

На правах рукописи



Боушев Виктор Юрьевич

**МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ БАШЕННЫХ КРАНОВ,
ОБОРУДОВАННЫХ РЕГИСТРАТОРАМИ
ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Репин Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: **Анцев Виталий Юрьевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Тулский государственный университет», кафедра
«Транспортно-технологические машины и процессы», и.о. заведующего кафедрой;

Грачев Алексей Андреевич
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
Институт машиностроения, материалов и транспорта, Высшая школа транспорта, директор;

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».**

Защита состоится «29» февраля 2024 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» СПбГАСУ по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседания 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 официальном сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/boushev-viktor-yurevich>.

Автореферат разослан «22» января 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е.В. Куракина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современное развитие строительной отрасли характеризуется ростом жилищного и промышленного строительства, в том числе строительства зданий сложной конфигурации и высотных зданий более 25 этажей, что обуславливает наращивание количества применяемой грузоподъемной строительной техники – высотных башенных кранов (далее – БК).

Недостатком всех БК является их подверженность раскачиванию груза. Раскачивание груза влечет за собой не только снижение производительности определенных видов строительных работ, но и повышение рисков несчастных ситуаций, в отдельных случаях вплоть до потери устойчивости БК, связанных с угрозой жизни и здоровью рабочих, повреждением дорогостоящего оборудования БК. В условиях, когда машинисту БК ограничена видимость при перемещении груза и (или) при возведении сложных конструктивных элементов зданий и сооружений, риски указанных несчастных ситуаций существенно возрастают.

В то же время современный этап развития функциональных возможностей систем (приборов) безопасности, используемых на БК, характеризуется отсутствием полноты охвата контроля и регистрации всех параметров рабочих циклов (например, отклонения груза или каната), которые позволят повысить безопасность эксплуатации БК и уменьшить риски повреждения дорогостоящего оборудования.

Ни в одной из существующих систем безопасности возможность мониторинга (контроля) за перемещаемым грузом, с фиксацией указанных выше параметров, до настоящего времени не реализована.

При этом в должном объеме отсутствуют и теоретические исследования, описывающие процесс развития колебаний груза на БК с учетом воздействия на него внешних факторов, а также процесс гашения указанных колебаний в определенных моментах.

В данных условиях важной проблемой, определяющей актуальность исследования процессов колебаний груза на БК при воздействии комплекса внешних факторов, является поиск более совершенных и эффективных способов текущего мониторинга и регистрации таких параметров, как положение в пространстве грузового каната и крюковой подвески (как с грузом, так и без груза), в том числе в условиях ограниченной видимости.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы исследования проектирования грузоподъемных машин и текущего состояния в области систем безопасности (приборов), а также ограничения колебаний посвящены труды: Вайнсона А.А., Гаранина Н.П., Дроздовича В.А., Зарецкого А.А., Каминского Л.С., Комарова М.С., Корытова М.С., Рабиновича А.А.,

Терехова А.М., Щедринова, А.В., Щербакова В.С., а также в работах зарубежных ученых Blackburn D., Singhose, W., Manson G., Masoud, Z. N., Ridout A.J.

Цель и задачи исследования.

Целью исследования является повышение безопасности и экономической эффективности эксплуатации БК посредством разработки способов мониторинга и регистрации положения грузового каната и груза, перемещаемого БК, а также контроля и сигнализации за опасными отклонениями каната, в т.ч. в условиях ограниченной видимости с учётом влияния внешних факторов на колебания груза.

Задачи исследования. Для достижения цели данного диссертационного исследования необходимо решить ряд последовательных задач, а именно:

1. Выявить закономерности в конструктивном исполнении, а также тенденции в развитии существующих устройств (систем) безопасности, обеспечивающих безопасность БК, оснащённых регистраторами параметров их работы.

2. Разработать математические модели динамических процессов отклонения угла грузового каната на БК на разных стадиях рабочего процесса: поворот башни, торможение грузовой тележки с двойной запасовкой каната, а также при влиянии ветровой нагрузки.

3. Разработать методику контроля груза при перемещении и точного позиционирования, исключающего колебания.

4. Обосновать критерии безопасности и эффективности процесса перемещения груза и позиционирования его БК с учётом контроля колебаний груза.

5. Разработать методику регистрации и последующей записи параметров отклонения груза с дальнейшей их обработкой и использованием.

6. Разработать технические решения по контролю колебаний груза в реальном времени с возможностью производить запись параметров отклонения груза.

Объектом исследования является процесс перемещения груза БК.

Предметом исследования являются колебания груза при его перемещении БК, оснащённым системами (приборами) безопасности, в т.ч. в зоне ограниченной видимости («слепой» зоне) для машиниста (оператора) БК.

Рабочая гипотеза состоит в том, что предотвращение раскачивания груза на БК возможно путём разработки и установки на БК новых приборов безопасности, которые будут контролировать процесс развития отклонения грузового каната и способны подавать управляющий сигнал об опасности нарастания такого угла отклонения каната, при котором машинист БК должен применить соответствующие меры.

Научная новизна заключается в:

1. Обосновании критериев безопасности и эффективности процесса перемещения груза и позиционирования его БК с учётом контроля колебаний груза.

2. Разработке математических моделей динамики угла отклонения грузового каната при выполнении рабочих процессов БК.

3. Установлении экспериментальных зависимостей изменения угла отклонения грузового каната от действия внешних и внутренних факторов (силы инерции при вращении башни и торможении грузовой тележки, силы ветра, схемы запасовки каната).

Методология и методы исследования. В исследовании использовалась методология системного анализа, включающая в себя теоретические и экспериментальные исследования, методы математического и имитационного моделирования, теории управления, теории оптимизации.

