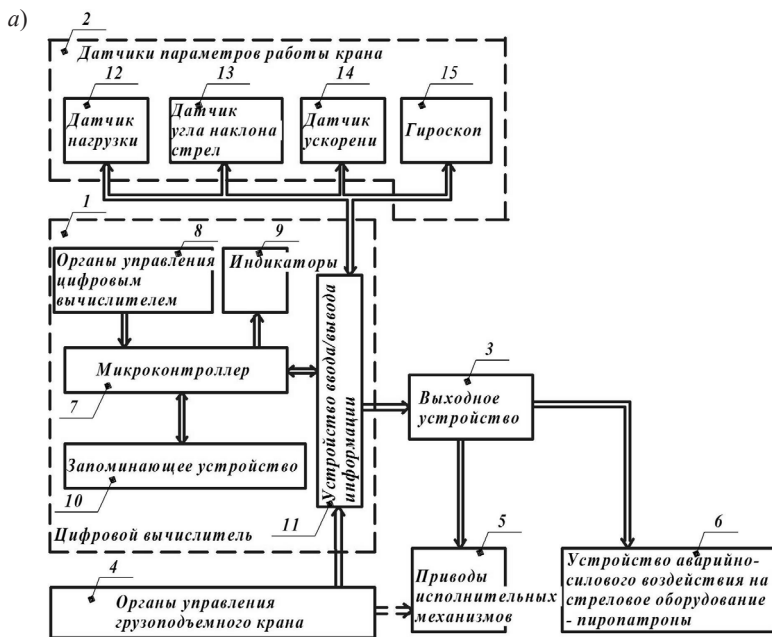


Рис. 6, начало. Система безопасности грузоподъемного крана:

а – схема устройства

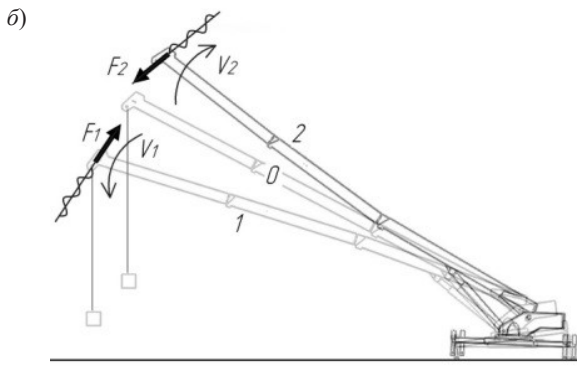


Рис. 6, окончание. Система безопасности грузоподъемного крана: б – принцип действия (0 – положение до нагружения, 1 – потеря грузовой устойчивости, 2 – потеря собственной устойчивости, V_1, V_2 – скорости движения стрелового оборудования, F_1, F_2 – сила действия пиропатронов)

В случае превышения параметров, соответствующих потере собственной устойчивости ССК и внезапному снятию нагрузки со стрелы, микроконтроллер формирует сигналы, активирующие пиропатрон, реактивное действие которого направлено на подавление заброса стрелы и приведение ее в начальное положение.

Экспериментальные исследования на натурном объекте

С целью проверки и подтверждения разработанных теоретических математических моделей и методик проведены экспериментальные исследования. В качестве объекта экспериментальных исследований был выбран ССК типа КС 45717 (рис. 7).

При проведении эксперимента использовалась следующая аппаратура: датчик перемещений, тензорезисторы типа 2ПКБ-20-200В ТУ 25-06-1382-78, МИС-026 Универсальный переносной многоканальный измерительно-вычислительный комплекс, ноутбук с программным обеспечением для записи и обработки данных, набор струн. «Датчик перемещений» разработан автором и предназначен для online регистрации линейных перемещений, скорости и ускорения оголовка телескопической стрелы натурного ССК. Датчик перемещений закреплен на верхней полке верхней секции стрелы у оголовка, два тензорезистора устанавливались на верхней полке корневой секции, в сечении расположения задних опор скольжения средней секции (рис. 7).

При экспериментальном исследовании внезапного снятия нагрузки длина телескопической стрелы составляет 15 м, высота оголовка над уровнем земли – 1,85 м. На первом этапе производится штатный подъем стрелы до 2,15 м. На втором этапе выполняется крепление струны «проушина

оголовка - груз», после чего производится повторный подъем стрелы. При подъеме происходит натяжение струны, от чего телескопическая стрела нагружается силой натяжения; в результате разрыва струны стрела совершает заброс вверх с последующими затухающими колебаниями.



Рис. 7. Установка датчиков:

1 – датчик перемещений, 2 – тензорезисторы

Экспериментальное исследование динамики рабочего процесса проводится при длине стрелы в 15 м, масса груза составляет 1,75 тонн. На первом этапе высота оголовка над уровнем земли ≈ 3100 мм. Затем производится подъем стрелы до ≈ 5400 мм, параллельно увеличивается длина каната, обеспечивая постоянно расстояние груза над опорной поверхностью. На третьем этапе осуществляется вращения поворотной платформы в азимуте (круговой сектор $\pm 5^\circ$ от первоначальной оси). Далее стреловое оборудование останавливается. На пятом этапе выполняется опускание стрелы и груза.

