

На правах рукописи



Емельянова Галина Александровна

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ  
ОБЕСПЕЧЕНИИ ТРЕБУЕМЫХ КРИТЕРИЕВ РИСКА**

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и  
детали машин

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва -2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» на кафедре «Путевые, строительные машины и робототехнические комплексы».

**Научный консультант:** **Ковальский Виктор Федорович**

доктор технических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты:**

**Короткий Анатолий Аркадьевич**

доктор технических наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», заведующий кафедрой «Транспортные системы и логистика»

**Баурова Наталья Ивановна**

доктор технических наук, доцент

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», профессор кафедры «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин»

**Кузьминов Александр Леонидович**

доктор технических наук, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», профессор кафедры «Транспортные средства и техносферная безопасность»


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

Защита состоится «15» февраля 2017 г., в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГУПС (МИИТ), [www.miit.ru](http://www.miit.ru).

Автореферат разослан «\_\_» декабря 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Н.Н. Воронин



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** С 15 февраля 2013 года на территории Таможенного союза начали действовать технические регламенты, устанавливающие требования к продукции в области машиностроения и электротехники, в числе которых и Технический регламент таможенного союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования», утвержденный Решением комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г., № 823, содержащий обязательные требования к подъемным сооружениям (сокращенно ПС).

Однако, для продукции общего и специального машиностроения, в частности, грузоподъемных кранов различных типов, требований этих нормативных документов оказалось недостаточно, поскольку они распространяются не на все краны мостового типа современного отечественного краностроения, в т.ч., например, на грузоподъемные краны объектов использования атомной энергии (сокращенно ОИАЭ).

Подтверждение соответствия грузоподъемных кранов при сертификации сегодня осуществляется в виде декларирования о соответствии, либо оформления сертификата соответствия, если иное не предусмотрено действующим законодательством. Для грузоподъемных кранов, при необходимости, по требованиям п. 260 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» (ФНП ПС) (утверждены приказом Ростехнадзора от 12.11.2013 г., №533), следует «...выполнять экспертизу промышленной безопасности».

Однако по каким нормативам выполнять экспертизу промышленной безопасности, в каком объеме и каким образом необходимо фиксировать наработку грузоподъемного крана, а также как ее использовать для последующей оценки ресурса и надежности, особенно после проведения на кране ремонта с применением сварки, неясно до сих пор.

Еще ряд ключевых вопросов, на которые нет «нормативных» ответов, связан с подтверждением соответствия, на которое ориентируют сертификационные органы отечественную краностроительную промышленность и службы эксплуатации грузоподъемных кранов, в свете введенного в действие ТР ТС 010/2011. В приложениях к этому документу имеется два перечня стандартов: «Перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований технического регламента Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» (ТР ТС 010/2011)» и «Перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований технического регламента ТР ТС 010/2011 и осуществления оценки (подтверждения) соответствия продукции».

Грузоподъемные краны и электрические тали вошли в две группы: «Оборудование подъемно-транспортное (краны)» и «Тали электрические канатные и цепные». Этот перечень содержит всего 11 (!) стандартов, из которых нет ни одного стандарта, касающегося *специальных грузоподъемных кранов: металлургических, магнитных, контейнерных, штыревых* и т.п. Это означает, что любой специальный кран будет испытан (если будет испытан!), как *обычный кран общего назначения*. Понятно, что при таком подходе, любой специальный грузоподъемный кран, в том числе, сейсмостойкий или кран для объекта использования атомной энергии будет *«всему соответствовать»*.

Еще одно важное замечание касается принятой редакции ТР ТС 010/2011, которая в ближайшее время ориентирует нас на оценку риска. Оценивать риск при отсутствии стандартов на оценку надежности, ресурсные испытания и подтверждение соответствия целого ряда специальных грузоподъемных кранов, выглядит, по меньшей мере, абсурдно. В связи с этим, следует считать, что разработка методов, позволяющих решать конкретные инженерные задачи оценки технического состояния и надежности (в том числе и риска) грузоподъемного оборудования на различных стадиях его жизненного цикла, является одной из общих задач современного отечественного машиностроения и, несомненно, *актуальна*.

**Цели и задачи.** Целью диссертационной работы является обеспечение требуемых критериев допустимого риска с использованием разработанных методологических основ оценки надежности грузоподъемного оборудования.

Далее, в соответствии с ТР ТС 010/2011, под *«риском»* будем понимать сочетание вероятности причинения вреда и последствий этого вреда для жизни или здоровья человека, оборудования, окружающей среды, а под *«надежностью»* – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции. Применительно к оценке риска, надежность будет определять вероятность не причинения возможного вреда для жизни или здоровья человека, оборудования, окружающей среды.

Для достижения намеченной цели в работе было необходимо сформулировать и решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ нормативов по оценке технического состояния и диагностированию различных типов грузоподъемного оборудования, уделив особое внимание методам неразрушающего контроля, которые необходимы для определения правильной концепции ремонта в сложных случаях повреждений их металлоконструкций.

2. Исследовать экспериментально границы и адекватность применения магнитных методов неразрушающего контроля, позволяющих оценить зону «поврежденного» металла (металла, механические свойства которого существенно ниже использованных при проектировании и изготовлении металлоконструкций), в том числе, для грузоподъемного оборудования ВС РФ.

3. Выбрать и обоснованно развить практические инженерные методы оценки надежности, применимые к различным типам грузоподъемного оборудования.

4. Обосновать предельные показатели надежности грузоподъемного оборудования с учетом параметров нагружения, механических свойств материалов, а также назначения и степени ответственности опасных производственных объектов, на которых это оборудование установлено.

5. Разработать математические модели и инженерный подход к оценке сейсмостойкости и надежности мостовых грузоподъемных кранов, установленных в сейсмоопасных зонах.

6. Предложить обоснованные варианты повышения сейсмостойкости (надежности) грузоподъемного оборудования, предназначенного для сейсмоопасных зон, на стадии проектирования.

7. Провести лабораторные и натурные испытания влияния воздействия ударной нагрузки на рельс, обосновывающие назначение коэффициентов динамичности нагрузок взаимодействия «движущийся кран –рельсовый крановый путь».

8. Разработать структуру и практические рекомендации к проекту ГОСТ Р на надземные рельсовые крановые пути.

9. Предложить обобщенный метод оценки надежности грузоподъемного оборудования, пригодный для использования при разработке документов по обоснованию безопасности и оценке не экономической составляющей риска грузоподъемного оборудования.

**Методы и объекты исследования.** Теоретические исследования проводились с использованием численных методов моделирования и известных пакетов программ для ПЭВМ, а также программ по статистической обработке результатов эксперимента.

Экспериментальные исследования основывались на использовании образцов грузоподъемных машин специального назначения, новых конструкций грузоподъемных кранов и современных методов испытаний, с применением магнитных методов неразрушающего контроля.

Объектом исследования является грузоподъемное оборудование (грузоподъемные краны различных типов, специальные краны для ОИАЭ и грузоподъемные машины военного назначения).

**Научная новизна** полученных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- усовершенствован метод контроля состояния элементов металлических конструкций с применением магнитных структуроскопов (коэрцитиметров) для диагностирования металлоконструкций грузоподъемных машин специального назначения перед выполнением ремонта, отличающийся тем, что в нем учтены особенности указанных конструкций, границы изменения фактических свойств сталей, из которых они изготовлены, а также свойства контролируемого металлопроката;

- разработан общий алгоритм технического диагностирования металлических конструкций, который использован при диагностике грузоподъемного оборудования специального назначения и грузоподъемных кранов, отличающийся тем, что в нем обоснована не только последовательность выполнения работ, но и даны рекомендации по оценке магнитных характеристик с учетом различных толщин металлопроката (до 20 мм) и реальной наработки конструкции;
- разработан обобщенный метод оценки надежности грузоподъемных кранов, отличающийся тем, что в нем учтены параметры нагружения, механические свойства материалов, а также назначение и степень ответственности опасных производственных объектов, на которых эти краны установлены;
- впервые обоснованы предельные контрольные цифры по надежности (от  $1,25 \times 10^{-4}$  до  $10^{-6}$ ) грузоподъемных кранов различных групп классификации, отличающиеся тем, что их можно использовать в практических расчетах при разработке документов по обоснованию безопасности указанного грузоподъемного оборудования;
- разработаны математическая модель и методический подход к оценке сейсмостойкости мостовых грузоподъемных кранов, отличающиеся тем, что в них учтены как рекомендации по расчетам металлоконструкций, принятые в краностроении, так и особенности нормативных документов по сейсмическим расчетам различных конструкций, позволяющие большинство расчетов выполнять в квазистатической постановке;
- на основе результатов 16 сейсмических расчетов, предложен синтез металлоконструкций грузоподъемных мостовых кранов в сейсмостойком исполнении, отличающийся тем, что в нем впервые обосновано влияние параметров проектируемого оборудования;
- уточнены необходимые коэффициенты динамичности воздействия от дефектных ходовых колес движущегося крана на рельс на основе проведенных лабораторных и натурных испытаний влияния воздействия ударной нагрузки на рельс;
- установлена величина коэффициента демпфирования конструкции рельсового пути, пригодная для исследования динамики движения железнодорожных кранов, на основе проведенных натурных испытаний движущегося экипажа.

**Практическая ценность.** Разработаны усовершенствованные инженерные методы технического диагностирования металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения и грузоподъемных кранов. Обоснована и опубликована итоговая таблица максимально допустимых значений вероятностей аварий металлоконструкций грузоподъемных кранов общего назначения и их механизмов, результаты которой можно использовать в практических расчетах при разработке обоснования безопасности грузоподъемных кранов, согласно требованиям ТР ТС 010/2011. Приведены примеры оценки надежности грузоподъемных кранов для объектов использования атомной

энергии (ОИАЭ). Рассмотрены практические примеры определения напряженно-деформированного состояния (НДС) ряда мостовых кранов различной грузоподъемности и пролетов, установленных в зданиях сейсмически активной зоны. Установлено, что при оценке сейсмостойкости конструкции грузоподъемного крана следует оценивать не только возможную текучесть элементов металлоконструкции грузевого крана, но и усилия смещения (или отрыва) колес незагруженного крана от рельсового кранового пути в момент сейсмического толчка. Обоснованы практические рекомендации по расчету и конструированию мостовых двухбалочных кранов сейсмостойкого исполнения для ряда предприятий подотрасли краностроения. Проанализированы различные модели распространения ударных волн в рельсах и подкрановых балках, которые нашли свое отражение при разработке проекта ГОСТ Р на надземные рельсовые крановые пути.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертационной работы являются составной частью следующих нормативных документов:

- Методика по оценке технического состояния, остаточного ресурса, срока службы, возможности и условий дальнейшей эксплуатации грузоподъемных устройств, установленных на кораблях и судах ВМФ, плавучих кранов., 2007 г.