Область исследования соответствуют требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы по пунктам: п. 2 «Методы расчета и проектирования, направленные на создание новых и совершенствование существующих транспортно-технологических средств и их комплексов с учетом полного жизненного цикла изделий, обладающих высоким качеством, в том числе повышенными показателями экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, обеспечивающих энергоэффективность и безопасность эксплуатации»; п. 3. «Экспериментальные исследования и испытания транспортно-технологических средств и их комплексов, а также отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования».

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель зависимости между основными факторами, влияющими на позиционирование груза в процессе его перемещения БК.

2. Математические модели отклонения каната основных факторов влияющих на груз, таких как: ветровая нагрузка, торможение грузовой тележки и поворот башни БК.

3. Метод и способ безопасного и эффективного процесса перемещения груза и позиционирования его БК с учётом контроля колебаний груза в зоне ограниченной видимости («слепой» зоне) для машиниста (оператора) БК подтверждённый натурным экспериментом.

4. Технические решения и устройства мониторинга положений грузовых канатов и груза грузоподъёмного крана, позволяющие определять угол наклона грузового каната БК (патенты RU 197689 U1, RU 196670 U1, автор Боушев В.Ю.).

Степень достоверности результатов проведенных исследований обоснована применением общепринятых методов и методик выполнения теоретических и экспериментальных исследований, использованием стандартизованных методик измерения и последующего анализа результатов; подтверждена сопоставимостью теоретических и экспериментальных результатов, их практическим использованием; обеспечена применением

сертифицированных средств измерения, обеспечивающих надлежащую точность, и согласованностью полученных результатов теоретических исследований и эксперимента.

Практическая ценность и реализация результатов исследований

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены устройства, обеспечивающие безопасную работу с грузом в зоне ограниченной видимости для машиниста (оператора) БК (патенты RU 197689 U1, RU 196670 U1).

С применением технического решения RU 196670 U1 осуществлен этап внедрения метода определения положения грузовых канатов, обеспечивающего контроль за колебанием груза в реальном времени (в т.ч. при отсутствии возможности визуального определения положения груза), с возможностью записи параметров отклонения каната от вертикальной оси.

Кроме того, устройство, разработанное на базе технического решения RU 196670 U1, может быть использовано также и в образовательных целях, при обучении машинистов БК, поскольку не требует специальных подготовительных условий для его размещения на крюковой подвеске БК и сложных мероприятий по техническому обслуживанию.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии положений теории безопасной эксплуатации БК, а именно: обосновании критериев безопасности и эффективности процесса перемещения груза БК; математическом и компьютерном моделировании динамики угла отклонения грузового каната при действии различных факторов; установлении экспериментальных зависимостей изменения угла отклонения грузового каната от действия внешних и внутренних факторов (силы инерции при вращении башни и торможении грузовой тележки, силы ветра, схемы запасовки каната).

Практическая значимость заключается в:

1. В разработке конструкций и методов применения новых приборов мониторинга о приближении к предельным углам отклонения грузового каната.

2. В возможности применения предложенных соискателем методов и технических решений в системе управления грузоподъемных кранов для предупреждения о вероятном нарастании раскачивания и выполнения действий по уменьшению раскачивания груза.

3. В возможности внедрения в учебный процесс подготовки машинистов БК обучающего алгоритма обеспечения точности перемещения груза в условиях недостаточной видимости посредством мониторинга положений канатов и груза и компенсации неуправляемых пространственных колебаний груза на БК.

Практические результаты исследования могут быть использованы строительными предприятиями в целях повышения безопасности эксплуатации БК.

Практическая значимость диссертационной работы подтверждена актами внедрения в АО «ЛСР. Краны-СЗ», г. Санкт-Петербург и использованием в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Апробация работы. Основные положения работы были представлены на научных конференциях 71-й, 72-й, 73-й и 74-й межвузовских научно-практических конференций студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (СПб ГАСУ, СПб 2018, 2019, 2020, 2021).

Основные результаты диссертационного исследования апробированы на практике в 2022 году в АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург).

Публикации. Основные положения диссертационного исследования получили отражение в 9 печатных работах 4,68 п.л., в том числе: в 4 статьях в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, в 2 патентах на полезные модели, в 3 статьях в сборниках тезисов и докладов научных конференций

Структура и объём диссертационного исследования

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объём диссертации составляет 170 страниц. Материалы диссертации содержат 160 основного текста, 63 рисунка, 11 таблиц, 10 страниц приложений. Библиографический список включает 110 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цели, задачи и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ исследований в предметной области диссертационной работы. Проведён структурный анализ российского парка БК, оборудованных системами (приборами) безопасности с регистрацией параметров, а также их обзор конструкций систем (приборов) безопасности.

Во второй главе проведен анализ исследований в области измерения раскачивания груза, предложена теоретическая схема связи между машинистом (оператором) БК и требуемыми функциональными возможностями разрабатываемого устройства, описываемая процессами, связанными с действием на груз различных групп факторов, выявлением последствий действия таких факторов (мониторинга колебания груза) и управлением колебанием груза посредством соответствующего устройства (прибора безопасности), найдено оптимальное техническое решение, позволяющее осуществить фиксацию и мониторинг колебаний груза, предложены способы безопасного процесса перемещения груза и позиционирования его БК с учетом контроля колебаний груза в зоне ограниченной видимости для машиниста (оператора) БК (патенты

RU 197689 U1, RU 196670 U1, автор Боушев В.Ю.), представлен прототип (опытный образец) прибора безопасности на основе патента RU 196670 U1.

