

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет путей сообщения  
Императора Николая II»  
МГУПС (МИИТ)

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

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Ковальский Виктор Федорович

Москва – 2016

## Оглавление

|                                                                                                                                                         |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>                                                                                                                                   | <b>6</b>      |
| <br><b>1      АНАЛИЗ МЕТОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ<br/>ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ, НАДЕЖНОСТИ И РИСКА<br/>ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....</b>          | <br><b>22</b> |
| 1.1    Исторические аспекты развития отечественных методик по экспертизе<br>и техническому диагностированию грузоподъемных кранов .....                 | 23            |
| 1.2    Научные положения и практический опыт, положенные в основу<br>нормативных документов серии РД 10 – 112 и РД 10-138 .....                         | 30            |
| 1.2.1    Принятие дополнительных терминов и определений .....                                                                                           | 30            |
| 1.2.2    Обоснование допустимых критериев перехода грузоподъемного<br>крана в неработоспособное состояние.....                                          | 33            |
| 1.3    Критерии работоспособности и перехода в неработоспособное<br>состояние подкрановых рельсов.....                                                  | 43            |
| 1.3.1    Классификация дефектов и повреждений рельсов. Состояние<br>вопроса .....                                                                       | 43            |
| 1.3.2    Определение дефекта рельса для рельсового пути грузоподъемных<br>кранов. Признаки недопустимых дефектов и повреждений рельсов. ....            | 53            |
| 1.3.3    Статистические характеристики неровностей рельсового пути.<br>Допуски на отклонения рельсового пути кранов от проектного положения .....       | 57            |
| 1.4    Анализ конструкций специальных кранов, для которых нужны<br>дополнительные критерии оценки их состояния работоспособности в<br>эксплуатации..... | 63            |
| 1.5    Техническое диагностирование металлоконструкций грузоподъемных<br>машин специального назначения. Состояние вопроса.....                          | 67            |

|                                                                                                                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.6 Развитие области применения магнитных методов технического диагностирования.....                                                                                                           | 71         |
| 1.6.1 Магнитный контроль состояния элементов металлических конструкций с применением структуроскопов (коэрцитиметров) .....                                                                    | 72         |
| 1.6.2 Совершенствование методических основ контроля состояния элементов металлических конструкций с применением структуроскопов (коэрцитиметров). .....                                        | 81         |
| 1.6.3 Методика технического диагностирования металлических конструкций и ее использование при диагностике металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения ..... | 90         |
| 1.7 Выводы по разделу 1 .....                                                                                                                                                                  | 98         |
| <br><b>2 ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И РИСКА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА.....</b>                                                                                     | <b>100</b> |
| 2.1 Основные предпосылки, учитываемые при оценке надежности и риска .....                                                                                                                      | 100        |
| 2.2 Оценка состояния грузоподъемного оборудования через возможный риск возникновения аварии.....                                                                                               | 117        |
| 2.3 Обоснование величин контрольных показателей надежности грузоподъемных кранов.....                                                                                                          | 122        |
| 2.4 Методические основы оценки надежности и риска на примере грузоподъемного крана (и механизмов крана) для объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) .....                                 | 131        |
| 2.5 Математическое моделирование оценки надежности и риска на примере мостового крана для объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) ....                                                    | 144        |

|     |                                                                                                                                                                     |     |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6 | Обоснование надежности после ремонта, реконструкции или модернизации грузоподъемных кранов, эксплуатирующихся на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ)..... | 156 |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|     |                          |     |
|-----|--------------------------|-----|
| 2.7 | Выводы по разделу 2..... | 163 |
|-----|--------------------------|-----|

### **3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ..... 165**

|     |                                                                                                                                                 |     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1 | Анализ свободных и вынужденных колебаний металлоконструкций мостового крана, как дискретной системы с разным количеством степеней свободы ..... | 167 |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|     |                                                                              |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2 | Методика расчета металлоконструкций мостовых кранов на сейсмостойкость ..... | 169 |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|-----|

|     |                                                                                                                             |     |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3 | Сравнительный анализ результатов оценки сейсмической прочности металлоконструкций ранее изготовленных мостовых кранов ..... | 182 |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|     |                                                                                                 |     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4 | Анализ сейсмической прочности конструкции нового крана, разработанного для смоленской АЭС ..... | 191 |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|     |                          |     |
|-----|--------------------------|-----|
| 3.5 | Выводы по разделу 3..... | 201 |
|-----|--------------------------|-----|

### **4 ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ РЕЛЬСА В УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ НАГРУЗКАМИ..... 202**

|     |                                              |     |
|-----|----------------------------------------------|-----|
| 4.1 | Выбор рельса для грузоподъемных кранов ..... | 202 |
|-----|----------------------------------------------|-----|

|     |                                                                                          |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2 | Обзор исследований по воздействию нагрузок на рельс и распространению их по рельсу ..... | 207 |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|     |                                                                                    |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3 | Анализ моделей распространения ударных волн вдоль рельсов и подкрановых балок..... | 210 |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4 Экспериментальное исследование удара по рельсу в лабораторных условиях .....                                               | 220        |
| 4.4.1 Продольный эксцентричный удар по рельсу на упругом основании применительно к рельсовому пути железнодорожных кранов..... | 220        |
| 4.4.2 Поперечный удар по рельсу (балке) на упругом основании применительно к рельсовому пути железнодорожных кранов.....       | 223        |
| 4.4.3 Поперечный удар по рельсу ходового колеса с дефектом на дорожке качения .....                                            | 225        |
| 4.4.4 Определение коэффициента внутреннего трения конструкции рельсового пути по данным эксперимента.....                      | 229        |
| 4.4.5 Измерение ускорений при ударном нагружении рельсового пути Московского метрополитена .....                               | 231        |
| 4.5 Обоснование нагрузок от кранов на надземный рельсовый путь и строительные конструкции .....                                | 235        |
| 4.6 Выводы по разделу 4.....                                                                                                   | 240        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>                                                                                                        | <b>242</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>                                                                                                 | <b>244</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>                                                                                                       | <b>264</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....</b>                                                                                                      | <b>270</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>                                                                                                       | <b>277</b> |

## ВВЕДЕНИЕ

**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) [177].

С момента утверждения указанного Технического регламента [177] потребовался целый год на изучение его требований и подготовку производства продукции, которая соответствовала бы этим требованиям. Однако, по мнению участников Таможенного союза, этого оказалось недостаточно.

С целью планомерного перевода производства на новые требования, Комиссией Таможенного союза предусмотрены дополнительные переходные периоды.

В частности, до 15 марта 2015 года разрешался выпуск в обращение продукции, изготовленной в соответствии с ранее принятыми национальными нормативно-правовыми актами, при наличии сертификатов продукции, выданных до вступления в силу технических регламентов. Оборот данной продукции допускается в течение всего срока действия разрешительных документов.

Однако, для продукции общего и специального машиностроения, в частности, грузоподъемных кранов различных типов, этого оказалось недостаточно. Для грузоподъемных кранов объектов использования атомной энергии (сокращенно ОИАЭ), на которые не распространяется [177], Ростехнадзором утверждены и введены в действие 16 августа 2013 г. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии» [134], а для остальных типов грузоподъемных кранов (в части монтажа, ремонта, реконструкции,

модернизации в процессе их эксплуатации) Федеральные нормы и правила 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) [184].

С момента вступления документов в силу запрещается подтверждение соответствия ранее действующим нормам национального законодательства стран участниц Таможенного союза.

Подтверждение соответствия грузоподъемных кранов, согласно требованиям [177], осуществляется в виде декларирования о соответствии, либо оформления сертификата соответствия Техническому регламенту [177], который выдается по Единым формам, утвержденным Решением Коллегии ЕЭК № 293 от 25 декабря 2012 года, если иное не предусмотрено действующим законодательством. Для грузоподъемных кранов, требованиями п. 260 [184], в следующих ниже перечисленных случаях, следует выполнять экспертизу промышленной безопасности:

- а) до начала применения на опасном производственном объекте грузоподъемных кранов, изготовленных для собственных нужд;
- б) по истечении срока службы или превышении количества циклов нагрузки грузоподъемного крана, установленных производителем;
- в) при отсутствии в технической документации данных о сроке службы грузоподъемного крана, если фактический срок его службы превышает 20 лет;
- г) после проведения работ, связанных с изменением конструкции, заменой материала несущих элементов грузоподъемного крана, либо восстановительного ремонта после аварии или инцидента на опасном производственном объекте, в результате которых был поврежден грузоподъемный кран.

Попробуем проанализировать сложившуюся ситуацию с подтверждением соответствия на примере грузоподъемных кранов, о которых сказано в работах [46, 47, 52, 88, 89].

Как отмечено в работе [89], Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 марта 2001 г., № 241 установлено, что «...продление срока

безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений, эксплуатируемых на опасных производственных объектах (определение остаточного ресурса) на территории Российской Федерации, осуществляется в порядке, определяемом Федеральным горным и промышленным надзором России».

С этого момента различными организациями стали разрабатываться методы оценки остаточного ресурса грузоподъемных кранов и талей на рельсовом ходу. Каждый из предложенных методов обладал своими достоинствами и недостатками, а их ограниченная апробация не позволяла конкретно рекомендовать какой-либо один из них для последующего практического применения.