- Методика проведения обследования и технического диагностирования автомобильных кранов, эксплуатируемых в войсковой части 31600, с целью продления срока их эксплуатации., 2009 г.

- Методика по техническому диагностированию грузоподъемного оборудования железнодорожных кранов ЕДК с целью установления возможности продления срока их службы и условий дальнейшей эксплуатации. РД 10 - 112 – РЖД, 2012 г.

- «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия» Проект национального стандарта Российской Федерации, разработанного на основании Программы национальной стандартизации на 2014-2015 г.г. по ТК-289. Шифр по ПНС 1.2.289-2.005.14;

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении практических расчетов по оценке сейсмостойкости и обоснованию безопасности грузоподъемных кранов, проектируемых и изготавливаемых отечественной промышленностью.

**Апробация работы.** Основные положения работы обсуждались:

- на международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела» Москва, МИИТ, 2006 г.

- в рамках Деловых программ Международных выставок «КранЭкспо», Москва, ВВЦ, в 2007 г., 2008 г., 2009 г., 2010 г., 2013 г., 2014 г., 2016 г.

- на семинарах IV и V международных Уральских Конгрессов подъемно-транспортного оборудования «ПТМ-Урал 2010 и 2012», г. Екатеринбург в 2010 г. и 2012 г.

- на международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов «Наука, образование и экспериментальное проектирование». МАРХИ. 2014 г.

- на семинаре кафедры «Путевые, строительные машины и робототехнические комплексы» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТа) в январе и марте 2015 г.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы отражено в 36 печатных работах: в 35 статьях (из перечня ВАК РФ – 18 статей) и монографии, общим объёмом 25,73 п.л.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы (206 наименований) и приложений. Содержание работы изложено на 280 страницах машинописного текста, в том числе 63 рисунка, 34 таблицы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** содержит обоснование актуальности проводимого исследования и его связь с необходимостью решения ряда задач, направленных на выработку научных и практических рекомендаций в части совершенствования методик по оценке технического состояния грузоподъемного оборудования, его надежности, критериев оценки сейсмостойкости, работоспособности и безопасности на различных стадиях жизненного цикла. Здесь же сформулированы цель работы и задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, а также научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы.

**Раздел 1** посвящен вопросам снижения и исключения риска эксплуатации грузоподъемного оборудования, для чего проанализирована история развития отечественных методик по экспертизе и техническому диагностированию грузоподъемного оборудования серии РД 10-112. Проанализированы известные работы Е.М. Концевого, Б.М. Розеншейна, Д.И. Дувидовича, В.С. Котельникова, Л.В. Стоцкой, А.Ф. Кириллова, А.А. Зарецкого, Л.А. Невзорова, О.В. Леоновой, А.А. Короткого, А.С. Липатова, Ю.И. Гудкова, и др, а также исследования в области металлографии, неразрушающего контроля и оценки ресурса расчетных металлоконструкций грузоподъемного оборудования В.Н. Пустового, В.М. Горицкого, Н.И. Бауровой, С.А. Соколова, Н.Н. Коновалова, Н.Н. Вадковского, В.Н. Березина, Б.Е. Попова, Е.А. Левина, В.А. Попова и др.

Отработка практических рекомендаций по предельным браковочным признакам специального грузоподъемного оборудования проводилась в рамках данного исследования при разработке методик различных типов грузоподъемного оборудования: железнодорожных кранов ЕДК, автомобильных кранов, эксплуатируемых в войсковой части 31600 и грузоподъемных устройств, установленных на кораблях и судах ВМФ РФ, при этом во внимание было принято следующее:



1. Все металлоконструкции разбивались на группы, имеющие однотипные элементы и аналогичные схемы нагружения (растяжение-сжатие или изгиб).

2. Допустимые предельные остаточные деформации элементов устанавливались по ранее принятым апробированным нормам с учетом ответственности данного грузоподъемного оборудования: для более ответственного или более интенсивно используемого оборудования назначаемые нормы были более консервативными.

3. При отсутствии нормативного показателя было решено его назначать по результатам расчета консервативной схемы деформированного элемента.

Для грузоподъемного оборудования специального назначения ВМФ РФ эти методики пришлось создать заново, поскольку надежная статистика по повреждениям их металлоконструкций отсутствовала, и многие известные браковочные признаки грузоподъемных кранов использовать было нельзя. Второй важной особенностью этого грузоподъемного оборудования оказалось применение в них стали ВСтГпс5, которая не используется в отечественном краностроении.

Особое место в развитии этих исследований занимают методы с использованием магнитной коэрцитиметрии металлоконструкций, определяющие границы «поврежденного» металла (с низкими механическими свойствами) для определения зоны металлоконструкции, требующей последующего усиления при ремонте, начало которым положили известные работы Б.Е. Попова и Е.А. Левина.

Примеры специального оборудования ВМФ и ВС РФ, для которого разработаны методики технического диагностирования представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Примеры специального оборудования ВМФ и ВС РФ, для которого разработаны методики технического диагностирования

Как известно из работ Б.Е. Попова, Е.А. Левина, весь период работы металлоконструкции грузоподъемного оборудования можно разделить на три этапа, определяемых стадиями нагружения металла на кривой « $\sigma - \varepsilon$ » (напряжение - деформация), которым соответствуют следующие режимы эксплуатации:

I - режим надежной эксплуатации, когда все несущие элементы работают в упругой области; анизотропия и концентрация внутренних напряжений менее 25 %.

II - режим контролируемой эксплуатации, когда отдельные элементы (или зоны) работают в упругопластической области, остальные - в упругой. Анизотропия свойств и концентрация напряжений достигают 50 %.

III - критический режим эксплуатации, когда отдельные элементы или участки несущей металлоконструкции работают в пластической области, а металлоконструкция в целом - в упругопластической и упругой областях. Элементы, достигшие  $H_{CT}$  и  $H_{CB}$ , в которых образовались трещины, подлежат ремонту в специализированной организации.

При переходе больших участков расчетных элементов металлоконструкции целиком в стадию, называемую «пластический шарнир» (по всей площади сечения  $H_C > H_{CT}$ ), изделие подлежит списанию (или утилизации).

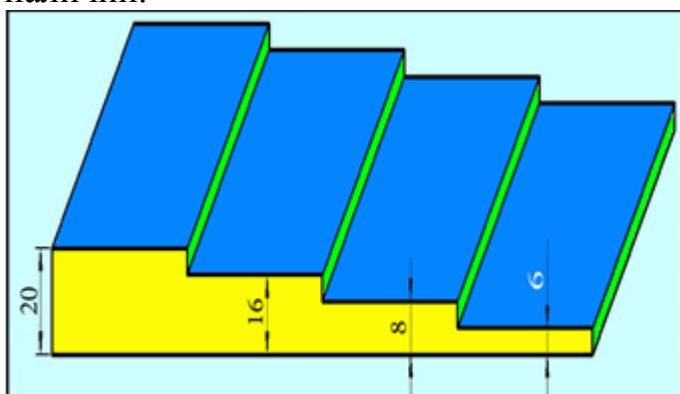
Прирост величины коэрцитивной силы при появлении напряжений в металле относительно исходного состояния поставки  $H_{C0}$  и до состояния разрушения  $H_{CB}$  составляет 100-400 % в зависимости от марки металла. Такой информационной чувствительности к процессам деградации металла пока не выявлено ни у какого иного метода неразрушающего контроля.

Однако и эти методы нуждались в дальнейшем развитии (разработке единого алгоритма диагностирования, учету различных толщин элементов металлоконструкций, распространению браковочных показателей на марки сталей, применяемых для специального грузоподъемного оборудования ВС РФ, и т.д.). Проведение первых технических диагностирований металлоконструкций, выполненных в данной работе с применением магнитного структуроскопа (коэрцитиметра) показало, что для выявления участков с «пластическими шарнирами» текущие показания прибора надо сравнивать с неким «эталоном», изготовленным из данной или аналогичной по свойствам партии стали. В противном случае, было не совсем понятно, с чем сравнить полученные результаты: то ли они уже отражают некую «наработку» реальной металлоконструкции, то ли фактические магнитные свойства отражают изначальное несоответствие (особенности) физико-механических свойств стали, из которой они изготовлены.

В результате проведенных исследований, нами разработан общий алгоритм технического диагностирования металлических конструкций, заключающийся в следующем:

1. До начала выполнения работ по техническому диагностированию ответственных металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения изготавливаются стальные образцы, конфигурация которых приведена на рисунке 2 а) из стали, которая указана в паспорте (формуляре) изделия. Размеры площадок, показанные на рисунке 2 а) темным цветом, должны обеспечивать возможность установки датчика структуроскопа (коэрцитиметра) и обеспечивать дополнительные свободные границы площадки, не занятые датчиком, не менее 5 мм с каждой стороны.

В случае отсутствия данных о стали в паспорте (формуляре) изделия, на различных элементах металлоконструкции известной толщины делают несколько замеров  $H_C$  и по их результатам подбирают один из эталонов, соответствующих по форме, показанному на рисунке 2 а), из имеющихся в наличии.



а) – Форма стального образца для тарировки показаний структуроскопа (коэрцитиметра) в зависимости от толщины исследуемой металлоконструкции

б) – Пример выявления зоны пораженного металла вокруг трещины при проведении технического диагностирования с применением структуроскопа

Рисунок 2 – Применение структуроскопа (коэрцитиметра) при проведении технического диагностирования

2. По чертежам общих видов металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения намечают предварительную схему выполнения замеров  $H_C$ .

3. Выполняется визуально-инструментальный контроль металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения с целью выявления мест и зон, имеющих подозрения на наличие повреждений. Выявленные места возможных повреждений дополнительно подвергают одному из видов неразрушающего контроля, например, цветной дефектоскопии с использованием пенетрантов. Пример результатов контроля для вышки 40В6М приведен в таблице 1.

4. Для выявленных поврежденных зон металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения, устанавливаются границы изменения физико-механических свойств, которые необходимы для определения зоны, подлежащей последующему ремонту. Границы зоны

перехода к непораженному металлу отмечают контрастной липкой лентой или мелом (пример на рисунке 2 б).

5. Далее приступают к выполнению замеров других мест металлоконструкции, отмеченных на схеме, и результаты измерений заносят в итоговую таблицу (ее фрагмент приведен в таблице 2).