В третьей главе исследованы взаимосвязи процессов, обозначенных как факторы, вызывающие раскачивания груза на БК, а также описаны зависимости между такими факторами. Проведены математические моделирования процессов развития отклонения грузового каната под раздельным и совместным воздействием сил инерции при вращении стрелы, торможении грузовой тележки и давления ветра. Результаты математических расчетов исследованы на компьютерных моделях в системе Mathcad. Сформулированы численные влияния факторов на угол отклонения каната. Предложены методы ограничения процесса развития предельных углов отклонения грузового каната.

В четвёртой главе Приведены описание и результаты экспериментального исследования, проведенного в 2 этапа. Первый этап эксперимента – на лабораторном стенде, где подтверждён расчёт статистических характеристик оценок адекватности регрессионной модели при отклонении груза с двойной запасовкой каната. Второй этап представлен натурным экспериментом с использованием прототипа прибора безопасности на действующих БК на базе производственной площадки АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург), где подтверждена сходимость математических моделей при раскачивании груза (затухающие колебания при торможении грузовой тележки с двойной запасовкой, отклонение груза при вращении башни БК и отклонение груза при давлении ветра).

В пятой главе обоснована экономическая эффективность использования метода обеспечения безопасности эксплуатации БК, в т.ч. с использованием технического решения «Устройство мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Установлена специфика структурного состава и конструктивного исполнения приборов (систем) безопасности БК, используемых в отечественной строительной отрасли.

Осуществлен сравнительный анализ и обзор конструкций систем (приборов) безопасности с регистрацией параметров (в т.ч. Liebherr EMS-3, Litronic3 AC500-S; EVERDIGM, SH-3000; Fosow, PM530-I т.д.); проанализированы технические решения и разработки (в т.ч. Magnetek Inc. (США) Electromotive Systems antiSwing Control (ASC); CAMotion (США); EXPERTOPERATOR; Konecranes (Финляндия) Sway Control System; AntiswayComplete).

С учетом выявленных недостатков существующих систем безопасности БК, обоснована необходимость разработки нового подхода к созданию систем, обеспечивающих максимальную результативность и точность получаемых измерений, а также перспективное развитие способов мониторинга за раскачиванием груза, в т.ч. в зоне ограниченной видимости («слепой» зоне).

2. Представлена схема (модель обеспечения безопасности БК) на основе зависимости между основными факторами, влияющими на позиционирование груза.

Разработана теоретическая схема (модель обеспечения безопасности БК) связи между машинистом (оператором) БК и требуемыми функциональными возможностями разрабатываемого устройства (рис.1).



Рис. 1. Модель обеспечения безопасности башенного крана

Так, найдены оптимальные технические решения, позволяющие осуществить фиксацию и мониторинг колебаний груза (патенты RU 196670 U1, RU 197689 U1, автор Боушев В.Ю.).

С учетом этого автором предложены способы безопасного процесса перемещения груза и позиционирования его БК, в том числе для использования в «слепой» зоне для машиниста (оператора) БК, представлен прототип прибора безопасности на основе патента RU 196670 U1.

В части патента RU 196670 U1 разработанная система конструктивно представляет собой дополнительно устанавливаемые на грузоподъемном кране последовательно функционально связанные между собой беспроводной связью соответствующие функциональные блоки. Такая система рассматривается в качестве дополнения к имеющимся системам безопасности БК, поскольку позволяет осуществлять полный контроль за грузом, подвешенным на крюковой подвеске.

3. Разработано техническое решение (устройство мониторинга положений грузовых канатов и груза грузоподъемного крана на основе патента RU 196670 U1), позволяющее определять угол наклона грузового каната БК.

Опытный образец (прототип) устройства исполнен в виде двух частей: аппаратной части и ответной части.

Аппаратная часть системы (опытного образца, прототипа) состоит из основных компонентов таких как: датчик угла и ускорения с микроконтроллером, передатчиком, записывающим устройством на карту памяти и элементом питания, находящихся в защищённом корпусе, который, в свою очередь, крепится на крюковой подвеске. Ответная часть, находящаяся в кабине машиниста, служит для визуального отображения раскачивания груза.

Для ответной части может использоваться любой планшетный компьютер с любой операционной системой, с возможностью подключения к беспроводной локальной сети на основе стандартов IEEE 802.11 и любым браузером для просмотра интернет страниц.

Аппаратная и ответные части связаны между собой беспроводным протоколом передачи данных.

Для реализации всей системы, в т.ч. программной части, необходимо наличие программируемого промышленного контроллера, который реализуется на основе модуля «ESP-32S ESP-WROOM-32».

Принципиальная схема опытного образца (прототипа) устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана и общий вид устройства в корпусе представлены на рис. 2.

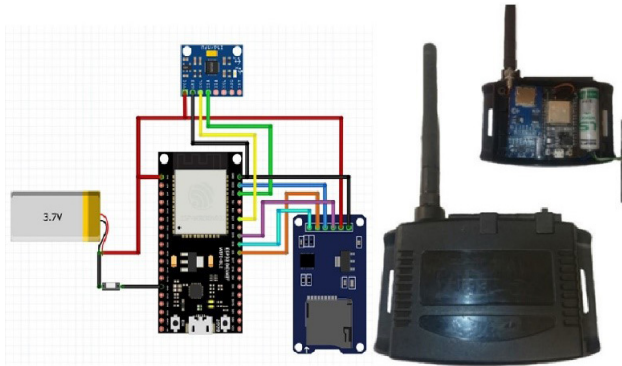


Рис. 2. Принципиальная схема опытного образца и его общий вид в корпусе

Представленный опытный образец был использован на действующих БК на базе производственной площадки АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург).

4. Смоделирована зависимость между основными факторами, влияющими на позиционирование груза в процессе его перемещения БК, и углом отклонения каната с грузом от вертикальной оси.