Несмотря на это, в стране в массовом порядке изготавливаются специальные приборы – регистраторы параметров (сокращенно – РП), показания которых должны были стать источником информации о фактической наработке грузоподъемных кранов. Однако, в каком объеме и каким образом необходимо фиксировать наработку в РП, а также как ее использовать для последующей оценки ресурса многих типов грузоподъемных кранов неясно до сих пор.

Известно, что наиболее распространенный алгоритм оценки наработки грузоподъемных кранов с помощью РП включает подсчет так называемого «характеристического числа» – безразмерной величины, определяемой как произведение числа рабочих циклов, выполняемых грузоподъемным краном, на коэффициент распределения масс поднятых грузов [144]. Зарегистрировав РП за известный промежуток времени величину фактического «характеристического числа», ее начинают сравнивать с некоей «нормативной величиной», подсчитанной по предельным значениям коэффициента нагружения –  $K_p$  и класса использования –  $U$ , той группы классификации (режима) по международному стандарту [106], которой соответствует данный кран и которая указана в его паспорте.

Однако, такой широко применяемый подход не может считаться корректным,

по следующим причинам:

1. В Российской Федерации, да и в Таможенном союзе отсутствует нормативный документ, устанавливающий общие требования к номенклатуре грузоподъемных кранов (и других ПС), которые обязательно следует оснащать регистраторами параметров.

2. Нет государственного стандарта и с требованиями о том, какие параметры следует регистрировать при работе грузоподъемного крана, как часто следует выполнять считывание данных, а при необходимости – их обновление и корректировку.

Как отмечено выше, пока большинство алгоритмов РП фиксируют «характеристическое число», сравнивая его с «нормативной величиной», рассчитанной по предельным значениям  $K_p$  и  $U$  [106], однако это не всегда является корректным, поскольку указанный стандарт предназначен в качестве «...аппарата установления рациональной основы проектирования конструкций и механизмов, и основы взаимоотношений между потребителем и изготовителем», поскольку введенная «...классификация позволит покупателю и изготовителю крана прийти к соглашению о режиме работы данного крана. Таким образом, она является договорным и техническим справочным материалом».

Указанное говорит о том, что применение стандарта [106] вне проектирования конструкции и механизмов крана законодательно не соответствует назначению стандарта.

3. Как учитывать предыдущую наработку крана и выполненные на нем ремонты?

На этот счет ни изготовители РП, ни существующие стандарты ответов не дают. Например, форма паспорта крана, приведенная в [150] и не вошедшая в качестве нормативной ссылки в [177], предусматривает указание в нем значения «ресурса до первого капитального ремонта» для последующего достижения нормативного срока службы. Однако на практике этот показатель не закладывается в алгоритм контроля регистратора параметров! Между тем,

«ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние» [144]. Таким образом, чтобы кран отработал ресурс, заложенный в него при проектировании, он должен, как минимум один раз, быть подвергнут капитальному ремонту.

Еще более удручающая картина сложилась с фиксацией предыдущей наработки крана до установки РП, если РП установлен на нем директивно в процессе эксплуатации крана, которая продолжалась до этого в течение нескольких лет. Например, международный стандарт [185] дает на этот счет четкие указания, смысл которых сводится к тому, что неизвестная наработка должна учитываться умножением проектной теоретической наработки (соответствующей паспортной группе классификации крана) на некий увеличивающий коэффициент, например, на 1,2. То есть, за несвоевременную установку РП владелец «платит» искусственно увеличенной наработкой, хотя реально ее могло и не быть. Но такой подход используется законодательно и он известен всем настоящим и будущим владельцам кранов в Европе: экономишь на регистраторе, получаешь на 20 % уменьшенный срок службы до планового ремонта или уменьшение назначенного изготовителем срока службы крана. Выбор – за владельцем.

Конечно, можно дискутировать относительно искусственно увеличиваемого процента наработки, но главное, это требование едино для всех владельцев и с этим никто уже не спорит.

Несколько слов о текущих ремонтах. Если выполнен ремонт, например, с заменой элемента стрелы крана, то опять отечественное законодательство никак не учитывает это по отношению к корректировке алгоритма РП. Наверное, в таком случае, кроме научной оценки такого влияния, должны быть приняты и поправки к действующим нормативным документам по оценке ресурса, учитывающие специфику отечественной эксплуатации.

4. Необходимо ли выполнять регистрацию отдельных параметров (например, ветровой нагрузки) в нерабочем состоянии (во время простоев) грузоподъемного крана? Сегодня это также не заложено в алгоритм подсчета

характеристического числа: обесточен кран – обесточен и его регистратор параметров. Но время от времени краны угоняет ветром. То есть, действительное нагружение для грузоподъемных кранов, установленных на открытом воздухе, в нерабочем состоянии очень часто сравнимо с нагружением от поднимаемого и транспортируемого груза, а нередко – даже превышает его. В связи с этим, ветровую нагрузку для некоторых типов кранов следует учитывать даже в нерабочем состоянии.

5. Что делать с грузоподъемным краном, когда РП укажет на исчерпание ресурса? Казалось бы, надо списать и утилизировать, но и здесь не все так просто. В этом случае приглашают «эксперта» и он (несмотря на показания регистратора параметров) принимает иное, так называемое, «объективное» решение. Правда, и в этом случае нам может помочь зарубежный опыт. Согласно цитируемому выше стандарту [185], регистрировать следует лишь наработку до выполнения очередного капитального ремонта. Когда эта наработка зафиксирована, грузоподъемный кран отправляют на капитальный ремонт. При этом выполняется стандартный набор работ и замен элементов крана (по указанию изготовителя), даже если заменяемые элементы не имеют видимого износа или повреждений. После выполнения такого капитального ремонта, показания РП обнуляются, и начинается новый отсчет наработки крана до следующего капитального ремонта. При таком подходе, в какой-то степени теряет смысл установленный срок службы грузоподъемного крана, поскольку количество последующих капитальных ремонтов не регламентируется. Однако, при этом, регистрация каждой очередной его наработки обретает реально ощутимый смысл: кран отправляют на утилизацию (ликвидацию) не по истечению какого-то календарного срока, а тогда, когда отремонтировать его в очередной раз экономически уже нецелесообразно.

Это обстоятельство чрезвычайно интересно, поскольку при его внедрении в практику полностью утрачивает смысл само понятие «остаточного ресурса», о котором, как о не совсем верном понятии, было ранее упомянуто в работах [54, 89]. Ведь, следует признать, что почти все согласованные Ростехнадзором

действующие методики оценки остаточного ресурса грузоподъемных кранов не учитывают изменений напряженного состояния, связанного с ремонтом (усилением) или заменой отдельных элементов металлоконструкций, а значит – несостоятельны.

6. Еще один дискуссионный вопрос, который связан с применением РП, касается обеспечения их работоспособного состояния. Сегодня, если не работает регистратор, изготовитель крана может совершенно на законном основании обвинить службу эксплуатации владельца «во всех смертных грехах и постоянной транспортировке грузов, выше паспортной грузоподъемности крана». Но давайте вспомним полувековой опыт эксплуатации грузоподъемных кранов, когда обязательная установка ограничителей и регистраторов, согласно стандартам и «Правилам устройства и безопасной эксплуатации кранов» (до 1992 года) не требовалась. Разве краны падали чаще? И сегодня, согласно стандарту [185], отсутствие РП лишь искусственно увеличивает расчетную наработку крана, но не устанавливает обязательных требований к установке регистратора!

Конечно, результаты данного анализа совершенно не призывают отказаться от установки РП вовсе, однако их применение должно быть в высшей степени оправдано и корректно, особенно, когда заведомо неработоспособным РП хотят оправдать плохо спроектированный и изготовленный, аварийный грузоподъемный кран.

7. Приводя требования к грузоподъемному крану, Технический регламент [177] ничего не говорит дополнительно о требованиях к рельсовым крановым путям, на которых эксплуатируются мостовые краны и, уж тем более, о формах подтверждения и оценки их соответствия, поскольку стандарт с требованиями к устройству надземных рельсовых крановых путей в Российской Федерации не разрабатывался.

Еще ряд ключевых вопросов, которые хотелось бы затронуть в этом разделе, связан с подтверждением соответствия, на которое ориентируют сертификационные органы отечественную краностроительную промышленность и службы эксплуатации грузоподъемных кранов, в свете введенного в действие

Технического регламента [177]. 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».

Оба перечня утверждены Решением Комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011г. № 823 и содержат общие стандарты для всех видов продукции (группы А – общетехнические вопросы безопасности и В – групповые вопросы безопасности), отдельно в группу С вынесены вопросы безопасности, касающиеся непосредственно отдельных групп машин. Грузоподъемные краны и электрические тали вошли в две группы: «Оборудование подъемно-транспортное (краны)» и «Тали электрические канатные и цепные».

Для того, чтобы разобраться с директивой технического регламента [177], приведем «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» группы С для грузоподъемных кранов и талей (Таблицы 1, 2).