Таблица 1 – Результаты замеров  $H_C$ , выполненные на левом аутригере вышки типа 40В6М

№	Место выполнения замера $H_C$ на левом аутригере вышки 40В6М, толщина листа – постоянная	Величина $H_C$ , А/см	
		Датчик вдоль элемента	Датчик поперек элемента
Лицевая сторона			
1	$L = 200$ мм от начала конструкции	3,41	3,37
2	$L = 950$ мм от начала конструкции	3,48	3,51
3	$L = 1660$ мм от начала конструкции (вблизи сварного шва)	5,22	3,85
4	Место изменения профиля	6,42	4,66
5	Место приварки гидравлической опоры аутригера	7,08	4,04
Обратная сторона			
6	$L = 200$ мм от начала конструкции	3,36	4,18
7	$L = 950$ мм от начала конструкции	4,22	4,01
8	$L = 1660$ мм от начала конструкции (вблизи сварного шва)	5,11	3,37
9	Место изменения профиля	6,62	4,91
10	Место приварки гидравлической опоры аутригера	5,56	4,80

6. Руководствуясь данными о стали (например, стали 09Г2С), из которой изготовлена металлоконструкция вышки 40В6М, согласно итоговой таблице, выбираем следующие усредненные данные для стали в диапазоне толщин до 20 мм.

Таблица 2 – Данные о свойствах конкретной стали, из которой изготовлена металлоконструкция вышки типа 40В6М

Марка стали	Механические свойства			Магнитные свойства			
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$H_{C0}$	$H_{CT}$	$H_{CB}$	$H_{Cуст}$
09Г2С	450	310	20	4,0	7,8	9,5	9,5

Сравнивая эти данные о физико-механических свойствах стали с результатами замеров, приведенных в таблице 1, можно сделать следующие выводы:

а) Все реально полученные в результате замеров величины  $H_C$  соответствуют диапазону для стали 09Г2С, что позволяет подтвердить

применение указанной стали для проверяемой сборочной единицы металлоконструкции.

б) Величины  $H_C$ , измеренные вдоль проверяемой сборочной единицы металлоконструкции выше результатов соответствующих замеров поперек указанных элементов, что подтверждает действительный характер нагружения аутригера в процессе эксплуатации.

в) Места изменения профиля сечения диагностируемого аутригера характеризуются более высокими величинами  $H_C$ , что также подтверждает адекватное восприятие нагрузки аутригером в процессе эксплуатации.

г) Результат измерения  $H_C$  в положении 5 (таблица 1) может косвенно указывать на наличие дефекта сварки или места зарождения трещины, однако предел  $H_{CT}$  по текучести, равный 7,8, еще не достигнут, не говоря уже о пределе  $H_{C_{уст}}$  по циклической прочности, который установлен равным 9,5.

В заключение изложения содержания данного раздела, приведем таблицу 3 Б.Е. Попова, Е.А. Левина, которая дополнена результатами, в рамках данного исследования сталью ВСтГпс5 (в таблице выделена жирным шрифтом).

Таблица 3 – Механические и магнитные свойства некоторых сталей, применяемых для изготовления металлоконструкций грузоподъемного оборудования

Марка стали	Механические свойства			Магнитные свойства <sup>1</sup>			
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$H_{C0}$	$H_{CT}$	$H_{CB}$	$H_{C_{уст}}$
Ст3	350	210	22	2,5	5,0	6,0	5,8
<b>ВСтГпс5</b>	<b>380</b>	<b>230</b>	<b>25</b>	<b>2,9</b>	<b>5,4</b>	<b>6,3</b>	<b>5,8</b>
ВСтЗсп5	400	240	25	3,0	5,5	6,5	5,9
09Г2С	450	310	20	4,0	7,8	9,5	9,5
10ХСНД	540	400	19	5,0	11,5	14,5	13,5
Ст20	420	260	24	4,5	10,5	13,5	13,0
17Г1С	520	350	23	4,0	10,0	14,0	14,0

*Расшифровка обозначений таблицы 3*

$H_{C0}$  - исходное значение коэрцитивной силы;

$H_{CT}$  - соответствует уровню внутренних напряжений, равных пределу текучести стали;

$H_{CB}$  - соответствует достижению предела прочности стали  $\sigma_B$ .

$H_{C_{уст}}$  - критическое (по усталости) значение коэрцитивной силы.

Рассмотрев вопросы оценки технического состояния и критерии работоспособности грузоподъемного оборудования в эксплуатации, перейдем к изложению подходов оценки его надежности и риска на этапах проектирования (**Раздел 2** данной работы).

<sup>1</sup> Усредненные величины для диапазона толщин металла до 20 мм.



Применительно к надежности грузоподъемных кранов известны работы В.И. Брауде, Л.В. Коновалова, А.Ю. Пинеса, Д.И. Сегалья, Н.Г. Гринчара и др.

С учетом допустимого (приемлемого) уровня надежности и риска обычно оценивают следующие предельные состояния проектируемого крана:

- по потере несущей способности и (или) полной непригодности к эксплуатации;

- по затруднению нормальной эксплуатации.

К предельным состояниям по потере несущей способности относят предельные состояния, которые ведут к полной эксплуатационной непригодности грузоподъемного крана или к полной (частичной) потере несущей способности расчетных элементов его металлической конструкции (разрушение, образование значительных трещин, потеря устойчивости, переход в изменяемую систему за счет деформаций и разрушений, и т.п.).

К предельным состояниям по затруднению нормальной эксплуатации относят состояния, при которых снижается долговечность расчетных элементов металлической конструкции (вследствие образования недопустимых перемещений элементов соединений, начальных трещин в местах концентрации напряжений, значительных коррозионных повреждений и т.п.) и (или) возникают недопустимые колебания элементов конструкции, снижающие точность выполнения операций по перемещению груза.

Оценка риска обычно включает в себя анализ частоты отказов, анализ последствий выявленных событий и анализ неопределенностей результатов.

Предположим, что  $S$  – множество всех вероятных неблагоприятных событий

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}. \quad (1)$$

Обозначим  $K$  – каждое из возможных сочетаний событий, из которых определенное сочетание  $K_i$  является подмножеством неблагоприятных событий множества  $S$ , записываемых в виде:

$$K = \{S_{k1}, S_{k2}, \dots, S_{ki}\}. \quad (2)$$

Предположим, что в подмножестве неблагоприятных событий  $S$  имеются  $E_i$  – рискованные варианты решений и  $N_i$  – гарантированное отсутствие неблагоприятных событий для рискованного варианта

$$K_i = \{K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{ik}, N_i\}. \quad (3)$$

Вероятность рискованного решения обозначим через  $P_i(K_{ij})$  и назовем его индексом риска, а вероятность гарантированного отсутствия неблагоприятного события через  $P_i(N_i)$  и назовем его соответственно индексом безопасности. Тогда очевидно, что

$$\sum_{i=1}^k P_i(K_{ij}) + P_i(N_i) = 1. \quad (4)$$

Если каждому сочетанию  $K_{ij}$  может быть поставлено в соответствие количественно описываемое последствие –  $A_{ij}$ , то величину рискованного сопутствующего решения –  $E_i$  можно оценить риском, вычисляемым по формуле:

$$R_{isk} = \sum_{i=1}^k A_{ij} P_i(K_{ij}) . \quad (5)$$

Когда объект не работает, то для большинства грузоподъемных кранов, индекс риска можно принять равным нулю, а индекс безопасности 1, и, соответственно,  $R_{isk} = 0$ , однако наиболее важным (с точки зрения безопасности) является выполнение условия, когда  $R_{isk \text{ фактический}} \leq [R_{isk}]$ , т.е. риск фактический меньше или равен риску допустимому.

Согласно определению, принятому в ТР ТС 010/2011, «допустимый риск» - значение риска от применения машины и (или) оборудования, исходя из технических и экономических возможностей изготовителя, соответствующего уровню безопасности, который должен обеспечиваться на всех стадиях жизненного цикла продукции». Таким образом, ТР ТС 010/2011, устанавливая необходимость разработки «обоснования безопасности - документа, содержащего анализ риска...», не дает никаких рекомендаций по назначению показателей, так называемого, *допустимого* риска.

Поскольку на этапе проектирования крана общего назначения заранее неизвестно, где он затем будет эксплуатироваться, при назначении допустимого риска есть смысл ограничиться лишь оценкой *допустимой вероятности отказа* разрушения его металлоконструкций и падения груза.

Представим суммарную наработку грузоподъемного крана общего назначения, учитываемую регистраторами параметров, в виде произведения коэффициента распределения нагрузок на класс использования  $k_{mi} \times U_i$ . Тогда, вероятность того, что с несущими элементами металлоконструкции грузоподъемного крана за весь срок службы ни в одном из рабочих циклов не произойдет аварии, можно определить следующим образом:

$$P \leq \frac{1}{k_{mi} \times U_i} . \quad (6)$$

Выполнив расчет формуле (6) для всех сочетаний режимов нагружения и классов использования, получим таблицу 4, в которой обоснованы величины допустимой вероятности аварий серийных кранов в течение срока службы, назначенного изготовителем.

Как указано в пункте 2 статьи 4 ТР ТС 010/2011, методы оценки риска должны обеспечиваться «...выполнением требований межгосударственных стандартов, а в случае их отсутствия (до принятия межгосударственных стандартов) – национальных (государственных) стандартов государственных Таможенного союза, в результате применения которых на добровольной основе будет обеспечиваться соблюдение требований технического регламента Таможенного союза...».

Таблица 4 – Максимально допустимые значения вероятностей аварий металлоконструкций грузоподъемных кранов общего назначения, в зависимости от классов использования и коэффициентов распределения нагрузок

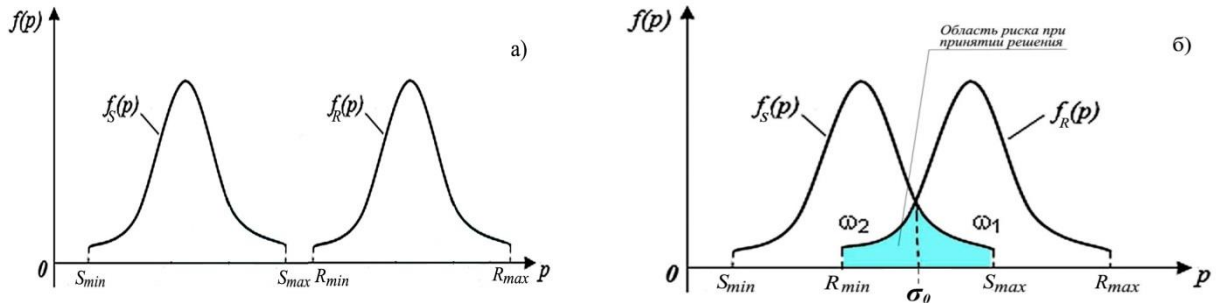
Режим нагружения	Коэффициент распределения нагрузок - $k_m$	Класс использования									
		$U_0$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_7$	$U_8$	$U_9$
		Максимальное число рабочих циклов									
		$1,6 \times 10^4$	$3,2 \times 10^4$	$6,3 \times 10^4$	$1,25 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$	$5 \times 10^5$	$1 \times 10^6$	$2 \times 10^6$	$4 \times 10^6$	$> 4 \times 10^6$
$q_1$ - легкий	0,125			$1,25 \times 10^{-4}$	$0,63 \times 10^{-4}$	$0,32 \times 10^{-4}$	$0,16 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$	$0,2 \times 10^{-5}$	$< 10^{-6}$
$q_2$ - умеренный	0,250		$1,25 \times 10^{-4}$	$0,63 \times 10^{-4}$	$0,32 \times 10^{-4}$	$0,16 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$	$0,2 \times 10^{-5}$	$10^{-6}$	
$q_3$ - тяжелый	0,500	$1,25 \times 10^{-4}$	$0,63 \times 10^{-4}$	$0,32 \times 10^{-4}$	$0,16 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$	$0,2 \times 10^{-5}$	$10^{-6}$		
$q_4$ - весьма тяжелый	1,000	$0,63 \times 10^{-4}$	$0,32 \times 10^{-4}$	$0,16 \times 10^{-4}$	$0,8 \times 10^{-5}$	$0,5 \times 10^{-5}$	$0,2 \times 10^{-5}$	$10^{-6}$			