Высокая опасность раскачивания (колебания) груза, обусловлена конструктивными особенностями БК, габаритными характеристиками опорной

конструкции (башни) и габаритами стрелы, меняющейся длины подвеса груза и ветровой нагрузки, действующей на груз (и зависящей от высоты подъёма, габаритных и весовых характеристик груза).

Основными факторами, влияющими на раскачивание груза на БК, являются: вес и объём груза ($\text{м}^3/\text{т}$); длина подвеса груза (м); скорость подъёма или опускания груза ($\text{м}/\text{мин}$); движение и остановка (пуск) грузовой тележки ($\text{м}/\text{мин}$); поворот стрелы ($\text{об}/\text{мин}$); ветровая нагрузка ($\text{м}/\text{с}$); податливость конструкции БК (град).

При этом представляется очевидным, что все факторы раскачивания груза связаны между собой. Схема взаимосвязи указанных факторов показана на рис. 3.



Рис. 3. Взаимодействие факторов, влияющих на раскачивание груза

Детально анализируя влияние факторов на раскачивание груза можно установить, что: ветровая нагрузка (1) будет влиять на скорость подъема груза (2), на которую не меньшей степени будет влиять вес и объём груза (3). В свою очередь, длина подвеса груза (5), наряду с ветровой нагрузкой (1), будет оказывать влияние на движение грузовой тележки (4) и поворот стрелы (6).

С точки зрения развития предельного угла отклонения грузового каната от вертикали наиболее опасно сочетание одновременного поворота стрелы на максимальном вылете груза, торможения грузовой тележки при движении от оси БК и давления на груз от ветра, дующего вдоль стрелы в направлении от башни.

Отклонение при вращении башни БК

Существующие аналитические модели, основанные на дифференциальном исчислении, не дают приемлемого для рассматриваемого случая решения для расчета угла отклонения груза при вращении башни БК. Поэтому предлагается более простая модель, базирующаяся на законах классической механики. Рассмотрим груз весом G , висящий на канате длиной L на расстоянии R от оси вращения БК. При вращении башни БК с угловой скоростью ω груз отклонится на угол $\varphi_{ц}$ (угол от действия поворота башни)

под действием силы инерции груза $P_{и}$ (центробежной силы) (рис. 4) и перейдет из точки A в точку B в вертикальной плоскости стрелы БК.

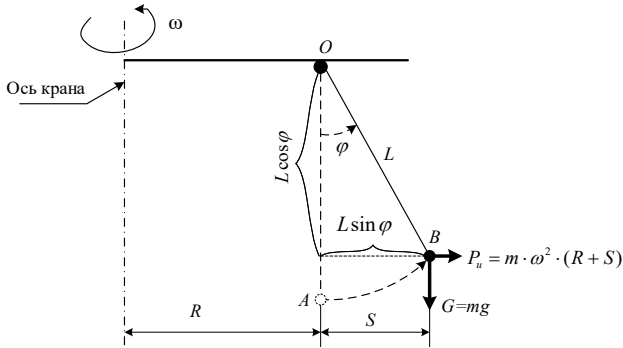


Рис. 4. Схема расчета угла отклонения груза при вращении башни БК:
 G , m – вес и масса груза; g – ускорение свободного падения;
 S – величина отклонения груза от вертикали

После аналитических преобразований с учетом, что при малых углах (до 15°) синус угла равен его тангенсу, получаем:

$$\varphi_{п} = \arctg\left(\frac{R\omega^2}{g - L\omega^2}\right). \quad (1)$$

Результаты моделирования для груза массой 1000 кг в Mathcad представлены на рис. 5а. Достижение максимального значения угла отклонения каната от вертикали достигается за полупериод $T(L)$ колебаний груза на канате (рис. 5б) (также и в остальных рассматриваемых случаях). Именно в течение этого времени машинист БК может предпринять действия по предотвращению запредельного нарастания угла отклонения каната.

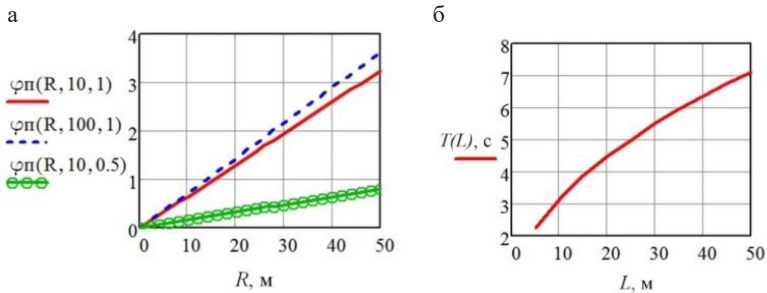


Рис. 5. Результаты расчета в Mathcad угла $\varphi_{п}$ (а) и полупериода колебаний груза на канате длиной L (б) (в скобках на рис: R – радиус точки подвеса грузового каната на стреловой тележке, м; вторая цифра – для каната L , м; третья цифра – частота вращения башни, об/мин)

Отклонение груза при торможении грузовой тележки на стреле БК

Наибольшие углы отклонения груза при движении грузовой тележки на стреле БК возникают при торможении тележки. Расчетный случай - движущаяся со скоростью v по стреле БК грузовая тележка резко останавливается с ускорением торможения a_t при времени торможения t_t . После торможения грузовой канат отклоняется на угол φ_t от вертикали, определяемый формулой (2) (рис. 6, 7):

$$\varphi_B = \arctg\left(\frac{a_B}{g}\right) = \arctg\left(\frac{v}{gt_B}\right). \quad (2)$$