Таблица 1 – Перечень стандартов, которые необходимо использовать при испытании грузоподъемных кранов для подтверждения их соответствия при проведении сертификации [177]

| Оборудование подъемно-транспортное (краны). Стандарты на испытания |                                 |                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                  | ГОСТ 7075-80                    | Краны мостовые ручные опорные. Технические условия                     |
| 2                                                                  | ГОСТ 7890-93                    | Краны мостовые однобалочные подвесные. Технические условия             |
| 3                                                                  | ГОСТ 13556-91                   | Краны башенные строительные. Общие технические условия                 |
| 4                                                                  | ГОСТ 22045-89                   | Краны мостовые электрические однобалочные опорные. Технические условия |
| 5                                                                  | ГОСТ 22827-85                   | Краны стреловые самоходные общего назначения. Технические условия      |
| 6                                                                  | ГОСТ 27584-88                   | Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия     |
| 7                                                                  | ГОСТ 28433-90                   | Краны-штабелеры стеллажные. Общие технические условия                  |
| 8                                                                  | ГОСТ 28434-90                   | Краны-штабелеры мостовые. Общие технические условия                    |
| 9                                                                  | ГОСТ 31271-2002 (ИСО 4310:1981) | Краны грузоподъемные. Правила и методы испытаний                       |

Таблица 2 – Перечень стандартов, которые необходимо использовать при испытании талей электрических канатных и цепных [177]

| Тали электрические канатные и цепные |               |                                                        |
|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------|
| 10                                   | ГОСТ 22584-96 | Тали электрические канатные. Общие технические условия |
| 11                                   | ГОСТ 28408-89 | Тали ручные и кошки. Общие технические условия         |

Как видно из приведенных перечней (Таблицы 1, 2), они содержат всего 11 стандартов, среди 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, упомянутый выше, будет «всему соответствовать». Интересно еще отметить и абсурдность раздела перечня стандартов таблицы 2 «Тали электрические и цепные». В нем, почему-то приведен ГОСТ 28408-89 «Тали ручные и кошки. Общие технические условия». Стандарт не имеет отношения к электрическим талям, при этом, в приведенном перечне вовсе отсутствует стандарт на «Тали электрические цепные», которые указаны в заголовке, хотя в таблице 1 приведен стандарт Республики Беларусь ГОСТ 31271-2002 (ИСО 4310:1981), в основу которого положен отмененный еще в 2009 стандарт ИСО.

Следует отметить и неисправленную до сих пор опечатку в п. 15 «Перечня объектов технического регулирования, подлежащих подтверждению соответствия требованиям ТР ТС в форме сертификации» – «Оборудование подъемно-транспортное, краны грузоподъемные», вводящую в заблуждение относительно конкретного перечня продукции, относящегося к данному разделу и подлежащей обязательной сертификации. В аналогичном Перечне объектов, подлежащих декларированию, приведен термин «приспособления для грузоподъемных операций», не имеющий аналогов в классификаторах и терминологических стандартах и позволяющий весьма вольную трактовку.

Еще одно важное замечание касается принятой редакции документа [177], 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 методик, позволяющих решать конкретные инженерные задачи данного направления, является одной из общих актуальных задач современного отечественного машиностроения.

**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 [177], в данной работе 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 (грузоподъемного оборудования) 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, то есть характеризовать не экономическую составляющую оценки риска.

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**

Новизна полученных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

- усовершенствован известный 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 [177]. 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 груженого 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 «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. 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 объемом 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.

# **1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ, НАДЕЖНОСТИ И РИСКА ГРУЗОПОДЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Начиная изложение материала, посвященного надежности и риску грузоподъемного оборудования, необходимо договориться, какие отказы (или несоответствия) мы в дальнейшем будем анализировать. И хотя определение понятия «отказа» теперь дано, как в терминологии Технического регламента [177], так и в Федеральных нормах и правилах в области промышленной безопасности [184], на этот счет сегодня все равно нет единого мнения, ибо очень часто любое «повреждение» оборудования трактуется, как «отказ». Однако, эти понятия различны и до утверждения [184] их нередко неверно применяли, составляя «Ведомость дефектов и повреждений» по результатам экспертного обследования и технического диагностирования грузоподъемных кранов, а также при проведении работ по экспертизе промышленной безопасности ПС.

Согласно определениям, приведенным в [184]:

«Повреждение – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта (грузоподъемного крана) в эксплуатации при сохранении работоспособного состояния».

«Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта (грузоподъемного крана)».

Из текста приведенных определений следует, что такие повреждения, как частичное нарушение лакокрасочного покрытия, небольшие остаточные деформации перил, защитных кожухов движущихся элементов механизмов и т.п., не влияют на работоспособное состояние грузоподъемного крана и, при анализе показателей надежности (риска) мы их учитывать не будем.

В противоположность им, такие повреждения, как остаточные деформации расчетных элементов металлоконструкций выше допустимых, трещины, недопустимый износ или поломка зубьев зубчатых передач нами трактуются как «отказы» и принимаются во внимание при анализе показателей надежности

(риска).

В ряде случаев, когда речь идет о вероятностях возникновения отказов, например, вследствие воздействия сейсмического толчка или попытке подъема груза выше расчетной паспортной грузоподъемности крана, используются расчетные методы анализа моделей грузоподъемных кранов.

Прежде чем предложить такие методы анализа, следует коснуться методов обнаружения отказов в эксплуатации, а также критериев недопустимости отдельных видов характерных повреждений, встречающихся на практике.

### **1.1 Исторические аспекты развития отечественных методик по экспертизе и техническому диагностированию грузоподъемных кранов**

Направление науки, связанное с техническим диагностированием грузоподъемных кранов, зародилось в нашей стране еще в середине 70-х годов прошлого столетия. Основоположниками этого направления, по праву следует считать Егора Михайловича Концевого и Бориса Михайловича Розеншейна, работавших в то время во ВНИИПТМАШе [89].

Именно эти специалисты в своей монографии по ремонту крановых металлоконструкций [71] не только впервые предложили классификацию дефектов, но и посвятили целую главу «обследованию и испытанию металлических конструкций кранов».

Сегодня эта книга стала библиографической редкостью. Часть ее положений, в связи с развитием технологий изготовления металлических конструкций и приводов кранов, в чем-то устарели, однако некоторые рекомендации остаются актуальными до сих пор. Например, исследования, проведенные Б.М. Розеншейном, показали, что «при остаточном (отрицательном) прогибе  $f \leq 0,0022L$  (где  $L$  – пролет крана) кран может эксплуатироваться без всяких ограничений. При прогибе  $0,0022L \leq f \leq 0,0035L$  должен быть предусмотрен контроль за развитием остаточного прогиба, а именно проведение нивелировки не реже одного раза в 4 месяца. Остаточный прогиб  $f = 0,0035L$  является предельно

допустимым». Следует отметить, что эти рекомендации продолжают действовать и сегодня, являясь составной частью хорошо известных нормативных документов [112, 122].

Почти одновременно, уже в середине 70-х годов, в нашей стране стало зарождаться направление экспертного обследования металлоконструкций кранов. На базе разработок [71] появились методики ВНИИПТМАШ экспертного обследования металлоконструкций грузоподъемного оборудования.

И если о первом издании методики экспертного обследования кранов сегодня почти ничего не известно, то второе издание, разработанное ВНИИПТМАШем в 1976 году, уже использовалось специалистами ряда других организаций.

Спустя 10 лет, в 1986 году, под руководством А.И. Зерцалова во ВНИИПТМАШе было выпущено 3-е издание «Методических указаний по обследованию металлоконструкций кранов с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации» [112], которое было согласовано Госгортехнадзором 10 апреля 1987, письмом № 28-10/170. Ответственными исполнителями этих «Методических указаний...» были Б.М. Розеншейн и Г.А. Воронцов. Следует отметить, что все «Методические указания по обследованию кранов...», начиная с 3-его издания, обязательно проходили согласование в Госгортехнадзоре, что придавало им (до определенного момента) статус нормативных документов.

4-ое и последующие издания «Методических указаний по обследованию кранов с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации» [122] разрабатывались уже при непосредственном участии бывшего заместителя директора ВНИИПТМАШ по научной работе А.С. Липатова. Согласование 4-го издания с Госгортехнадзором проходило непросто. Вначале первая редакция 4-го издания во многом напоминала 3-ю редакцию «Методических указаний...» и отличалась от нее лишь некоторыми уточнениями. Однако, тогдашний Заместитель начальника Госгортехнадзора, В. М. Зубенко, настоял, чтобы проект документа был дополнен браковочными признаками крановых механизмов.

Таким образом, с 1991 года, решение о продлении срока службы стало обоснованно распространяться не только на металлоконструкцию, но и на кран в

целом.

Интересно отметить, что для полноценного обследования нижних поясов и стенок главных балок мостовых кранов в Приложении 12 к 4-му изданию «Методических указаний...» был приведен чертеж «Люльки для осмотра крановых металлоконструкций», применение которой способствовало повышению качества проведения экспертизы. Остается только сожалеть, что из последующих изданий «Методических указаний...», по указанию согласующих организаций, этот чертеж был изъят.

Пока действовало 4-ое издание «Методических указаний...», ВНИИПТМАШу было предоставлено право проводить аттестацию организаций, занимающихся обследованием кранов мостового типа, с целью продления их сроков службы. Такую аттестацию от ВНИИПТМАШа получили, в первую очередь, специализированные кафедры ВУЗов: МВТУ им. Н.Э. Баумана, Ленинградского политехнического института и др. Продолжалась эта работа в течение нескольких лет, практически до учреждения в середине 90-х годов ОАО «Российская экспертная компания по объектам повышенной опасности» – РосЭК.