Допустимый риск или его вероятностная составляющая для грузоподъемных кранов, как было показано выше, должен определяться и устанавливаться при разработке (проектировании). Если металлическая конструкция правильно спроектирована, изготовлена и эксплуатируется с соблюдением всех требований, теоретически ее надежность можно представить в виде, показанном на рисунке 3 а), где  $f_s(p)$  – плотность распределения напряжений в металлической конструкции крана, а  $f_R(p)$  – расчетная плотность распределения вероятностей ее несущей способности. Для этого случая можно записать:

$$N_{ad} = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} f_R(p) dp = 1, \quad (7)$$

что означает абсолютную надежность металлической конструкции и вероятность ее разрушения  $Q = 0$ . Однако, на практике наиболее реальным оказывается случай, представленный на рисунке 3 б), означающий, что плотности распределения  $f_s(p)$  и  $f_R(p)$  имеют некоторые общие зоны, обозначенные, соответственно  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$\omega_1 = 1 - \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} f_S(p) dp, \text{ и } \omega_2 = 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} f_R(p) dp. \quad (8)$$



а) когда надежность равна 1

б) когда возникает риск разрушения

Рисунок 3 – Положение плотностей распределения эксплуатационных напряжений и расчетной несущей способности металлоконструкции

Исходя из принципа, что наибольшая возможная или, иначе сказать, предельная нагрузка должна быть меньше или равна наименьшей несущей способности конструкции, применительно к максимальной вероятности разрушения пролетных балок металлоконструкции грузоподъемного крана, для случая, показанного на рисунке 3 б), можно записать в следующем виде:

$$Q_{н\bar{o}} = 1 - (1 - \omega_1) \times (1 - \omega_2) = \omega_1 + \omega_2 - \omega_1 \omega_2 = 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} f_R(p) dp + \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} f_S(p) dp - \left( 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} f_R(p) dp \right) \times \left( \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} f_S(p) dp \right). \quad (9)$$

Что после подстановки выражений:

$$f_S(p) = e^{-\frac{\lambda}{K}(p-\sigma_0)} \text{ и } f_R(p) = \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2}} \quad (10)$$

позволяет получить вероятность разрушения пролетных балок крана, например, при сейсмическом воздействии:

$$Q_{н\bar{o}} = 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2}} dp + \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} e^{-\frac{\lambda}{K}(p-\sigma_0)} dp - \left( 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2}} dp \right) \times \left( \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} e^{-\frac{\lambda}{K}(p-\sigma_0)} dp \right) = \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} \int_{\sigma_0}^{\infty} e^{-\left( \frac{(p-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2} - \frac{\lambda}{K}(p-\sigma_0) \right)} dp, \quad (11)$$

где  $\sigma_0$  – напряжения в элементе конструкции при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) от собственного веса металлоконструкции крана и груза,  $\lambda = 9,2$  – интенсивность возникновения максимального расчетного землетрясения (МРЗ) – параметр экспоненциального распределения,  $m_R$  –

математическое ожидание предела текучести материала металлоконструкции,  $\sigma_R$  – среднее квадратическое отклонение предела текучести,  $K$  – параметр численно равный напряжению в поясе пролётной балки при МРЗ,  $p$  – параметр функции распределения (текущие напряжения в элементе конструкции).

Следует отметить, что интегрирование ведется от нижнего предела  $\sigma_0$ , хотя нормальное распределение начинается от  $-\infty$  что, как бы противоречит объективности применения выбранного распределения. Однако на результат интегрирования это практически не влияет, поскольку функция интегрирования пренебрежимо мала для всех  $p < \sigma_0$ .

Полученное выражение (11) можно использовать для математического моделирования оценки надежности главных балок мостового крана для ОИАЭ. Схема алгоритма указанного математического моделирования представлена в тексте диссертации.

Отметим, что приведенное выражение (11) можно использовать и в случаях усиления металлоконструкции крана при ремонте, реконструкции или модернизации. В этом случае в нем следует заменить величины параметров –  $K$  и  $\sigma_0$ , которые следует принять по результатам прочностного и сейсмического расчетов отремонтированной (усиленной) металлоконструкции.

Нередко при выполнении работ по модернизации, чтобы обеспечить заданные показатели надежности тормозов механизма подъема, необходимо изменить всю первоначальную компоновку грузовой тележки и установить второй тормоз, например, не на валу электродвигателя, а на реборде канатного барабана. Рассмотрим такой случай более подробно и покажем, как при этом улучшатся показатели надежности. На рисунке 4 а) приведена традиционная схема механизма подъема, использующая установку дополнительного тормоза на валу электродвигателя, а на рисунке 4 б) – схема механизма подъема с дополнительным тормозом, установленным на реборде канатного барабана.

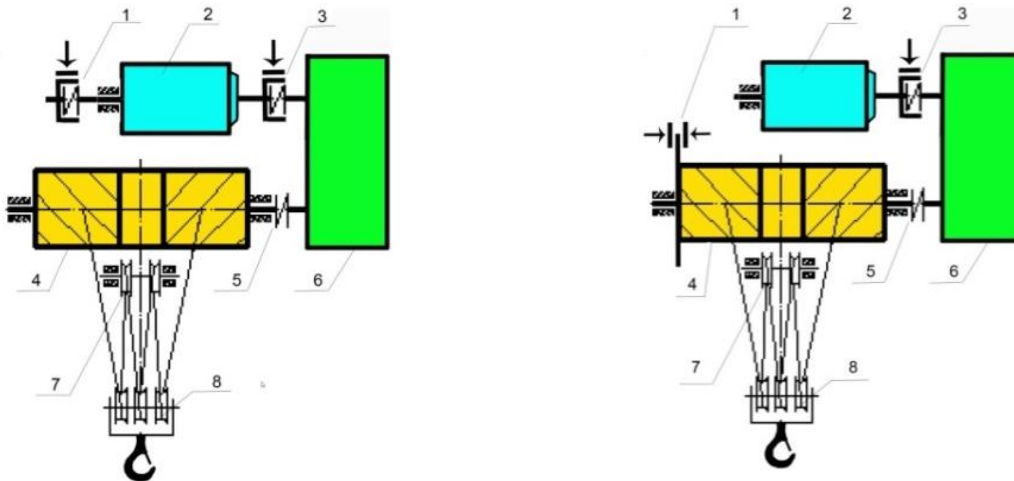
Каждую из приведенных схем механизмов подъема, с точки зрения теории надежности, можно представить в виде последовательно и параллельно соединенных элементов. Самым простым случаем (в расчетном смысле) является последовательное соединение элементов механизма. В таком механизме отказ любого элемента равносителен отказу механизма в целом.

С позиции надежности, такое соединение элементов означает, что отказ механизма, состоящего из этих элементов, происходит при отказе элемента 1 или элемента 2, или элемента 3, или элемента  $n$ . Условие работоспособности можно сформулировать следующим образом: устройство работоспособно, если работоспособны и элемент 1, и элемент 2, и элемент 3, и элемент  $n$ .

Тогда по правилу умножения независимых событий:

$$P = p_1 \times p_2 \times p_3 \times \dots \times p_n, \text{ или } P = \prod_{i=1}^n p_i . \quad (12)$$





а) с использованием дополнительного тормоза, установленного на валу электродвигателя

б) с использованием дополнительного тормоза, установленного на ребре канатного барабана

1 и 3 – основной и дополнительный тормоза; 2 – электродвигатель; 4 – грузовой канатный барабан; 5 – соединительная муфта; 6 – редуктор; 7 – уравнивательные блоки; 8 – крюковая подвеска

Рисунок 4 – Кинематические схемы механизмов подъема

Отсюда, вероятность отказа такого устройства  $Q$  можно определить как вероятность противоположного события:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^n p_i . \quad (13)$$

Для устройства, состоящего из  $n$  – параллельно соединенных элементов, условие работоспособности механизма можно сформулировать следующим образом: механизм работоспособен, если работоспособен элемент 1 или элемент 2, или элемент 3, или элементы 1 и 2, 1; и 3, 2; и 3, 1; и 2; и 3:

$$P = (p_1 + p_2 + \dots + p_n) - (p_1 p_2 + p_1 p_3 + \dots) - (p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 p_n + \dots) - \dots (p_1 p_2 p_3 \dots p_n),$$

$$\text{или } P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i , \quad (14)$$

т.е. при параллельном соединении независимых (в смысле надежности) элементов их вероятности отказов  $q_i = 1 - p_i$ , перемножаются, а отказ всего механизма произойдет лишь в случае, если откажут все его элементы:

$$Q = \prod_{i=1}^n q_i . \quad (15)$$

Учитывая сказанное, выразим вероятности отказа кинематических цепей тормозов механизмов подъема, схемы которых приведены на рисунке 4 а) и б). В схеме механизма подъема, представленной на рисунке 4 а), вероятность отказа кинематической цепи можно рассчитать следующим образом:

$$Q = 1 - [1 - (1 - p_{\text{торм}} \times p_{\text{эл двиг}}) \times q_{\text{торм}}] \times p_{\text{ред}} \times p_{\text{зуб муф}} \times p_{\text{кан бар}}. \quad (16)$$

Для кинематической цепи тормозов механизма подъема, представленного на рисунке 4 б), вероятность отказа кинематической цепи будет определяться несколько иначе:

$$Q = (1 - p_{\text{торм}} \times p_{\text{ред}} \times p_{\text{зуб муфта}} \times p_{\text{кан бар}}) \times q_{\text{торм бар}}. \quad (17)$$

Для получения некоторого количественного сравнения, прежней и модернизированной кинематических цепей, примем допущение, что для всех элементов  $p_i = 0,99$ , а  $q_i = 0,01$ , тогда результатом расчета вероятности отказа тормозов по формуле (16) будет  $Q = 0,02989$ , а по формуле (17) –  $Q = 0,000394$ , то есть существенно (на 2 порядка) ниже! Аналогичный по смыслу результат (схема механизма подъема на рисунке 4 б) надежнее схемы, представленной на рисунке 4 а)), мог бы быть получен и в случае, когда нам заданы конкретные величины  $p_i$  и  $q_i$ , если только элементы обеих схем механизмов, сравниваемых между собой, однотипны.