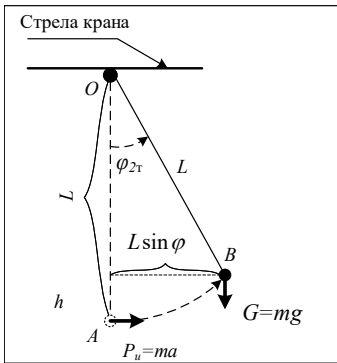


Рис. 6. Схема к расчету угла отклонения груза при торможении грузовой тележки методом анализа сил $P_{ц}$ инерции движущегося груза и его веса G

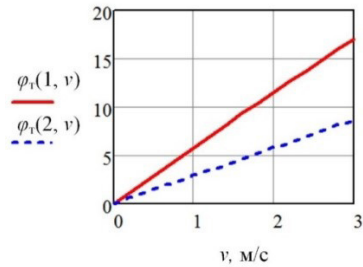


Рис. 7. Результаты расчета в Mathcad угла φ_t для времени торможения 1 и 2 с

Отклонение груза при торможении грузовой тележки на стреле БК при двойной запасовке каната

Запасовка канатов определяется кратностью прохождения троса между блоками. В случае двойной запасовки из практики замечено, что раскачивание груза, подвешенного на расположенных рядом одном или двух канатах, несколько больше, чем на канатах, разнесенных на определенное расстояние друг от друга. И чем больше расстояние между канатами, тем меньше амплитуда раскачивания груза. Однако, ни теоретических, ни экспериментальных исследований о влиянии расстояния между канатами на амплитуду раскачивания груза автору обнаружить в свободном доступе не удалось, в связи с чем предпринята попытка решения этой актуальной задачи.

Варианту запасовки каната с разнесенными верхними точками крепления соответствует схема на рис. 8б. При отклонении груза перераспределяется

нагрузка между канатами – правый ослабляется, левый нагружается, и в конечной точке B вся нагрузка будет приходиться на левый канат. Естественно предположить, что формула (3) применима и для расчета угла φ_{2r} , который будет равен углу φ_r на схеме a , груз отклонится от вертикальной линии, проходящей через точку O_2 , на величину $L \sin \varphi_{2r}$, а величина подъема h центра тяжести груза, рассчитанная исходя из равенства кинетической энергии в начале торможения и потенциальной энергии в конце, составит

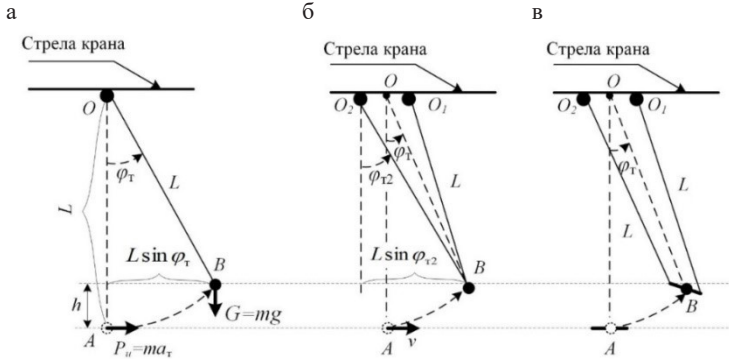


Рис. 8 Схема к расчету угла отклонения груза при торможении грузовой тележки со скоростью v методом анализа сил $P_{и}$ инерции движущегося груза и его веса G

$$h = \frac{v^2}{2g}. \quad (3)$$

И тогда отклонение груза от вертикальной линии, проходящей через точку O , будет меньше на величину половины расстояния между точками O_1 и O_2 . Это и будет ожидаемым уменьшением отклонения груза, подвешенного на одном или двух канатах, расположенных рядом.

Однако, измеренная на практике (по схеме рис.8б) величина отклонения груза, оказывается меньше расчетной. Это может быть объяснено расходом энергии на перераспределение нагрузки между канатами и на их растяжение. Значение величины отклонения груза, которое менее расчетного, замечено и при запасовке канатов по схеме, представленной на рис. 8в. Растяжение канатов частично компенсируется наклоном траверсы крюковой подвески, который возникает при длине траверсы, меньшей, чем расстояние между точками O_1 и O_2 .

Решение поставленной задачи было выполнено на основе проведения экспериментальных исследований. После приложения нагрузки, в рассматриваемом случае – силы инерции груза при торможении стреловой тележки БК, груз на канате совершает свободные затухающие колебания. Отсюда одна из задач экспериментальных исследований – определение влияния расстояния между канатами подвески груза на процесс затухания колебаний груза.

Для обработки результатов экспериментов, а именно, определения характеристик процесса затухания колебаний, была рассмотрена теория колебательного процесса.

Характеристики процесса затухания колебаний могут быть получены из решения дифференциального уравнения процесса:

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (4)$$

где β – коэффициент затухания колебаний; ω_0 – циклическая частота колебаний системы.

Решение уравнения для рассматриваемого случая может быть представлено в виде:

$$x(t) = A_n \exp(-\beta \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0), \quad (5)$$

где t – текущее время; ω – собственная частота колебаний системы; φ_0 – начальная фаза колебаний.

Входящие в формулы (4) и (5) величины могут быть найдены из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \beta &= -\ln(A_k / A_n) / t; \quad t = nT; \quad T = 2\pi\sqrt{L/g}; \\ \omega_0 &= 2\pi / T; \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \end{aligned} \quad (6)$$

где n и t – количество и время колебаний, после которых проводилось измерение A_k ; T – период колебаний.