Наряду с нормативными документами ВНИИПТМАШ, в 1992 году издательство «Машиностроение» выпустило книгу В.И. Сероштана и др. «Диагностирование грузоподъемных машин» [160], в которой достаточно подробно были представлены рекомендации авторов по применению методов неразрушающего контроля для диагностики состояния металлоконструкций кранов и деталей механизмов. Возможно, именно эта публикация стала отправной точкой обязательного применения неразрушающего контроля, который превратил действующую систему экспертного обследования (когда выводы о продлении срока службы крана выносились на основе внешних браковочных признаков и с учетом мнения эксперта, проводившего экспертизу) в техническое диагностирование (когда окончательное решение о продлении срока службы крана стали выносить, в том числе, с учетом полученных результатов неразрушающего контроля).

Начиная с 1995 года группой специалистов при ОАО «Российская экспертная

компания по объектам повышенной опасности» – РосЭК, в составе А.С. Липатова, Л.А. Невзорова, А.А. Зарецкого, В.С. Котельникова и др. стала разрабатываться серия руководящих документов (РД) по обследованию грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы. Первым таким документом стал [113], который был опубликован в 1996 году. Этот нормативный документ определил общие этапы технического диагностирования для всех типов грузоподъемных кранов, а также определил новые термины технического состояния кранов (работоспособное, неработоспособное), которые ранее не применялись в терминологии действовавших в то время Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов [149]. Еще одним важным нововведением документа [113] стала единая для всех типов кранов форма Акта обследования, которая была предназначена для последующей обработки на ЭВМ. К сожалению, воплотить это в жизнь не хватило ни административных, ни экономических ресурсов: в стране начался затяжной кризис.

После выхода в свет руководящего документа [113], «головные институты» по типам кранов (ВНИИПТМАШ, ВНИИстройдормаш, СКТБ башенного краностроения, ВКТИмонтажстроймеханизация) стали разрабатывать свои РД, ориентированные на конкретные типы кранов. Так появились: [114] (авторы А.А. Зарецкий, Н.П. Суворова и др.), [115] (авторы Л.А. Невзоров, А.И. Инденбаум и др.), [116] (авторы О.В. Леонова, А.С. Липатов, Д.И. Дувидович, В.Г. Гришкин, Н.Я. Розовский, и др.), [117] (авторы А.С. Липатов, Д.И. Дувидович, и др.), [120] (авторы Ю.И. Гудков, и др.). ЗАО «Уральский экспертный центр» был разработан документ [118] (авторы Л.В. Стоцкая, В.Е. Дусье и др.).

Параллельно с методиками серии РД 10-112, ОАО «РосЭК», совместно с ВНИИПТМАШ, разработали серию РД по различным видам неразрушающего контроля: капиллярного, ультразвукового, вихретокового и т.п. [103, 104, 105] (авторы Н.Н. Коновалов, Н.Н. Вадковский, Д.И. Дувидович и др.). В это же время в нашей стране были разработаны первые программы обучения, началась плановая подготовка и аттестация кадров для технического диагностирования грузоподъемного оборудования.

Нельзя не отметить, что разработанные методики серии РД 10-112 сыграли большую роль в становлении отечественной школы экспертизы ПС, однако, они не были лишены некоторых недостатков. Например, нередко для однотипных дефектов и повреждений в них приводились различные браковочные признаки, что справедливо подвергалось критике, как со стороны непосредственных исполнителей работ, так и местных органов надзора, принимавших результаты экспертизы. В разгар кризиса средств на корректировку методик не было и дальнейшие исследования в этом направлении были временно приостановлены. Позднее их продолжили отдельные авторы, например, Н.И. Баурова [7], [8], П.А. Сорокин [169] и В.М. Горицкий [27], что определило следующий этап развития методологии технического диагностирования ПС.

Для ликвидации выявленных противоречий ООО «Нижегородский центр технической диагностики, экспертизы и сертификации» в 2007 году разработал и согласовал с Ростехнадзором «Указания по экспертному обследованию...» [182] (авторы Е.А. Зосимов, А.Ф. Кирилов, А.С. Липатов, М.Е. Саломатников и др.), которые распространялись на все виды грузоподъемных кранов и содержали «универсальные» или общие для всех видов ПС браковочные показатели.

В 2001 году, после выхода в свет новой редакции «Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов – ПБ 10-382-00» [150] и отмены лицензирования эксплуатации подъемных сооружений, Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 марта 2001 г., № 241 было установлено «...продление срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений, эксплуатируемых на опасных производственных объектах (определение остаточного ресурса) на территории Российской Федерации, осуществляется в порядке, определяемом Федеральным горным и промышленным надзором России». С этого момента различными организациями стали разрабатываться методики оценки остаточного ресурса грузоподъемных кранов.

Принципы, положенные в основу первых методик по оценке остаточного ресурса, сильно отличались друг от друга. Одни из них предлагали рассчитывать

критическое количество баллов, в зависимости от обнаруженных дефектов и повреждений обследуемого крана (авторы А.А. Зарецкий, Н.П. Суворова и др.) [114], другие – применять различные методы расчета и прогнозирования развития длины трещин (автор С.А. Соколов – для мостовых кранов [165], авторы О.В. Леонова, Н.Я. Розовский и др. [156], – для порталных кранов), третьи – комбинацию вероятностных методов расчета надежности с учетом фактических характеристик металла (авторы А.С. Липатов, Д.И. Дувидович, Д.И. Сегаль, С.И. Вугальтер и др. [157]), и т.д.

Каждый из предложенных методов обладал своими достоинствами и недостатками, а их недостаточная апробация не позволяла конкретно рекомендовать какой-либо один из них для последующего практического применения. В какой-то степени, здесь повторилась ситуация с определением некоего приоритетного метода неразрушающего контроля, который было бы целесообразно использовать для выявления всех видов дефектов и повреждений в сварных металлоконструкциях. Увы, такого универсального метода нет, поэтому в «Методических указаниях...» экспертным организациям сегодня рекомендовано самим выбрать тот или иной метод неразрушающего контроля, который бы в высокой степени гарантировал выявление дефектов в данном месте металлоконструкции.

Важным направлением в оценке остаточного ресурса грузоподъемных кранов стало применение методов коэрцитиметрии, основоположниками практического использования которых на грузоподъемных кранах Российской Федерации стали Б.Е. Попов и Е.А. Левин из ИКЦ «Кран» [121]. Позже эти методы нашли применение в определении характера повреждений, оценке остаточного ресурса и разработке концепции ремонта (совместно с В.Н. Березиным) на литейных кранах конвертерного цеха ОАО «Северсталь», которые позволили не только без демонтажа частично заменить стенки пролетных балок литейных кранов, но и не останавливать непрерывный цикл работы конвертеров действующего металлургического производства.

Практика применения оценки остаточного ресурса показала, что подобные

серьезные дорогостоящие работы необходимы далеко не везде и не всегда. Очевидно, для грузоподъемных кранов неинтенсивного использования, которые при проектировании не рассчитываются на сопротивление усталости, надо отказаться от оценки их остаточного ресурса, сохранив лишь выполнение диагностики текущего состояния, как это было принято в первых редакциях «Методических указаний по обследованию...».

Почти все согласованные Ростехнадзором действующие методики оценки остаточного ресурса не учитывают изменений напряженного состояния, связанного с ремонтом (усилением) или заменой отдельных элементов металлоконструкций, поэтому они еще далеки до совершенства.

Еще одно важное замечание касается принятых редакций документа [177], которые ориентируют нас на оценку риска. Оценивать риск, который однозначно связан с вероятностной природой надежности грузоподъемных кранов и материальными затратами для достижения приемлемых (нормированных) показателей, нужно начинать не «с применения простой арифметики», а с изучения статистики отказов, выполнения фундаментальных работ по надежности, которые уже почти два десятилетия практически не проводятся в нашей стране.

В связи с этим, директивное принятие разработки документов по обоснованию безопасности с учетом риска должно выполняться на основании утвержденных и принятых инженерных методик, создание которых, в свою очередь, потребует временных и материальных затрат.

Пока в стране существуют «краны, отработавшие нормативный срок службы», институт технического диагностирования востребован и необходим. Важно лишь, чтобы эта работа, в угоду рынку, не становилась источником дохода отдельных некомпетентных организаций, не являлась препятствием своевременной замены старых кранов, а играла свою важную роль в тех случаях, когда и с технической, и с экономической стороны подобное действительно необходимо.

## **1.2 Научные положения и практический опыт, положенные в основу нормативных документов серии РД 10 – 112 и РД 10-138**

### **1.2.1 Принятие дополнительных терминов и определений**

В статьях [50, 53, 55, 197] автором данной работы выполнен анализ некоторых несоответствий, которые встречались в терминологии старых нормативных документов и введенных в действие Федеральных норм и правилах в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» [184], который заключается в следующем. До разработки и ввода в действие РД серии 10 – 112 [113, 114, 115, 116, 117, 118, 119], в краностроении использовалась терминология, принятая «Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» [149, 150], а также рядом стандартов, в т. ч. и международным стандартом [107].

Вместе с тем, ряд терминов и определений были использованы не совсем корректно. Например, в правилах [149, 150] был использован термин «исправное состояние» (термин 2.12 приложения 2 [150]), в то время как сами правила «допускали» наличие определенных дефектов и повреждений элементов металлоконструкций и механизмов (см., например, приложения 10, 11 и 13 к указанным «Правилам...» [150]), что характерно для «работоспособного состояния» крана, которое определено термином 2.13 приложения 2 [184]. Однако, некоторыми статьями [150], например, ст. 9.3.28, 9.4.3 и т.д., предписывалось наличие инженерно-технического работника, ответственного за «исправное состояние» крана, т.е. с точки зрения надежности – за состояние, которого в эксплуатации не существует.