Приведенные подходы к оценке надежности технических решений ремонта, реконструкций или модернизаций металлоконструкций и механизмов грузоподъемных кранов ОИАЭ позволяют расширить область применения оценок надежности грузоподъемных кранов и применить их до выполнения выбираемого решения в металле.

Методика оценки надежности, изложенная выше, применительно к грузоподъемным кранам ОИАЭ использует данные об уровнях напряжений в металлоконструкциях крана –  $K$  при МРЗ. Тому, как получить эти данные посвящен **Раздел 3** настоящей работы.

В части создания методик к оценке сейсмостойкости кранов известны работы Н.Н. Панасенко, И.И. Абрамовича, С.И. Вугальтера, Д.И. Сегалья, С.А. Соколова, А.С. Липатова и других ученых.

Подход к оценке сейсмостойкости начнем с общего рассмотрения вынужденных колебаний линейной дискретной системы под воздействием сейсмической нагрузки. При использовании затухания по гипотезе Фойгта – Кельвина колебания такой конструкции можно описать системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{F(t)\}, \quad (18)$$

где  $[\mathbf{C}]$  – матрица диссипации энергии, а  $\{F(t)\}$  – вектор нагрузки,  $[\mathbf{M}]$  и  $[\mathbf{K}]$  – соответственно, матрицы масс и жесткостей.

В случае кинематического (сейсмического) возмущения в качестве нагрузки выступают переносные силы инерции и полученное выражение преобразуется к виду:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = -[\mathbf{M}]\{\mathbf{J}_x\}\ddot{X}(t), \quad (19)$$

где  $\{\mathbf{u}\}$  – вектор относительных перемещений (в системе координат, связанной с основанием), а  $\{\mathbf{J}_x\}$  – вектор, компонентами которого являются

косинусы углов между направлениями перемещений по степеням свободы и вектором ускорения.

Когда возмущение (вторая производная от  $X(t)$ ) направлено по одной из глобальных осей, компонентами вектора  $\{\mathbf{J}_x\}$  являются направляющие косинусы соответствующих степеней свободы относительно этой оси.

Если одновременно учесть три компоненты сейсмических ускорений основания

$$\ddot{X}_0(t), \ddot{Y}_0(t) \text{ и } \ddot{Z}_0(t)$$

уравнение (19) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} [\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \\ = -[\mathbf{M}](\{\mathbf{J}_x\}\ddot{X}_0(t) + \{\mathbf{J}_y\}\ddot{Y}_0(t) + \{\mathbf{J}_z\}\ddot{Z}_0(t)). \end{aligned} \quad (20)$$

Поскольку система уравнений линейна, ее решение является суммой решений систем, соответствующих независимому возмущению по каждой из компонент. Ниже будет показано, что характер кривых сейсмических ускорений, позволит еще более упростить процесс расчета, для этого следует обратиться к ГОСТ 30546.1-98 по оценке сейсмостойкости конструкций.

К сожалению, этот ГОСТ носит достаточно общий характер и устанавливает требования одновременно для целого ряда изделий машиностроения, требований по расчету (кроме задания исходных ускорений) в нем нет.

В общем случае сейсмический расчет грузоподъемного крана нами предложено условно разделить на четыре этапа:

1) задание исходных данных грузоподъемного крана (геометрии, характеристик сечений, грузоподъемности, масс элементов металлоконструкции и основного установленного на кране оборудования), задание исходных ускорений механизмов и сейсмических ускорений;

2) определение инерционных сейсмических нагрузок или вызванных ими перемещений элементов металлоконструкции;

3) вычисление внутренних усилий в самой металлоконструкции, ее опорах, и т.д. при сочетании сейсмических и других эксплуатационных нагрузок;

4) оценка сейсмостойкости (прочности, работоспособности и т.д.).

Целью примеров сейсмических расчетов грузоподъемных кранов, выполненных в рамках данной работы, является:

– обоснование методического подхода к инженерной оценке сейсмостойкости крановых металлоконструкций;

– определение частот первых форм колебаний металлоконструкции крана в вертикальном и горизонтальном (вдоль и поперек рельсовых крановых путей) направлениях;

– определение сейсмических нагрузок на кран в вертикальном и горизонтальном (вдоль и поперек рельсовых крановых путей) направлениях;

–получение эквивалентных напряжений в основных элементах металлоконструкции без учета и с учетом воздействия груза;

–определение суммарных опорных реакций под краном от сейсмического воздействия, необходимых для последующей оценки сейсмической прочности строительных конструкций, а также определения возможного отрыва колес крана от рельса во время сейсмического толчка.

Под положительными результатами «оценки «сейсмостойкости» здесь и далее будем понимать исключение падения крана и его частей, падения груза в результате обрыва каната или поломки грузозахвата (крюка), а также исключение возникновения пластических деформаций в несущих (расчетных) элементах металлоконструкции крана, которые могут привести ее в неработоспособное состояние.

Воспользоваться ГОСТ 30546.1-98 можно лишь для определения расчетного ускорения грузоподъемного крана, установленного на различных отметках внутри здания.

Если, например, мостовой кран, грузоподъемностью 5 т, установлен внутри здания на высоте 12 м в сейсмически активном районе, характеризуемом уровнем возможного землетрясения, равного 8 баллам по шкале MSK-64, то расчет металлоконструкции крана такого крана обычно начинают с определения собственных частот свободных колебаний металлоконструкции в трех взаимных плоскостях. При этом делается допущение, что первые формы свободных колебаний металлоконструкции крана подобны деформациям его металлоконструкции под действием инерционных сил, приложенных вертикально или горизонтально (в зависимости от направления расчетного сейсмического ускорения). Используя рекомендации ГОСТ 30546.1-98, номограмма из которого представлена на рисунке 5, можно установить, что на отметке 12 м расчетное ускорение равно  $1,47 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ . Одновременно, из характера ломаных кривых рисунка 5 хорошо видно, что в диапазоне частот от 2 до 9 Гц практически все они имеют горизонтальные участки постоянного ускорения, что дает основание сделать следующий вывод: если основные собственные частоты вертикальных и горизонтальных колебаний металлоконструкций кранов окажутся в данном диапазоне, расчет на сейсмические нагрузки можно выполнять в квазистатическом виде (без использования спектральных методов). Как это будет показано ниже, многочисленные практические примеры определения собственных частот грузоподъемных мостовых кранов лежат именно в этом диапазоне, что существенно упрощает сейсмический анализ данных конструкций.

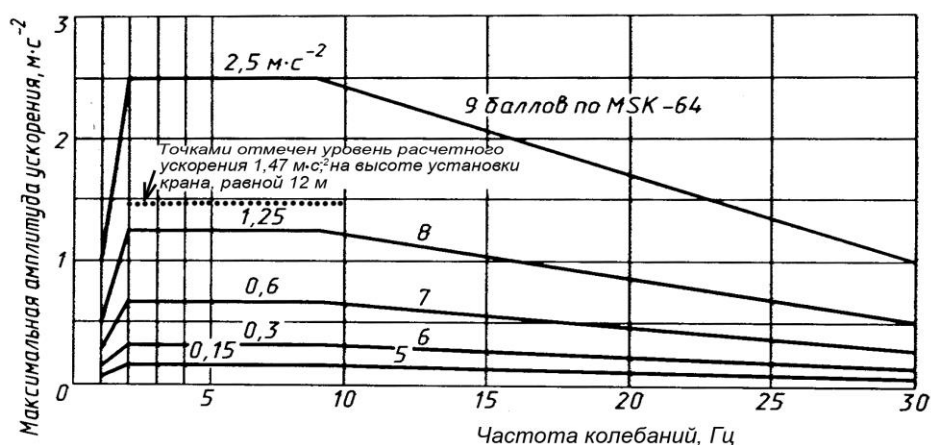
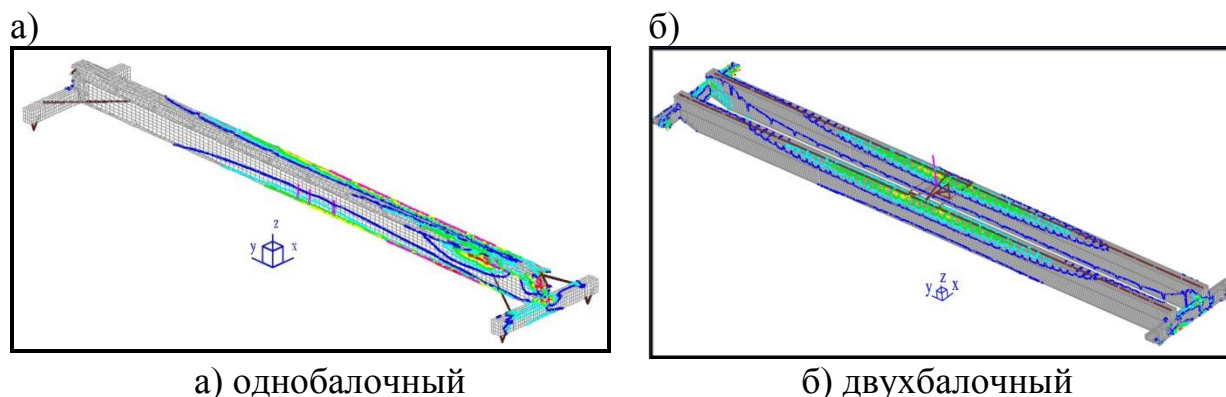


Рисунок 5 – Спектры максимальных амплитуд ускорений для оборудования, установленного на отметке 10 м над уровнем земли

Таким образом, после определения собственных частот и получения подтверждения их соответствия диапазону от 2 до 9 Гц, расчет на сейсмическую прочность металлоконструкции мостового крана сводится к обычному прочностному расчету его металлоконструкции на дополнительные нагрузки от воздействия сейсмических ускорений, полученных по номограммам рисунка 5 для соответствующих высот установки крана в здании. На рисунке 6 приведены расчетные модели металлоконструкций мостовых кранов а) – однобалочного и б) – двухбалочного, используемые в расчетах по МКЭ, и реально полученные картины их напряженно-деформированного состояния.