Для наглядности удобно выразить амплитуду колебаний в функции количества колебаний n :

$$x(n) = A_n \exp[-\beta \cdot t(n)] \cdot \cos[\omega \cdot t(n) + \varphi_0]. \quad (7)$$

Тогда будет удобно оценивать изменение амплитуды между соседними колебаниями, например, между первым и вторым:

$$\Delta x(1-2) = x(1) - x(2). \quad (8)$$

На рис. 9 графически представлен результат решения уравнения (5) в Mathcad со значением $\beta = 0,02$.

Численное решение уравнения (4) возможно выполнить средствами математической среды Mathcad, а также рассчитать скорости и ускорения колебаний. Изменение амплитуды x выражено в функции времени t .

Из результатов расчета скорости и ускорения колебательного движения угла отклонения грузового каната в Mathcad, а именно, определения характеристик процесса затухания колебаний, можно сделать вывод, что расстояние между канатами подвески груза влияют на процесс затухания колебаний груза.

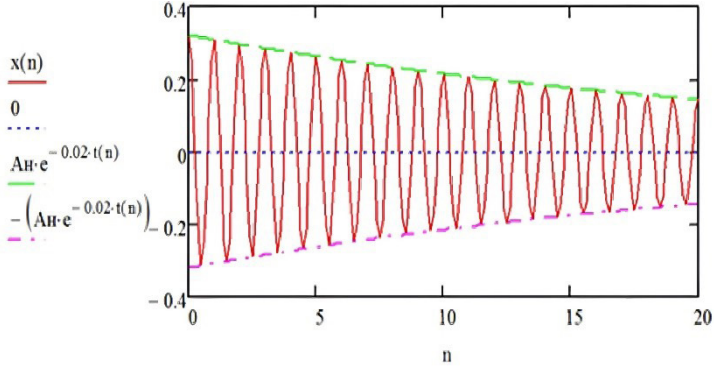


Рис. 9. Графическое представление в Mathcad затухающих колебаний.

Отклонение груза от ветровой нагрузки

Расчет ветровой нагрузки, действующей на груз, определяется согласно ГОСТ 1451-77 и приводится ниже.

Проведя вычисления отклонения угла каната груза от действия ветра, аналогичные схеме по рис. 10, получим

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg}\left(\frac{F}{mg}\right). \quad (9)$$

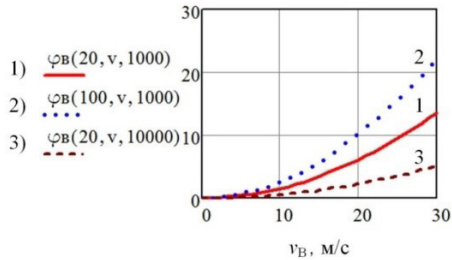


Рис. 10. Результаты расчета в Mathcad угла φ_B от давления ветра:

- 1) $L = 20 \text{ м}, m = 1000 \text{ кг};$
- 2) $L = 190 \text{ м}, m = 1000 \text{ кг};$
- 3) $L = 20 \text{ м}, m = 10000 \text{ кг}$

На основании численного моделирования по выведенным формулам для расчета углов отклонения грузового каната от вертикали можно сделать вывод, что наибольшие значения углов дают торможение грузовой тележки и ветровое давление.

В случае отсутствия автоматизированной системы управления механизмами БК машинист самостоятельно может предпринять нужные действия после получения от приборов сигнала, тем более, что при длине грузового каната 50 м время полупериода качаний составляет 7 секунд. А этого времени вполне достаточно для совершения управляющих воздействий.

5. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность произведенных расчетов

Исследование и техническая реализация устройства мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана выполнены на базе производственной площадки АО «ЛСР.Краны-СЗ» (Санкт-Петербург).

Как уже ранее было указано, для этих целей автором была разработана конструкция и осуществлена сборка опытного образца (прототипа) такого устройства.

При этом в задачи экспериментального исследования входило:

- определение основных характеристик процесса (регистрация) раскачивание груза;
- идентификация параметров разработанной математической модели прибора к реальному объекту;
- настройка разработанной прототипа модели в разных условиях эксплуатации;
- оценка сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Необходимо отметить, что описанная автором методика проведения экспериментальных исследований может быть применима ко всем типам грузоподъемных и иных машин.

Для проведения эксперимента в реальных условиях использованы следующие модели БК:

- 1) КБ-503Б (заводской номер №553 регистрационный номер №86956), оснащённый прибором безопасности ОНК-160Б (Версия РП 6.15 №6090035);
- 2) КБ-674 (заводской номер №760 регистрационный номер №89200), оснащенный прибором безопасности ОНК-М-29 с регистратором параметров.

Выбор указанных объектов для проведения исследования был обусловлен конкретными условиями рабочей деятельности автора.

Аппаратная часть опытного образца крепилась к крюковой подвеске БК. Ответная часть, предназначенная для визуального отображения раскачивания груза в реальном времени, располагалась в кабине, в удобном и доступном для машиниста месте. На рис. 11 показано крепление аппаратной части на крюковой подвеске БК и крепление планшетного компьютера в кабине БК модель КБ 503Б №553, рядом с прибором безопасности ОНК-160Б.

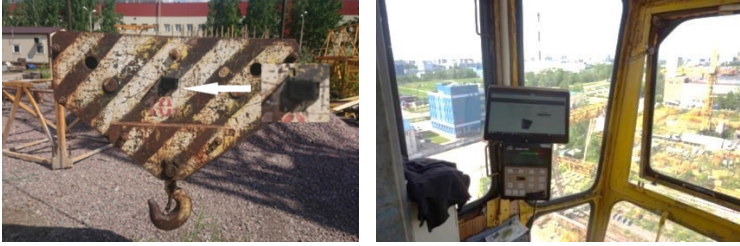


Рис. 11. Крюковая подвеска КБ 503Б №553 с устройством мониторинга положений канатов и груза грузоподъёмного крана и Крепление планшетного компьютера в кабине БК

При проведении эксперимента для обеспечения достоверности получаемых данных использовалось программное обеспечение ООО НПП «ЭГО» «Анализ регистратора параметров ОНК-160».