Все это происходило потому, что используя термины «исправное» и «работоспособное» состояния Правила безопасности не использовали такие термины надежности, как «неисправное» и «неработоспособное» состояния.

Совершенно отсутствовали термины, определяющие рельсовые крановые пути для кранов на рельсовом ходу, хотя допускаемые отклонения путей от

проектного положения были приведены в приложениях 10 и 11 к указанным «Правилам...» [150].

С вводом в действие Руководящего документа [113] в практику оценки технического состояния кранов были введены следующие термины:

«Предельное состояние – состояние грузоподъемной машины, при котором ее дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление ее работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно».

«Критерий предельного состояния – признак или совокупность признаков предельного состояния грузоподъемной машины, установленные нормативной и (или) конструкторской (проектной) документацией».

«Документация эксплуатационная – техническая документация (часть общей конструкторской или проектной документации), которая поставляется заводом-изготовителем вместе с грузоподъемной машиной, включающая паспорт, техническое описание и инструкцию по эксплуатации, инструкцию по монтажу и т. п.»

«Обследование (экспертное обследование) – комплекс работ по техническому диагностированию грузоподъемных машин, отработавших нормативный срок службы, с целью выдачи заключения о возможности и условиях их дальнейшей эксплуатации на определенный период».

«Обследование первичное – обследование, проводимое по истечении нормативного срока службы грузоподъемной машины».

«Обследование повторное – обследование, проводимое по истечении срока, установленного по результатам первичного или предыдущего повторного обследования».

«Обследование внеочередное – обследование, проводимое при возникновении значительных дефектов или неисправностей (или признаков появления этих неисправностей), создающих угрозу для дальнейшей эксплуатации, проводимое по требованиям, изложенным в информационных письмах заводов-изготовителей или органов Ростехнадзора, либо по просьбе

владельца грузоподъемной машины».

«Ресурс – суммарная расчетная наработка грузоподъемной машины от начала ее эксплуатации или от возобновления ее эксплуатации после ремонта до перехода в предельное состояние».

«Срок службы нормативный – календарная (или определенная по счетчику моточасов) продолжительность эксплуатации до достижения ресурса базовыми частями (несущими металлическими конструкциями) грузоподъемной машины, записанная в ее паспорте либо установленная в нормативных документах по расчету и проектированию».

«Эксплуатация – стадия жизненного цикла грузоподъемной машины до ее списания, на которой реализуются, поддерживаются и восстанавливаются ее качества и которая включает: использование грузоподъемной машины по назначению, транспортирование, хранение, техническое обслуживание, монтаж (демонтаж) и ремонт».

Документом [152] были даны определения, касающиеся рельсовых путей грузоподъемных кранов, в том числе:

«Рельсовый крановый путь – устройство (сооружение), состоящее из направляющих (рельсов), соединений и креплений направляющих, а также путевого оборудования, предназначенное для передвижения по нему грузоподъемных машин на рельсовом ходу»;

«Надземный рельсовый крановый путь – рельсовый крановый путь, опирающийся на подкрановые строительные конструкции или подвешенный к ним»;

«Наземный рельсовый крановый путь – рельсовый крановый путь, опирающийся на подрельсовые опоры, балластный слой и (или) другие элементы, передающие крановые нагрузки на грунт земляного полотна»;

«Подкрановые строительные конструкции – строительные конструкции (подкрановые балки, фермы, подкраново-подстропильные балки и фермы), предназначенные для опирания (подвески) рельсового кранового пути, восприятия крановых нагрузок и обеспечения пространственной жесткости и

устойчивости каркаса».

Принятие вышеупомянутых терминов положило начало дополнительной связи оценки технического состояния грузоподъемных кранов (являющихся разновидностью грузоподъемных машин) с известными положениями теории надежности, а также ранее выполненными исследованиями, опирающимися на использование статистических данных об отказах металлических конструкций и механизмов грузоподъемных кранов в процессе проведения их ресурсных испытаний и эксплуатации.

### 1.2.2 Обоснование допустимых критериев перехода грузоподъемного крана в неработоспособное состояние

Как отмечено в 1.1 данной работы, Е.М. Концевым и Б.М. Розеншейном были сформулированы первые критерии отказов металлоконструкций мостовых кранов, связанные с величиной остаточного прогиба главных балок [71]: остаточный (отрицательный) прогиб является предельно допустимым. Чему же соответствуют приведенные величины?

Согласно требованию п. 2.6.13 стандарта [34], «Пролетные балки в мостовых кранах при пролете  $L$  свыше 17 м должны иметь строительный подъем, равный  $L / 1000$ . Допускается отклонение  $\pm 20 \%$ .»

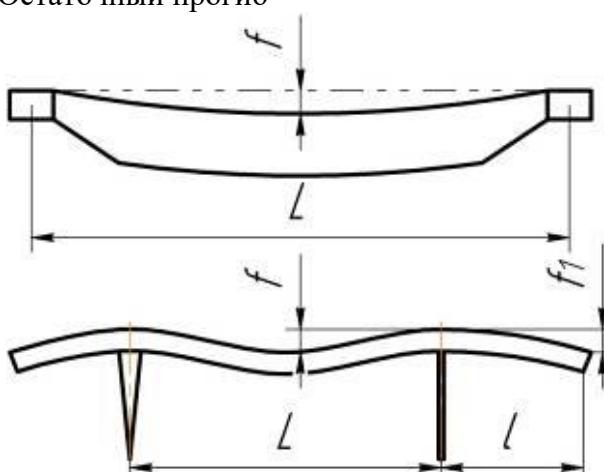
Согласно рекомендациям Е.М. Концевого и Б.М. Розеншейна [71], при остаточном (отрицательном) прогибе  $f \leq 0,0022L$  (где  $L$  – пролет крана) кран может эксплуатироваться без всяких ограничений, т.е. с учетом наличия первоначального строительного подъема, авторы как бы «допускают» наличие предельного прогиба для главных балок около  $L / 450$ . Указанная величина является чуть ниже предельной величины упругого прогиба, закладываемой в расчет металлоконструкции мостового крана для самой низкой группы классификации ( $L / 400$ ), приведенной в стандарте [173].

Если же, остаточная деформация возрастет до  $f = 0,0035L$ , ни о какой

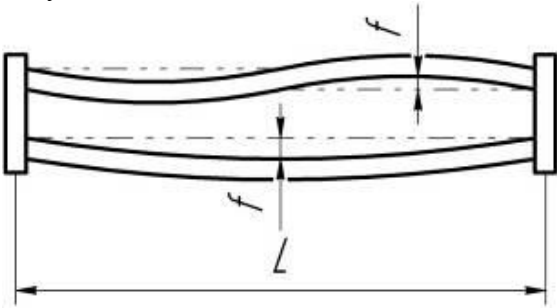
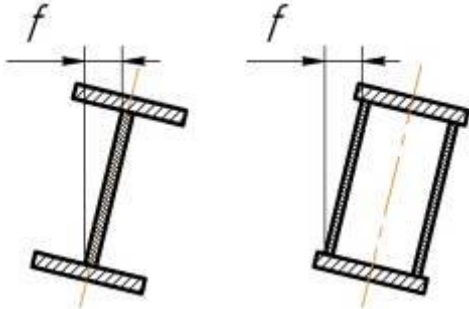
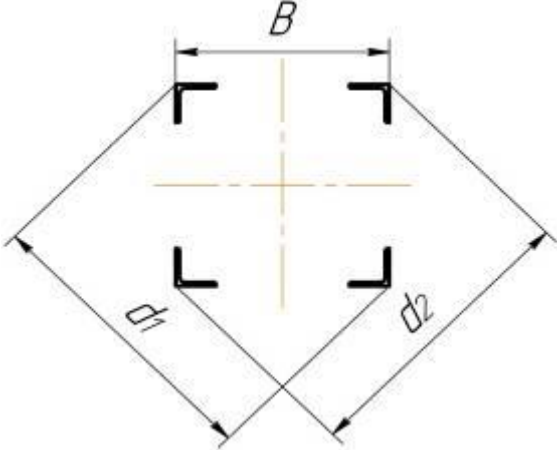
дальнейшей эксплуатации металлоконструкции с таким прогибом речи быть не может, поскольку металлоконструкция может разрушиться даже от номинальной нагрузки.