а) однобалочный

б) двухбалочный

Рисунок 6 – Картины НДС металлоконструкций мостовых кранов при сейсмическом воздействии для положения тележки с грузом в центре пролета

Все последующие расчеты выполнялись с использованием программ прочностного расчета методом конечных элементов (МКЭ): «ИСПА» и COSMOSWorks 2006 S.P.5.0, являющейся приложением системы пространственного моделирования SolidWorks 2006 S.P.0.0, для двух расчетных сочетаний: при положении грузовой тележки (с грузом и без груза) в середине пролета крана. Сила тяжести и равномерно распределенные сейсмические нагрузки, действующие на металлоконструкцию, были приложены во всех узлах расчетной модели.



Изложенный подход был применен к расчету как однобалочных, так и двухбалочных мостовых кранов. Для проведения дальнейшего анализа и установления закономерностей изменения параметров сейсмостойкости кранов, часть полученных оценок представлена в виде графиков на рисунках 7 – 8.

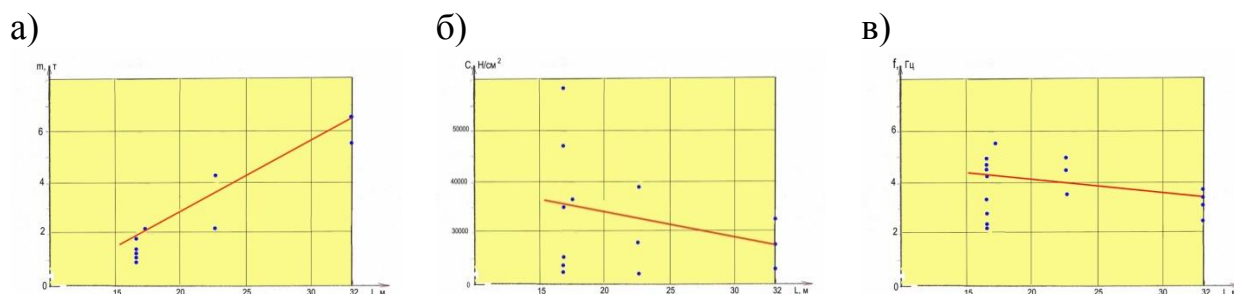


Рисунок 7 – Графики зависимостей: а) массы крана, б) вертикальной жесткости главных балок и в) собственной частоты колебаний металлоконструкции в вертикальной плоскости от пролета крана

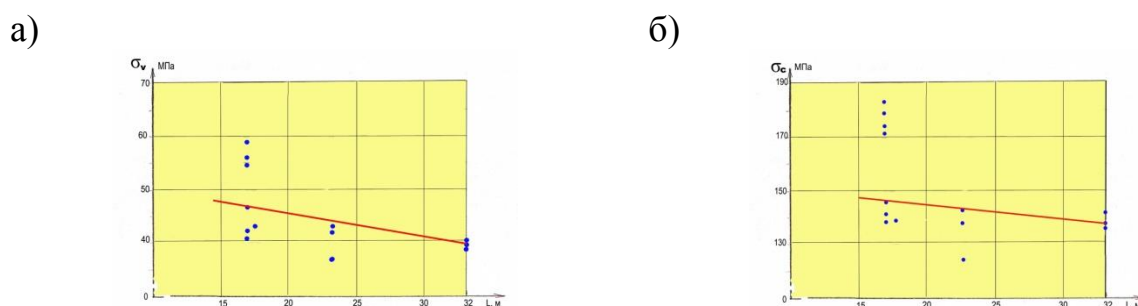


Рисунок 8 – Графики зависимостей: а) вертикальной составляющей напряжений в главных балках крана при сейсмическом воздействии и б) суммарных напряжений в главных балках крана от пролета крана

Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 7 – 8, показывает:

1. Собственные частоты колебаний металлоконструкций всех проанализированных в данной работе кранов (в вертикальной плоскости) лежат в диапазоне от 2,26 до 5,5 Гц, что подтверждает возможность выбирать для расчетов на сейсмостойкость постоянное сейсмическое ускорение, соответствующее горизонтальному участку нужного спектра рис. 5.

2. Из-за более высокой податливости главных балок мостовые двухбалочные краны больших пролетов лучше воспринимают сейсмические ускорения при одинаковых входных воздействиях и, соответственно, напряжения в них, как правило, меньше.

3. Наличие номинального груза на крюке крана увеличивает напряжения от сейсмического воздействия на него практически в 2 раза, по сравнению с сейсмическим воздействием при отсутствии груза на крюке. Это позволяет рекомендовать приводить кран (в случае объявления сейсмической угрозы) в нерабочее состояние без груза.

4. Увеличение нагрузки в канатах механизма подъема крана при сейсмическом воздействии 8 баллов по шкале MSK-64 может быть близко к двукратному. Об этом следует помнить при выборе канатов для кранов сейсмостойкого исполнения.

В конце данной главы приведены результаты сопоставления данных сейсмического расчета, результатов обоснования безопасности и натурных испытаний специального однобалочного крана (рисунок 9) для Смоленской АЭС, изготовленного на ООО «Троицкий крановый завод», которые выполнены при участии автора данной работы. Получены следующие напряжения: – в сопряжениях концевой балки с пролетной – 150 МПа; – в середине пролета эквивалентные напряжения не превышают 50-53 МПа (таль с грузом в середине пролета); – прогиб главной балки  $f$  под действием расчетных нагрузок, достигает 7,6 мм, при допускаемой величине прогиба  $[f] = L / 700 = 11,43$  мм (где  $L = 8000$  – пролет крана, мм).



Рисунок 9 – Статические испытания крана мостового, специального, однобалочного, грузоподъемностью 10 т для ОИАЭ. Удержание краном поднятого груза 12,5 т

Явление подскока при сейсмическом толчке, выявленное при сейсмическом расчете некоторых незагруженных мостовых кранов показало, что при оценке надежности его эксплуатации следует оценить указанное влияние и на существующие методы выбора рельса при конструировании рельсовых крановых путей.

В Разделе 4 проанализированы существующие методы выбора крановых рельсов, а также проведено теоретическое и экспериментальное исследования воздействия продольных и поперечных ударных нагрузок на рельс.

Проведенный анализ показал следующее. Существующие отечественные рекомендации выбора рельса по нагрузке не отражают фактическую интенсивность эксплуатации (группу классификации) крана по стандарту в технологическом процессе, примененному типу крепления рельсов к

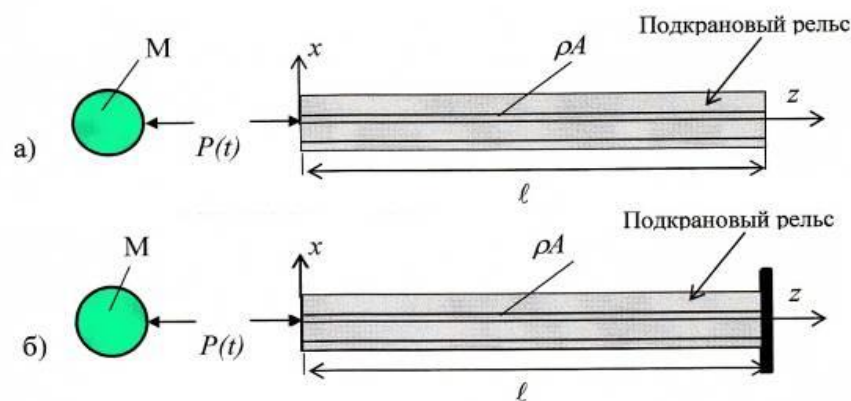
основанию (подкрановым балкам), выбору конструкции соединения стыков рельсов в рельсовую нить и, разумеется, не дают информации о нагружении рельсов для определения допустимой вероятности их возможного разрушения (аварии).

Теоретические исследования воздействия нагрузок на рельс были выполнены в работах М.Х. Ахметзянова, П.М. Белоцерковского, Г.П. Бурчака, И.И. Иванченко, А.Я. Когана, Е.Н. Курбацкого, В.Б. Мещерякова, и других ученых.

Воздействие контактных нагрузок при ударе по рельсу для расчетной схемы, представленной на рисунке 10, может быть описано уравнением следующего вида:

$$P(y, t) = K_0 [y_1(P, t) - y_2(P, t)]^{3/2}, \quad (21)$$

где  $K_0$  – контактная жесткость;  $y_1(P, t) = V_0 t - \frac{1}{M} \int_0^t P(\tau)(t - \tau) d\tau$  – перемещение ударяющего массивного тела массой  $M$ ,  $y_2(P, t)$  – перемещение рельса (балки) в точке соударения;  $V_0$  – начальная скорость соударения тел.



а) свободный правый торец<sup>2</sup>, б) защемленный правый торец  
Рисунок 10 – Расчетные схемы удара по рельсу

Для классической модели запишем дифференциальное уравнение продольного движения при соударении двух тел:

$$\rho A \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 y_2}{\partial z^2} = 0, \quad (22)$$

где  $\rho$  – плотность материала,  $E$  – модуль упругости материала,  $A$  – площадь поперечного сечения,  $z$  – продольная координата поперечного сечения.

Граничные условия запишем следующим образом:

<sup>2</sup> Шарнирные опоры рельса условно не показаны.

$$\text{при } z=0 \quad EA \frac{\partial y}{\partial z}(0,t) = P(t) \text{ – одинаково для схем а) и б).} \quad (23)$$

Приняв для рассматриваемого случая  $l = \infty$ , воспользуемся интегральным преобразованием Лапласа для решения уравнения (22). Получаем такое выражение для перемещения балки на левом торце

$$y_2(0,t) = \frac{1}{\rho A c_0} \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad (24)$$

где  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  – скорость распространения продольных волн.

В результате подстановки выражения (23) в (21) получаем следующее нелинейное интегральное уравнение удара:

$$\left( \frac{P(t)}{K_0} \right)^{2/3} = V_0 t - \frac{1}{M} \int_0^t d\tau \int_0^t P(\tau) d\tau - \frac{1}{\rho A c_0} \int_0^t P(\tau) d\tau. \quad (25)$$

Уравнение (25) может быть решено одним из численных методов. Опуская промежуточные выкладки, приведем несколько решений полученного уравнения (25).

По теории Лява

$$y_2(0,t) = \frac{1}{\rho A v r_0} \int_0^t dt \int_0^t P(\tau) J_0\left(\frac{c}{v r_0}(t-\tau)\right) d\tau, \quad (26)$$

где  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка.

По теории Бишопа

$$y_2(0,t) = \frac{1}{\rho A v r_0} \int_0^t dt \int_0^t P(\tau) J_0\left(\frac{c}{v r_0} \sqrt{1 - \frac{c_1^2}{c^2}}(t-\tau)\right) \exp\left(-\frac{c_1}{v r_0}(t-\tau)\right) d\tau, \quad (27)$$

где  $c_1$  – скорость распространения волн сдвига.