В результате двух экспериментальных исследований получены: временные графики перемещений и ускорений оголовка телескопической стрелы, напряжения в функции времени двух областей на верхней полке корневой секции. Каждый тип эксперимента проводился 5 раз, после чего результаты измерений обрабатываются в соответствии с методиками планирования и проведения эксперимента.

При применении разработанных численной и аналитических моделей проведено математическое моделирование внезапного снятия нагрузки и рабочего процесса КС 45717.

Сходимость данных, полученных математическим и эмпирическим способом, составляет 90 %, исходя из чего, можно сделать вывод об удовлетворительной степени достоверности разработанных математических моделей в рамках поставленных задач в данном исследовании.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработана аналитическая математическая модель движения телескопического стрелового оборудования в вертикальной и горизонтальной плоскости, учитывающая взаимодействие телескопических секций, опорных элементов, гидроцилиндров телескопирования, гидроцилиндра подъема, жесткости контактирующих элементов, а также влияние межсекционных зазоров.

2. Разработана численная математическая модель движения и нагружения телескопического стрелового оборудования в вертикальной и горизонтальной плоскости, учитывающая взаимодействие телескопических секций, опорных элементов, гидроцилиндров телескопирования, гидроцилиндра подъема, жесткости контактирующих элементов, а также влияние межсекционных зазоров.

3. Разработана методика контроля общей и местной устойчивости телескопической стрелы, учитывающая совместное действие внешних и местных горизонтальных и вертикальных нагрузок и позволяющая помимо контроля устойчивости устанавливать максимальное напряженное состояние телескопической стрелы в функции времени.

4. Разработаны аналитические математические модели жесткости телескопической стрелы, позволяющие установить влияние межсекционных вертикальных и горизонтальных неравномерных зазоров, податливости опорных элементов, изгибной жесткости секций, гидроцилиндров телескопирования и гидроцилиндра подъема стрелы на нагруженность и общую жесткость телескопической стрелы в условиях динамического режима нагружения.

5. Разработана методика оценки динамической нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования грузоподъемных кранов, объединяющая положения пунктов 1–4.

6. Проведено исследование нагруженности элементов телескопического стрелового оборудования от воздействия внезапного снятия веса груза, а также при вращении ССК, в результате чего установлено: максимальные напряжения, амплитуды и частоты колебаний телескопической стрелы и элементов гидроцилиндров телескопирования, временная зависимость сил противодействия элементов телескопического стрелового оборудования; зависимость максимальных напряжений телескопической стрелы от величины просадки аутригера и частоты вращения платформы; соотношение максимальных напряжений телескопической стрелы, вызванных внешними и местными, вертикальными и горизонтальными нагрузками.

7. Установлено влияние вертикальных и горизонтальных зазоров между секциями на нагруженность и общую жесткость телескопической стрелы в условиях динамического режима нагружения.

8. Предложено оборудовать ССК разработанным изобретением для предотвращения или снижения последствий аварий, вызванных потерей устойчивости и мгновенным снятием нагрузки.

9. Предлагается включить в систему безопасности ССК методику контроля местной и общей устойчивости телескопической стрелы, разработанные математические модели; результаты применения разработанных математических моделей и методик позволяют установить и уточнить параметры, характеризующие критическое состояние телескопического стрелового оборудования, которые представляется возможным включить в модель представления знаний приборов безопасности ССК.

Результаты исследования позволяют повысить уровень безопасной эксплуатации ССК, оснащенных телескопической стрелой.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ:

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

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

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

4. Ватулин, Я.С. Нагруженность телескопической стрелы железнодорожного крана при внезапном снятии нагрузки / Я.С. Ватулин, Е.А. Потахов // Транспорт Урала. – 2018. – №3(58). – С. 13–20.

5. Потахов, Е.А. Разработка математических моделей движения телескопического стрелового оборудования грузоподъемного крана / Е.А. Потахов, Я.С. Ватулин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. – 2019. – № 1 (56). – С. 54–62.

6. Потахов, Е.А. Методика контроля местной и общей устойчивости телескопической стрелы грузоподъемного крана / Е.А. Потахов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16. № 2 (66). – С. 110–122.

7. Потахов, Е.А. Нагруженность телескопической стрелы в процессе поворота / Е.А. Потахов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2019. – № 4. – С. 497–509.

8. Потахов, Е.А. Нагруженность гидроцилиндра телескопирования в процессе поворота стрелового оборудования / Е.А. Потахов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – № 2. – С.86-99.

9. Потахов, Е.А. Жесткость телескопического стрелового оборудования / Е.А. Потахов // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. – 2020. – № 5. – С. 12–20.

10. Потахов, Е.А. Взаимодействие элементов телескопической стрелы в результате внезапного снятия нагрузки / Е.А. Потахов, Я.С. Ватулин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2020. – №2(44). – С. 42–52.

Патенты, имеющие государственную регистрацию:

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

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

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

Публикации в прочих изданиях, индексируемых в РИНЦ: 11 шт.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 29.11.2021. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,2. Тираж 120 экз. Заказ 125.

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

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