Разумеется, и остальные величины, приведенные в приложениях к РД серии 10-112 в качестве браковочных показателей, можно интерпретировать как критерии возможного перехода соответствующего элемента металлоконструкции или механизма в предельное состояние не только грузоподъемного крана, но и грузоподъемных машин специального назначения. Эти данные представлены в виде таблиц 1.1- 1.4 [57, 111, 182]:

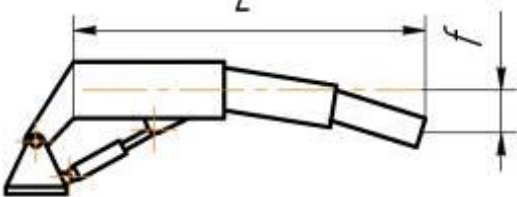
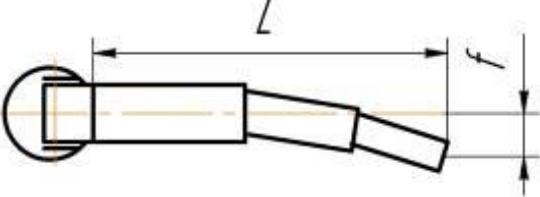
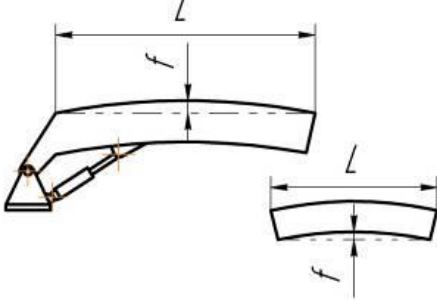
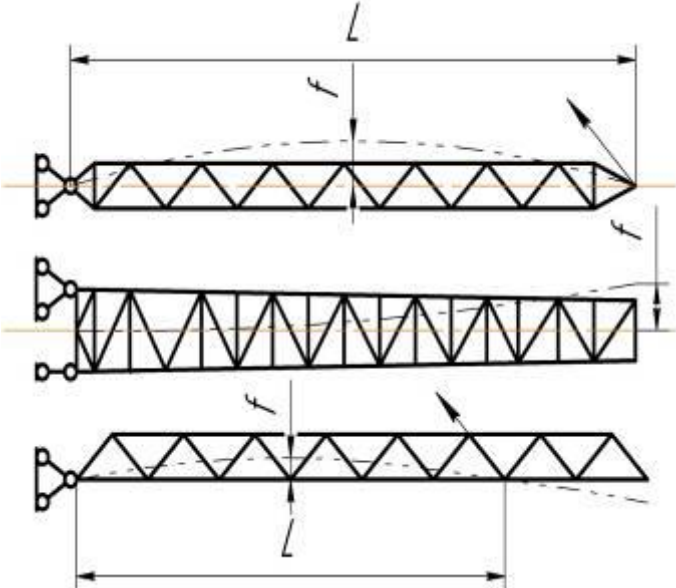
Таблица 1.1 – Браковочные показатели сборочных единиц металлоконструкций грузоподъемных кранов

| Схема деформации (состояния)                                                                                    | Интервал деформации (отклонения)             | Срок и условия последующей эксплуатации                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <p>1. Остаточный прогиб</p>  | 1.<br>$f \leq 0,0022L$<br>$f_1 \leq 0,0035l$ | До следующего планового технического диагностирования          |
|                                                                                                                 | 2.<br>$0,0022L < f \leq 0,0035L$             | До одного года<br>Замеры – не реже одного раза в четыре месяца |
|                                                                                                                 | 3.<br>$f > 0,0035L$<br>$f_1 > 0,0035l$       | Прекращение эксплуатации                                       |

## Продолжение таблицы 1.1

|                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>2. Изогнутость главных балок</p>                                            | <p>1.</p> $f \leq 0,002L$ <p>2.</p> $f > 0,002L$                                                                                                                                                                                                                                                 | <p>До следующего планового технического диагностирования, если не нарушается допуск на колею рельсового пути тележки</p> <p>Прекращение эксплуатации</p>                                                                                            |
| <p>3. Скручивание главных балок</p>                                            | <p>1. Кран однобалочный, езда поверху<br/><math>f \leq 0,001L</math></p> <p>2. Кран однобалочный, езда понизу<br/><math>f \leq 0,002L</math></p> <p>3. Кран двухбалочный<br/><math>f \leq 0,002L</math></p> <p>4. Кран балочно-ферменный или четырёхферменный<br/><math>f \leq 0,002L</math></p> | <p>До следующего планового технического диагностирования</p> <p>До следующего планового технического диагностирования</p> <p>До следующего планового технического диагностирования</p> <p>До следующего планового технического диагностирования</p> |
| <p>4. Разность диагоналей поперечного сечения фермы (для башен и стрел)</p>  | <p>1. В разъёмном стыке</p> $ d_1 - d_2  \leq 0,001B$ <p>2. Вне разъёмного соединения</p> $ d_1 - d_2  \leq 0,004B$                                                                                                                                                                              | <p>До следующего планового технического диагностирования</p> <p>До следующего планового технического диагностирования</p>                                                                                                                           |

## Продолжение таблицы 1.1

|                                                                                                                                                               |                                                                                                |                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <p>5. Отклонение от прямолинейности оси стрелы в вертикальной плоскости</p>  | <p>1.</p> $f \leq 0,007L$                                                                      | <p>До следующего планового технического диагностирования</p> |
| <p>6. Отклонение от прямолинейности оси стрелы на плоскости стрелы</p>       | <p>1.</p> $f \leq 0,002L$                                                                      | <p>До следующего планового технического диагностирования</p> |
| <p>7. Отклонение от прямолинейности звена телескопической стрелы</p>       | <p>1.</p> $f \leq 0,005L$                                                                      | <p>До следующего планового технического диагностирования</p> |
| <p>8. Отклонение от прямолинейности оси стрелы (гуська)</p>                | <p>1. Для стреловых кранов</p> $f \leq 0,0022L$ <p>2. Для башенных кранов</p> $f \leq 0,0014L$ | <p>До следующего планового технического диагностирования</p> |

## Продолжение таблицы 1.1

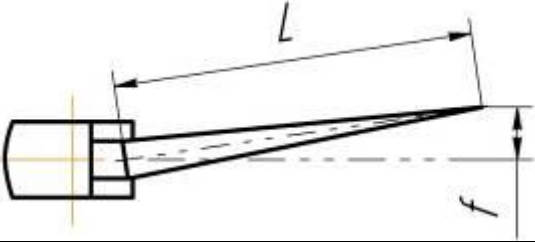
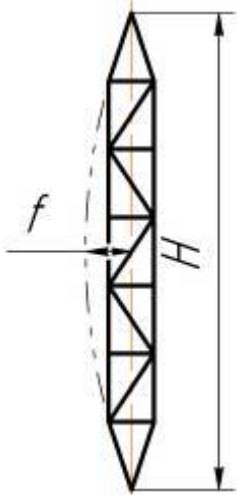
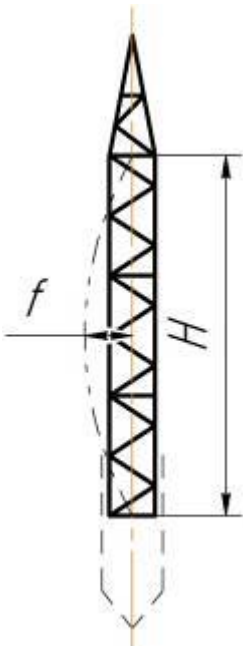
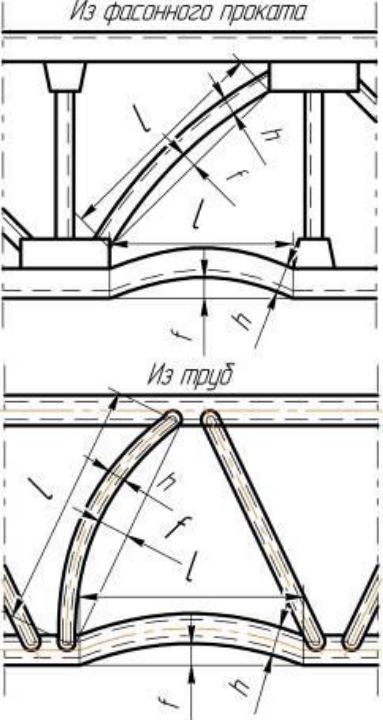
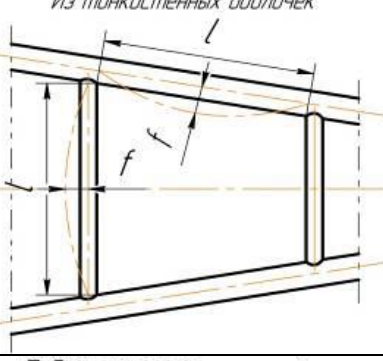
|                                                                                                                                                        |                  |                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------|
| <p>9. Отклонение от перпендикулярности оси стрелы к оси шарнира</p>   | $f \leq 0,01L$   | До следующего планового технического диагностирования |
|                                                                                                                                                        | $f > 0,01L$      | Реконструкция узлов крепления стрелы                  |
| <p>10. Отклонение от прямолинейности оси башни стрелового крана</p>  | $f \leq 0,002H$  | До следующего планового технического диагностирования |
|                                                                                                                                                        | $f > 0,002H$     | Прекращение эксплуатации. Замена стрелы               |
| <p>11. Отклонение от прямолинейности оси башни башенного крана</p>  | $f \leq 0,0014H$ | До следующего планового технического диагностирования |
|                                                                                                                                                        | $f > 0,0014H$    | Замена башни                                          |

Таблица 1.2 – Браковочные показатели элементов металлоконструкций  
грузоподъемных кранов

| Схема деформации элемента                                                           | Напряжённое состояние элемента                       | Допуск, $f$                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 1. Остаточная деформация (изогнутость) стержня (элемента фермы)                     |                                                      |                                |
|   | 1. Сжатие                                            | $0,002l$ , но не более $0,25h$ |
|                                                                                     | 2. Растяжение                                        | $0,004l$ , но не более $0,5h$  |
|                                                                                     | 3. Теоретически не нагружен (поддерживающий элемент) | $0,005l$ , но не более $0,25h$ |
|  | Сжатие                                               | $0,0025l$                      |
|  | Сжатие, растяжение                                   | $0,0017l$                      |