Результаты численного решения полученных уравнений показали, что максимальное значение контактной силы при ударе практически не зависит от учета отраженных волн или от введения экспоненциальных множителей, влияющих на затухание процесса во времени, поэтому при решении задач проектирования, где требуется назначить лишь максимальные проектные нагрузки на рельс и металлоконструкции, можно использовать наиболее простые расчетные модели.

Применительно к рельсовому пути железнодорожных кранов в рамках работы были проведены различные эксперименты по определению ударных нагрузок. Схемы проведения экспериментов и их некоторые результаты приведены ниже на рисунке 11.

Моделирование продольного удара показало, что низкочастотный процесс передачи волны нагрузки по длине рельса достаточно быстро

затухает: уже на расстоянии 3 м от датчика 1 до датчика 2, амплитуды низкочастотной части спектра уменьшились в 3 и более раз. Это говорит о том, что опоры рельса, из-за наличия трения подошвы рельса о шпалы, являются фильтром в передаче низкочастотных составляющих нагрузки и эффект продольного удара будет несущественен в нескольких метрах от стыка рельса.

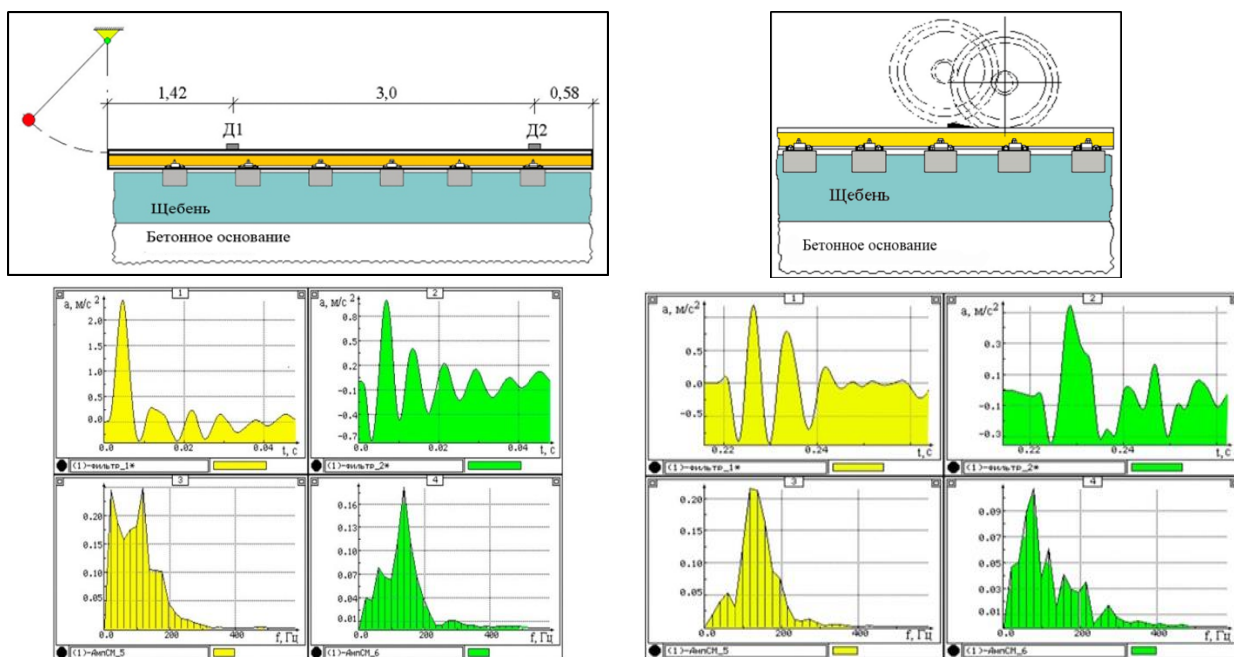


Рисунок 11 – Схемы стендов для исследования явлений продольного удара сосредоточенной массы и поперечного удара по рельсу при сбросе колесной пары. Ускорения в рельсе и спектры частот при продольном и поперечном ударах

Моделирование поперечного удара показало, что пиковые значения амплитуд спектров ускорений каждого из двух датчиков лежат примерно в одинаковом диапазоне высоких частот (около 100...120 Гц), поскольку датчики ускорения были установлены симметрично к месту удара. Амплитуды спектров ускорений на датчиках отличаются примерно в 2 раза. Низкочастотные составляющие спектров составляют не более 20% максимальных значений.

Экспериментальное исследование нагрузок на рельс от поврежденного ходового колеса, применительно к железнодорожным кранам, было проведено в Московском метрополитене. Вид модели повреждения колеса и фрагменты записанных осциллограмм приведены на рисунке 12.

Результаты экспериментов показали: форма графиков практически идентична во времени и отличие лишь в небольшом уменьшении амплитуды ускорения, зафиксированной вторым датчиком.

Это можно объяснить небольшим расстоянием между датчиками и невысоким демпфированием возмущающего сигнала самим рельсом в вертикальной плоскости. По максимальным амплитудам можно оценить



коэффициенты динамичности на скорости, несколько превышающей максимальную скорость движения грузоподъемных кранов и приближенно установить, что указанный коэффициент динамичности можно принимать около 1,2.

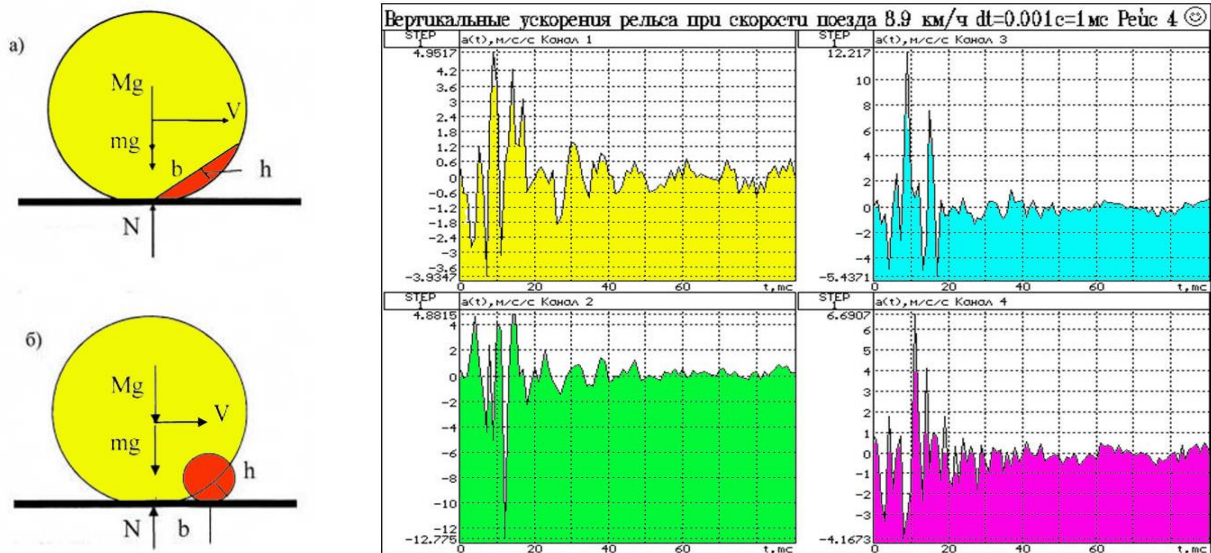


Рисунок 12 – Колесо с повреждениями «ползун» – а) и «навар» – б) и акселерограммы, полученные в ходе эксперимента в депо «Сокол» Московского метрополитена

По результатам обзора литературы, полученным решениям уравнений удара и моделирования воздействия ударных нагрузок на рельс, были разработаны рекомендации, основные из которых приведены ниже:

1. Выбор типа и марки рельса для надземных рельсовых путей опорных кранов в зависимости от максимальной расчетной нагрузки от ходового колеса крана следует выполнять согласно указаниям таблицы 5.

2. Коэффициент надежности по нагрузке для нагрузок от кранов следует принимать равным  $\gamma_f = 1,2$  для всех групп классификации (режимов работы).

3. При проверке местной устойчивости стенок подкрановых балок надземного рельсового пути значение коэффициента надежности по нагрузке следует принимать равным 1,2.

Таблица 5 – Выбор кранового рельса для надземного рельсового пути в зависимости от нагрузки

Расчетная нагрузка от ходового колеса крана на рельс, кН	Тип рельса
До 50 вкл.	Р43 по ГОСТ 7173 или стальной квадрат 50×50 мм по ГОСТ 2591
Св. 50 до 300 вкл.	Р43 по ГОСТ 7173 или КР70 по ГОСТ 4121
Св. 300 до 400 вкл.	Р50 по ГОСТ Р 51685 или КР70 по ГОСТ 4121
Св. 400 до 500 вкл.	Р65 по ГОСТ Р 51685, КР80 или КР100 по ГОСТ 4121
Св. 500 до 800 вкл.	Р75 по ГОСТ Р 51685, КР100 или КР120 по ГОСТ 4121
Св. 800 до 1000 вкл.	КР120 по ГОСТ 4121
Св. 1000	КР140 по ГОСТ 4121

### Заключение

На основании всего вышеизложенного, по данной работе можно сделать следующие выводы:

1. Продолжено развитие и совершенствование метода контроля поврежденных элементов металлических конструкций с применением магнитных структуроскопов (коэрцитиметров), позволяющего оценить границы зоны «пораженного» металла (металла, механические свойства которого существенно ниже использованных при проектировании и изготовлении металлоконструкций) для правильного выбора концепции ремонта.

2. Разработан общий алгоритм технического диагностирования металлических конструкций, который использован при диагностике грузоподъемного оборудования специального назначения и доведен до практического внедрения в ряде нормативных документов.

3. Обоснован подход к назначению максимально допустимых значений вероятностей аварий металлоконструкций грузоподъемных кранов общего назначения, который можно использовать в практических расчетах при разработке обоснования безопасности грузоподъемных кранов, согласно требованиям Технического регламента Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» - ТР ТС 010/2011.

4. Предложена методика по определению допустимых значений вероятностей аварий, связанных с отказами элементов механизмов подъема грузоподъемных кранов, а также примеры расчета надежности механизма после ремонта, реконструкции или модернизации.

5. Обоснован инженерный подход к оценке сейсмостойкости мостовых грузоподъемных кранов, учитывающий рекомендации нормативных документов по сейсмическим расчетам указанного оборудования, а также

расчетам их металлоконструкций.

6. Проанализированы примеры определения напряженного состояния ряда однобалочных и двухбалочных мостовых кранов различной грузоподъемности и пролетов, установленных в зданиях сейсмически активной зоны с уровнем возможного землетрясения, равным до 8 баллов по шкале MSK-64.

7. Показано, что при оценке сейсмостойкости конструкции грузоподъемного крана следует оценивать не только возможную текучесть элементов металлоконструкции груженого крана, но и усилия смещения (или отрыва) колес незагруженного крана от рельсового пути в момент сейсмического толчка.