Обобщенные данные, полученные во время эксперимента с опытного образца, представлены в двух графиках затухающих колебаний (рис. 12 и 13) за промежуток времени в 70 секунд, где происходит разгон и торможение грузовой тележки с учётом гашения колебаний. Из графиков видно, что затухание колебаний груза наиболее быстро произошло на КБ 674 №760 – в течение 50 секунд, а на КБ 503Б №553 – в течение 65 секунд. Приведенные результаты подтверждают компьютерное моделирование, в котором на процесс затухания колебаний влияет расстояние между канатами, которое составило разницу в 43 %.

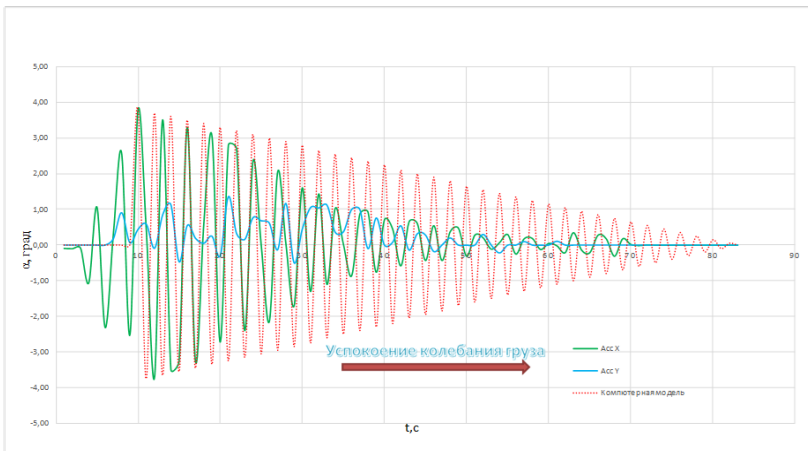


Рис. 12. Затухающие колебания при торможении грузовой тележки с двойной запасовкой на БК модели КБ 674 №760 и расчёты в Mathcad.

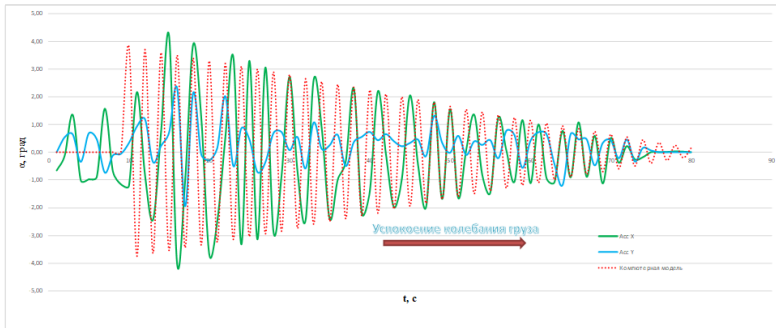


Рис. 13. Затухающие колебания при торможении грузовой тележки с двойной запасовкой и расчётов в Mathcad БК 503Б №553

Общая картина (с учётом погрешностей измерений) механических воздействий на объект исследования подтверждает адекватность результатов совпадения компьютерной модели с экспериментальными данными.

Ниже приведен график полученных результатов и данные сравнительного анализа экспериментальных и смоделированных процессов в Mathcad для БК 503Б № 553.

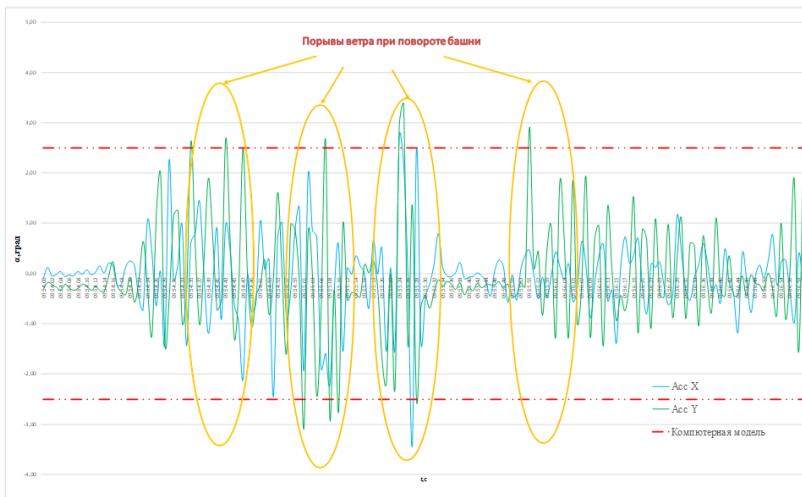


Рис. 14. Отклонение груза 1000 кг при давлении ветра 8 м/с, и процесс затухания колебаний груза по ветру и против ветра на БК 503Б №553 и расчётов в Mathcad

В результате исследований получены процессы раскачивания груза при взаимодействии действия на груз, а также результаты принятия мер по гашению колебаний груза при ветровой нагрузке на действующих БК: КБ503 № 553 и КБ674 А № 760.

6. Выполнено технико-экономическое обоснование эффективности предлагаемых решений

Оценка экономической эффективности от внедрения предложенного метода обеспечения безопасности эксплуатации БК осуществлена в разрезе двух составляющих:

1. Экономия за счет повышения эффективности эксплуатации БК, связанной с сокращением длительности стандартного рабочего цикла.