## Продолжение таблицы 1.2

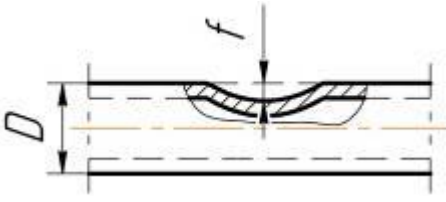
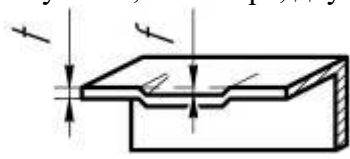
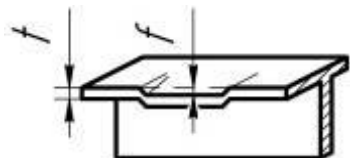
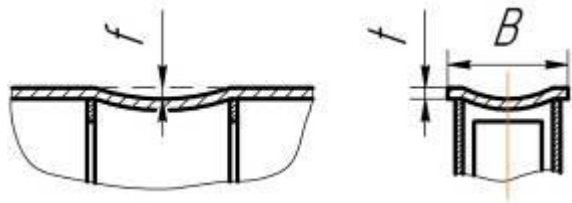
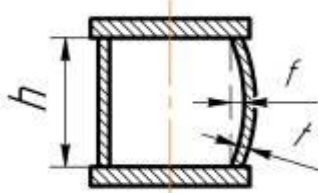
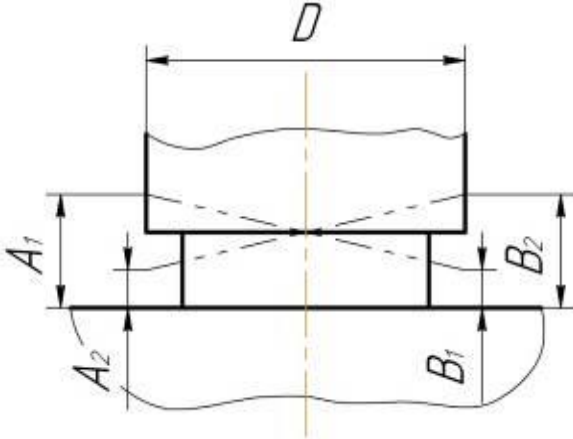
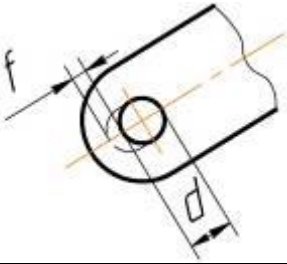
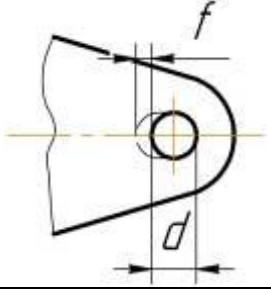
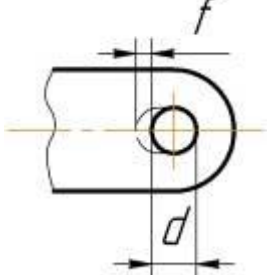
|                                                                                     |                             |                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|
| 2. Остаточная деформация (вмятина) местная                                          |                             |                                               |
| 2.1. Труба                                                                          | 1. Сжатие                   | $0,02D$                                       |
|    | 2. Растяжение               | $0,05D$                                       |
|                                                                                     | 3. Теоретически не нагружен | $0,05D$                                       |
| 2.2. Полка уголка, швеллера, двутавра                                               | 1. Сжатие                   | $1,5t$                                        |
|    | 2. Растяжение               | $3t$                                          |
|                                                                                     | 3. Теоретически не нагружен | $5t$                                          |
| 2.3. Свес пояса                                                                     | 1. Сжатие                   | $1,5t$                                        |
|   | 2. Растяжение               | $3t$                                          |
| 3. Остаточная деформация (отклонение от плоскости)                                  |                             |                                               |
| 3.1. Пояс балки                                                                     | 1. Сжатие                   | $0,1(B/t)$                                    |
|  | 2. Растяжение               | $1t$                                          |
| 3.2. Стенка балки                                                                   | 1. Сжатие                   | $1,5t$ при $h < 80t$<br>$2t$ при $h \geq 80t$ |
|  | 2. Растяжение               | $5t$                                          |

Таблица 1.3 – Браковочные показатели специфических узлов конструкций ПС

| Наименование узла (детали)                                                                                   | Дефект (повреждение)                                                                                                                    | Браковочный показатель                                                                                                                                                                                                                                                                        |                 |     |        |          |                |              |       |          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----|--------|----------|----------------|--------------|-------|----------|
| 1. Устройство опорно-поворотное (ОПУ)                                                                        | Перекос поворотных полуобойм к неподвижному венцу<br> | $\frac{( A_1 - A_2  +  B_1 - B_2 )}{D} \geq 0,004$                                                                                                                                                                                                                                            |                 |     |        |          |                |              |       |          |
| 2. Крепления подкоса к башне и двуногой стойке                                                               | Выработка отверстия под палец в проушине<br>          | $f \geq 0,04d$                                                                                                                                                                                                                                                                                |                 |     |        |          |                |              |       |          |
| 3. Проушина под ось крепления флюгера                                                                        | Выработка отверстия под ось<br>                      | $f \geq 0,015d$                                                                                                                                                                                                                                                                               |                 |     |        |          |                |              |       |          |
| 4. Проушины (под пальцы выносных опор, гидроцилиндров, элементов двуногой стойки пяты стрелы, блоков и т.д.) | Выработка отверстия под ось<br>                      | <table><tr><td><math>d, \text{ мм}</math></td><td><math>f</math></td></tr><tr><td><math>&lt; 50</math></td><td><math>\geq 2</math></td></tr><tr><td><math>50 \dots 100</math></td><td><math>\geq 0,04d</math></td></tr><tr><td><math>100</math></td><td><math>\geq 4</math></td></tr></table> | $d, \text{ мм}$ | $f$ | $< 50$ | $\geq 2$ | $50 \dots 100$ | $\geq 0,04d$ | $100$ | $\geq 4$ |
| $d, \text{ мм}$                                                                                              | $f$                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                 |     |        |          |                |              |       |          |
| $< 50$                                                                                                       | $\geq 2$                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                 |     |        |          |                |              |       |          |
| $50 \dots 100$                                                                                               | $\geq 0,04d$                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                 |     |        |          |                |              |       |          |
| $100$                                                                                                        | $\geq 4$                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                 |     |        |          |                |              |       |          |

Продолжение таблицы 1.3

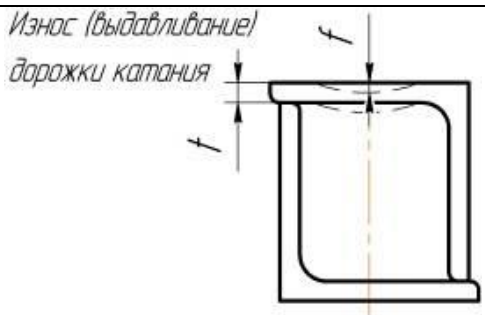
|                                                             |                                                                                    |                                               |                                                                |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 5. Ползуны или ролики между звеньями телескопической стрелы | 1. Износ ползуна (толщиной $t$ )<br>или ролика (диаметром $d$ )                    |                                               | $f \geq 0,2t$<br>$f \geq 0,2d$                                 |
|                                                             | 2. Выработка поверхности по следу от роликов или ползунов на листах звеньев        |                                               | $f \geq 0,15t$ ,<br>где $t$ – толщина листа                    |
| 6. Пояса балочных стрел башенных кранов                     |  |                                               | $f \geq 0,2t$                                                  |
| 7. Элементы металлических конструкций                       | Износ коррозионный                                                                 | 1. Трубчатые элементы башен и стрел           | $\geq 0,05A$ ,<br>где “ $A$ ” – площадь сечения элемента       |
|                                                             |                                                                                    | 2. Балочные конструкции                       | $\geq 0,1A$ ,<br>где “ $A$ ” – площадь сечения элемента балки  |
|                                                             |                                                                                    | 3. Ферменные конструкции из фасонного проката | $\geq 0,08A$ ,<br>где “ $A$ ” – площадь сечения элемента фермы |

Таблица 1.4 – Общие браковочные показатели деталей и узлов механизмов кранов

| Наименование узла (детали)          | Дефект (повреждение)                                       | Браковочный показатель                                                                                                                       |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Муфта зубчатая                   | 1.1 Износ зубьев, %                                        | 15 – для механизмов подъёма груза и стрелы (гуська);<br>20 – для механизмов вращения и передвижения (замер производится по постоянной хорде) |
|                                     | 1.2 Осевой ход обоймы зубчатой или вала промежуточного, мм | $< 2$<br>$> 4$                                                                                                                               |
|                                     | 1.3 Несоосность соединяемых валов, мм                      | 1,0                                                                                                                                          |
|                                     | 1.4 Перекос оси соединяемых валов, град.                   | 1,5 (при отсутствии соосности)<br>0,8 (для муфт МЗП)                                                                                         |
| 2. Муфта упругая втулочно-пальцевая | 2.1 Износ (обмятие) упругих элементов, мм                  | 2                                                                                                                                            |
|                                     | 2.2 Поверхностный износ обода, %                           | 25 (от первоначальной толщины)                                                                                                               |
|                                     | 2.3 Биение поверхности обода, мм                           | 0,003 $\Pi$ шкива                                                                                                                            |