8. Обоснованы некоторые рекомендации по расчету и конструированию мостовых двухбалочных кранов сейсмостойкого исполнения.

9. Уточненный метод сейсмического расчета и документ «Обоснование безопасности», регламентируемый Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии НП 043-11, внедрены на этапах проектирования 10 т специального мостового подвесного крана, изготовленного ООО «Троицкий крановый завод» для Смоленской АЭС.

10. На основании проведенных лабораторных и натурных испытаний влияния воздействия ударной нагрузки на рельс уточнены коэффициенты динамичности воздействия от дефектных ходовых колес, которые использованы автором при написании проекта ГОСТ Р «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия» Проект национального стандарта Российской Федерации, разработанного на основании Программы национальной стандартизации на 2014-2015 г.г. по ТК-289. Шифр по ПНС 1.2.289-2.005.14.

11. Результаты выполненной диссертационной работы внедрены в ряде нормативных документов и реальных конструкций грузоподъемного оборудования (письма и акты внедрения приведены в Приложении В к настоящей диссертации).

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

**Публикации в изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Минобрнауки Российской Федерации:**

1. Липатов, А.С. Об оценке остаточного ресурса и концепции ремонтов грузоподъемных кранов [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова // Тяжелое машиностроение. – М. – 2006. – №1. – С. 24-25.
2. Липатов, А.С. О подходе к экспертизе промышленной безопасности и оценке качества кранового рельсового пути [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова, // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2007. – №5. – С. 34-38.
3. Емельянова, Г.А. О подходе к подтверждению соответствия при проведении экспертизы и испытаний грузоподъемных кранов [Текст] / Г.А. Емельянова,

- А.С. Липатов // Ремонт, восстановление, модернизация. – М. – 2008. – №6. – С. 2-5.
4. Емельянова, Г.А. Об оценке погрешности установки ходовых колес мостовых кранов [Текст] / Г.А. Емельянова // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2009. – №4. – С. 28-32.
  5. Липатов, А.С. О подходе к расчету мостовых кранов на сейсмостойкость [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2013. – № 5. – С. 42-46.
  6. Емельянова, Г.А. О ресурсе, регистраторах параметров и оценке соответствия подъемных сооружений [Текст] / Г.А. Емельянова, А.С. Липатов, Г.В. Плотников // Безопасность труда в промышленности. – М. – 2013. – № 6. – С. 50-53.
  7. Липатов, А.С. Об оценке сейсмостойкости мостовых кранов [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова // Механизация строительства – М. – 2013. – № 6. – С. 8-12.
  8. Липатов, А.С. Методические основы разработки документа по обоснованию надежности грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова, В.С. Обломей // Безопасность труда в промышленности – М. – 2014. – № 3. – С. 22-28.
  9. Липатов, А.С. О требованиях обеспечения безопасности при эксплуатации кранов на надземных рельсовых путях [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова, В.С. Обломей // Механизация строительства. – М. – 2014. – №5. – С. 7-10.
  10. Емельянова, Г.А. Об учете ненормируемых условий эксплуатации при назначении показателей риска грузоподъемных кранов [Текст] / Г.А. Емельянова, А.С. Липатов // Механизация строительства. – М. – 2014. – № 5. – С. 60-64.
  11. Липатов, А.С. О критериях оценки безопасной эксплуатации мостового крана на рельсовом пути и необходимых условиях обеспечения показателя безопасности рельсов [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова, В.С. Обломей // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2014. – № 6. – С. 23-26.
  12. Липатов, А.С. О максимально допустимых значениях вероятностей аварий при разработке обоснования безопасности грузоподъемных кранов общего назначения [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2014. – № 11. – С. 20-24.
  13. Липатов, А.С. Разработка документа по обоснованию надежности после ремонта, реконструкции или модернизации грузоподъемных кранов, эксплуатируемых на объектах использования атомной энергии [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова, В.С. Обломей // Безопасность труда в промышленности. – М. – 2015. – № 1. – С. 32-36.
  14. Емельянова, Г.А. Сейсмостойкий мостовой подвесной кран для объекта использования атомной энергии [Текст] / В.И. Савельев, О.И. Иванова, А.И. Жуйков, Г.А. Емельянова, В.С. Обломей // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2015. – № 6. – С. 27-30.

15. Липатов, А.С. Анализ сейсмостойкости мостовых кранов, эксплуатируемых на объекте использования атомной энергии [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова // Механизация строительства. – М. – 2015. – № 6. – С. 11-15.
16. Липатов, А.С. Основные предпосылки обоснования надежности грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова // Механизация строительства. – М. – 2015. – № 6. – С. 43-45.
17. Емельянова, Г.А. О фактической загрузке грузоподъемных кранов объектов использования атомной энергии, необходимой для оценки их надежности и безопасности [Текст] / Г.А. Емельянова, А.С. Липатов, В.С. Обломей // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2015. – № 7. – С. 40-44.
18. Липатов, А.С. Анализ конструктивных особенностей антисейсмических устройств, применяемых на мостовых кранах [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2016. – № 1. – С. 9-12.

### **Монография**

1. Емельянова, Г.А. Оценка надежности и риска грузоподъемных кранов на рельсовом ходу. [Текст] / Г.А. Емельянова, А.С. Липатов // – М. – ООО «Аналитик». – 2014. – 203 с.

### **Публикации в других научных изданиях**

1. Мещеряков, В.Б. О возможности уточнения уровня изгибных напряжений в рельсах при ударах колесных пар с ползунами [Текст] / Г.А. Емельянова, В.Б. Мещеряков, В.И. Исаев // Вестник ВНИИЖТа. – М. – 1994. – №4. – С. 16-19.
2. Мещеряков, В.Б. Напряженное состояние рельсового пути при ударе колесной пары с ползунами [Текст] / Г.А. Емельянова, В.Б. Мещеряков, В.И. Исаев // Математические методы и задачи функционирования ж.д. транспорта. Межвузовский сборник научных трудов. РГОТУПС. – Ростов-на Дону. – 1995. – С. 95-98.
3. Мещеряков, В.Б. Анализ случаев повторных соударений с рельсовым путем колесных пар, имеющих дефекты [Текст] / Г.А. Емельянова, В.Б. Мещеряков, Е.И. Кравцева // Вестник МИИТа. – М. – МИИТ. – 1998. – №1. – С. 19-22.
4. Емельянова, Г.А. Экспериментальное исследование ускорений в рельсовом пути при продольных и поперечных ударах [Текст] / Г.А. Емельянова, Кузнецов, А.В., Титов, А.Ю. // Вестник МИИТа. – М. – МИИТ. – 2000. – №3. – С. 72-76.
5. Курбацкий, Е.Н. Экспериментальное определение виброзащитных свойств верхнего строения пути в натуральных и лабораторных условиях [Текст] / Г.А. Емельянова, Е.Н. Курбацкий, Е.И. Мелешонков, Г.А. Рысаков // Вестник МИИТа. – М. – МИИТ. – 2000. – №4. – С. 73-80.
6. Мещеряков, В.Б. Продольный эксцентричный удар по балке на упругом основании [Текст] / Г.А. Емельянова, В.Б. Мещеряков // Вестник МИИТа. – М. – МИИТ. – 2001. – №5. – С. 55-58.

7. Курбацкий, Е.Н. Эффективность виброзащитной конструкции железнодорожного пути в тоннеле под площадью имени Ю.А. Гагарина [Текст] / Г.А. Емельянова, Е.Н. Курбацкий, Е.И. Мелешонков, Г.А. Рысаков, Титов, Е.Ю. // Вестник МИИТа. – М. – МИИТ. – 2004. – №11. – С.72-76.
8. Емельянова, Г.А. Снижение концентраторов напряжений при изготовлении ферменных конструкций [Текст] / Г.А. Емельянова // Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела» – М. – МИИТ – 2006. – С. 112-117.
9. Емельянова, Г.А. Особенности подтверждения соответствия при проведении экспертизы испытаний грузоподъемных кранов [Текст] / Г.А. Емельянова, А.С. Липатов // Сборник докладов и сообщений Уральского подъемно-транспортного Конгресса. – Екатеринбург. – 2008. – С. 49-54.
10. Емельянова, Г.А. О необходимости совершенствования процедуры испытаний грузоподъемных кранов стрелового типа. [Текст] / Г.А. Емельянова // Сборник докладов и сообщений Второго международного Уральского подъемно-транспортного Конгресса «ПТМ-Урал». – ЗАО «УЭЦ». – Екатеринбург. – 2009. – С. 134-139.
11. Емельянова, Г.А. О трактовке некоторых терминов, принятых в нормативных документах по краностроению [Текст] / Г.А. Емельянова, А.С. Липатов // РСП-Эксперт. – Екатеринбург. – 2010. – № 5(13). – С. 27-29.
12. Емельянова, Г.А. О погрешности установки крановых ходовых колес [Текст] / Г.А. Емельянова // Сборник МАНЭБ. – В. Новгород. – 2011. – С. 213-222.
13. Емельянова, Г.А. Подтверждение соответствия при экспертизе и испытаниях грузоподъемных кранов [Текст] / Г.А. Емельянова, А.С. Липатов // Сборник МАНЭБ. – В. Новгород. – 2011. – С. 286-291.
14. Емельянова, Г.А. Мостовые краны: состояние развития и перспективы [Текст] / Г.А. Емельянова, А.С. Липатов // Сборник докладов и сообщений V Уральского Конгресса подъемно-транспортного оборудования «ПТМ-Урал». – ЗАО «УЭЦ». – Екатеринбург. – 2012. – С. 33-43.
15. Емельянова, Г.А. «Вписаться» в отклонения [Текст] / Г.А. Емельянова // Технадзор. – Екатеринбург. – 2013. – № 12. – С. 64-66.
16. Емельянова, Г.А. Об обеспечении общей устойчивости стреловых самоходных кранов в эксплуатации [Текст] / Г.А. Емельянова // Сборник статей МАРХИ. Материалы международной научно-практической конференции «Наука, образование и экспериментальное проектирование. – М. – 2014 г. – С. 243-246.
17. Emelianova, G.A. Sulla validita della sicurezza delle attrezzature di sollevamento, fornita zona unione doganale / G.A. Emelianova, A.S. Lipatov // “Italian Science Review”. – Milano, Italia.– 2014. – № 7(16) July.– p 258-261. – <http://www.ias-journal.org>





Емельянова Галина Александровна

МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ  
ТРЕБУЕМЫХ КРИТЕРИЕВ РИСКА

Специальность 05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и  
детали машин

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

---

Подписано в печать

Заказ №

Формат 60x90/16

Тираж 100 экз.

Усл.– печ. л. – 2,0

---

УПЦ ГИ МГУПС (МИИТ)127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.