В стоимостном выражении, на примере БК модель КБ503, среднегодовой эффект при использовании предложенного метода составит более 320 000 руб., что в 6 раз превышает совокупную стоимость сборки, установки и последующего обслуживания разработанного устройства.

2. Экономия за счет сокращения внеплановых затрат.

В зоне плохой видимости для машиниста (оператора) БК при перемещении груза БК могут возникнуть такие колебания (раскачивания) груза, которые несут риск повреждения тары, грузозахватных приспособлений или канатов.

В стоимостном выражении, на примере БК Liebherr 110EC-B6, осуществлена оценка экономии по сравнению с расходами, связанными с необходимостью внеочередной заменой оборудования, повреждение которого могло быть предотвращено в случае использования предложенного технического решения.

Для примера произведен расчет вероятных издержек разового повреждения каната для данной модели БК, стоимостью 144 200 руб. (на 01.02.2023) с минимальной запасовкой. С учетом стоимости каната, минимальные издержки по его замене составят не менее 162 000 руб., что более чем в 3 раза превышает совокупную стоимость сборки, установки и последующего обслуживания разработанного устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Достигнута цель диссертационной работы – разработан метод, а также разработаны способы мониторинга положения грузового каната и груза, перемещаемым БК, и контроля за опасными отклонениями каната от вертикальной оси.

2. Решены задачи диссертационной работы, представляющие её научную новизну:

– установлена специфика структурного состава и конструктивного исполнения приборов (систем) безопасности БК, используемых в отечественной строительной отрасли;

– разработан новый подход к обеспечению безопасности при опасном колебании груза на БК в зоне ограниченной видимости.

- смоделирована зависимость между основными факторами, влияющими на позиционирование груза в процессе его перемещения БК, и углом отклонения каната с грузом от вертикальной оси;

- предложен способ и метод безопасного и эффективного процесса перемещения груза и позиционирования его БК с учётом контроля колебаний груза (в т.ч. в зоне ограниченной видимости («слепой» зоне) для машиниста (оператора) БК);

- на основе произведенных расчетов сформулированы рекомендации для машинистов (операторов) БК по уменьшению раскачивания груза при повороте стрелы, ветровой нагрузке и торможении грузовой тележки.

3. Новизна и практическая промышленная применимость разработанных технических решений подтверждена полученными патентами на полезные модели (RU 196670 U1, RU 197689 U1, автор Боушев В.Ю.).

4. Принципиальные преимущества предложенных автором разработок заключаются в:

- относительной простоте технического исполнения и удобстве дальнейшего технического обслуживания;

- универсальности их функционального использования на любых типах грузоподъемных кранов;

- возможности использования в зонах ограниченной видимости («слепой зоне») для машиниста (оператора) БК;

- низким уровне затрат по производству, установке и техническому обслуживанию предложенного устройства.

5. Включение предложенных автором разработок в систему управления грузоподъемных кранов даёт преимущество перед другими приборами безопасности, поскольку может предупредить о возможном нарастании раскачивания груза, позволяя при получении соответствующих сигналов выполнить команды по уменьшению раскачивания груза.

6. Экономическая эффективность предложенной разработки достигается не только за счет повышения безопасности эксплуатации грузоподъемных кранов, но и в значительной степени – посредством уменьшения скорости износа узлов и деталей и сокращения длительности выполняемых рабочих циклов.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. **Боушев В.Ю.** Современные приборы безопасности башенных кранов, оснащённые регистраторами параметров и их перспективное развитие / В.Ю. Боушев // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 8. – С. 39-42.

2. **Боушев В.Ю.** Раскачивание груза на башенном кране и проблемы мониторинга колебательных движений груза / В.Ю. Боушев // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2021. – № 11. – С. 20-24.

3. **Боушев В.Ю.** К вопросу о защите башенного крана от достижения предельного угла отклонения грузового каната / В.Ю. Боушев, Т.В. Виноградова, А.В. Зазыкин, С.В. Репин, Н.Д. Ховалыг // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 6. – С. 14-18.

4. **Боушев В.Ю.** Экспериментальное исследование влияния вариантов заправки каната на грузовой тележке башенного крана на раскачивание груза / В.Ю. Боушев // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 8. – С. 8-14.

Патенты

5. **Боушев В.Ю.** Пат. 197689 Российская Федерация, МПК В66С 13/04, В66С 23/90. Устройство мониторинга положений канатов грузовой тележки башенного крана / Боушев В.Ю.; заявитель и патентообладатель Боушев В.Ю. – 2019134314; заявл. 26.10.2019; опубл. 21.05.2020. – 6 с.

6. **Боушев В.Ю.** Пат. 196670 Российская Федерация, МПК В66С 23/88. Устройство мониторинга положений канатов и груза грузоподъемного крана / Боушев В.Ю.; заявитель и патентообладатель Боушев В.Ю. – 2019138964; заявл. 30.11.19; опубл. 11.03.20. – 10 с.

Прочие издания

7. **Боушев В.Ю.** Методика обеспечения безопасности эксплуатации башенных кранов, оборудованных регистраторами параметров / В.Ю. Боушев // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения. Материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Сер. «Актуальные проблемы современного строительства». – 2018. – С. 50-54.

8. **Боушев В.Ю.** Обеспечение безопасности эксплуатации башенных кранов / В.Ю. Боушев // Актуальные проблемы современного строительства. Материалы 72-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях. – 2019. – С. 101-105.

9. **Боушев В.Ю.** Метод повышения безопасности эксплуатации грузоподъемных машин // Актуальные проблемы современного строительства. Материалы 73-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2-х частях. – 2020. – С. 3-9.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 22.12.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 188.

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.