## Продолжение таблицы 1.4

|                         |                                                                               |                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. Тормоз               | 3.1 Износ тормозных обкладок, %                                               | Для стреловых кранов до заклёпок, но не более 33 от начальной толщины. Для остальных ПС до заклёпок, но не более 50 от начальной толщины.                                                 |
|                         | 3.2 Зазор в шарнирах, мм                                                      | 0,005 $\text{III}$ шарнира                                                                                                                                                                |
|                         | 3.3 Запас хода штока (толкателя), %                                           | 10...20                                                                                                                                                                                   |
| 4. Зацепление зубчатое  | 4.1 Износ зубьев (эвольвентное зацепление), %                                 | 15 – для механизмов подъёма груза и стрелы (гуська)<br>20 – для механизмов передвижения и вращения (замер производится по постоянной хорде)                                               |
|                         | 4.2 Состояние поверхности зубьев колёс                                        | Зацепление эвольвентное – площадь выкрашивания (мелкие поры и углубления) более 20% рабочей поверхности зуба. Зацепление Новикова – наличие продольных рисок на рабочей поверхности зуба. |
| 5. Зацепление червячное | 5.1 Износ зубьев венца                                                        | 20                                                                                                                                                                                        |
|                         | 5.2 Люфт осевой червяка, мм                                                   | 1,0                                                                                                                                                                                       |
| 6. Зацепление реечное   | 6.1 Уменьшение длины хорды при вершине зуба, %                                | 25                                                                                                                                                                                        |
|                         | 6.2 Зазор между верхними роликами кремальеры и поверхностью корпуса рейки, мм | 2                                                                                                                                                                                         |
| 7. Зацепление цевочное  | 7.1 Уменьшение длины хорды при вершине зуба цевочной звёздочки, %             | 25                                                                                                                                                                                        |
|                         | 7.2 Уменьшение диаметра цевки, %                                              | 12                                                                                                                                                                                        |
| 8. Барабан канатный     | 8.1 Износ ручья по профилю, мм                                                | 2                                                                                                                                                                                         |
|                         | 8.2 Уменьшение толщины стенки по дну ручья, %                                 | 20                                                                                                                                                                                        |
|                         | 8.3 Срез или износ гребня канавки по высоте на длине более одного витка, %    | 50                                                                                                                                                                                        |
| 9. Редуктор             | 9.1 Люфт валов осевой, мм                                                     | 0,3                                                                                                                                                                                       |
|                         | 9.2 Люфт валов радиальный, мм                                                 | 0,15                                                                                                                                                                                      |

## Продолжение таблицы 1.4

|                       |                                                                       |                                                                    |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 10. Блоки             | 10.1 Износ ручья блока по глубине                                     | 0,2d каната                                                        |
|                       | 10.2 Износ реборд, % от первоначальной толщины                        | 10 – для чугуновых блоков<br>20 – для стальных блоков              |
|                       | 10.3 Обломы реборд (сколы)                                            | На длине более 0,5l каната                                         |
| 11. Подвеска крюковая | 11.1 Износ вертикального сечения зева крюка, %                        | 10                                                                 |
|                       | 11.2 Увеличение ширины зева крюка, %                                  | 12                                                                 |
|                       | 11.3 Вертикальный люфт крюка в траверсе                               | Должен находиться в интервале (0,25...0,75) шага резьбы хвостовика |
|                       | 11.4 Зазор между ограждением и блоками                                | 0,2d каната                                                        |
| 12. Канаты            | Браковочные показатели см. ФНП ПС, приложение 4                       | Нормы браковки см. приложение 4 [184]                              |
| 13. Колеса ходовые    | 13.1 Износ (уменьшение) толщины реборды, %                            | 50                                                                 |
|                       | 13.2 Уменьшение диаметра колеса вследствие выработки, %               | 2                                                                  |
|                       | 13.3 Разность диаметров колёс, связанных между собой кинематически, % | 2                                                                  |

### 1.3 Критерии работоспособности и перехода в неработоспособное состояние подкрановых рельсов

#### 1.3.1 Классификация дефектов и повреждений рельсов. Состояние вопроса

Для всех грузоподъемных кранов, передвигающихся по рельсовому пути, существенное влияние на динамику их движения, величины нагрузок и долговечность крановых ходовых колес оказывает состояние рельсового пути. При движении крана рельс, а в особенности его головка, подвергаются воздействию целого комплекса нагрузок. Это и вертикальная нагрузка от веса крана, и горизонтальные нагрузки от сил трения вдоль и поперек пути. К «крановым» нагрузкам на рельс в эксплуатации добавляются нагрузки от просадки и смещения подкрановых балок (для надземных путей) или просадки

балласта и основания (для наземных путей). Все это может привести как к местному, так и к общему искривлению положения путей в плане и профиле, изменению ширины колеи и зазоров в стыках.

В данном разделе мы не будем касаться всего многообразия требований к устройству и безопасной эксплуатации рельсового кранового пути и ограничим свое внимание лишь параметрами и характеристиками пути, непосредственно влияющими на динамику движения крана и приводящими к его отказам, например: отклонениям положения рельсов в плане и профиле, внешним повреждениям (дефектам) рельсов (износу, выбоинам, трещинам и т.д.), а также конструкцией и отклонениями размеров стыков.

Применительно к каждому из типов рельсов, его внешние повреждения (дефекты) можно условно разделить на микро- и макродефекты.

К микродефектам, которые могут оказать некоторое влияние на движение крана, можно отнести неточности изготовления самого рельса, кривизну его концов и т.д. Эти отклонения (которые даже не трактуются как дефекты, поскольку лежат в полях допусков) регламентированы стандартом на изготовление рельсов [38]. Например, согласно [38], ширина головки нового рельса может иметь допуск  $+1,0/-2,5$  мм. Регламентированы также местные дефекты, обработанные зачисткой и полой вырубкой. Глубина таких «зачисток» не должна превышать 1,5 – 2 мм.

К макродефектам или, вернее, к макроповреждениям следует отнести случаи значительного (протяженного по длине) износа головки рельса как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Как в «железнодорожных», так и в «крановых» нормативных документах [100, 150, 196], это повреждение головки рельса характеризуется т.н. «приведенным» износом головки рельса.

Одна из первых попыток как-то классифицировать дефекты и повреждения крановых рельсов в отечественной практике была предпринята в отраслевом нормативе Минчермета [175].

Для каждого вида дефекта и повреждения рельса в нормативном документе приведено краткое описание, цифровое обозначение, характерные фотографии

дефектов и повреждений, краткое описание причин появления и развития, способы выявления и указания по эксплуатации поврежденных крановых рельсов.

Основные принципы предложенной классификации заключались в следующем.

Все дефекты, повреждения и изломы крановых рельсов пронумерованы двузначным числом и вспомогательной третьей цифрой, например, 41.1, 52.2 и т.д.

Первая цифра характеризует вид дефекта или повреждения рельса (головка, шейка, подошва).

Вторая цифра обозначает разновидность дефекта или повреждения с учетом основной причины дефекта этой разновидности.

Третья цифра указывает на место расположения дефекта или повреждения по длине рельса (1 – в стыке, 2 – вне стыка, 3 – в сварном стыке).

Первые две цифры отделяются от третьей точкой.

Виды дефектов и повреждений крановых рельсов (первая цифра в номере дефекта) обозначают следующим образом:

1 – отслоение или выкрашивание металла на поверхности катания головки рельса;

2 – поперечные трещины в головке рельса и трещины из-за них;

3 – продольные горизонтальные и вертикальные трещины в головке рельса;

4 – смятие и неравномерный износ головки рельса;

5 – дефекты и повреждения шейки рельса;

6 – дефекты и повреждения подошвы рельса;

7 – изломы рельса по всему сечению (исключая изломы, учитываемые в п.2);

8 – изгибы рельса в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

9 – прочие дефекты и повреждения рельса.

Разновидность дефектов и повреждений с учетом основных причин их появления (вторую цифру в номере дефекта) обозначают следующим образом:

0 – дефекты и повреждения, связанные с недостатками и нарушениями технологии изготовления рельса;

- 1 – дефекты и повреждения, вызванные недостаточной контактной усталостной прочностью металла рельсов;
- 2 – дефекты и повреждения, связанные с недостатками профиля рельса;
- 3 – дефекты и повреждения, полученные в результате нарушения правил содержания подкрановых путей;
- 4 – дефекты и повреждения, связанные с нерасчетными воздействиями мостовых кранов на рельс (значительным перекосом колес, ударами колес и др.);
- 5 – дефекты и повреждения, полученные в результате механических воздействий на рельс;
- 6 – дефекты и повреждения, связанные с недостатками и нарушениями технологии сварки стыков рельсов;
- 7 – дефекты и повреждения, связанные с недостатками и нарушениями технологии закалки рельсов (для подкрановых рельсов КР закалка не предусмотрена);
- 8 – дефекты и повреждения, связанные с недостатками и нарушениями технологии наплавки рельсов;
- 9 – дефекты и повреждения, вызванные другими, не перечисленными выше причинами.

Учитывая, что приведенная классификация была разработана применительно к крановым рельсам во многом впервые, она не лишена определенных недостатков, основными из которых являются следующие:

1. Наличие трещины в сечении (первая цифра 2 в обозначении) физически очень сложно отделить от определения «излома» (первая цифра 7 в обозначении), поскольку несвоевременно обнаруженное развитие трещины по сечению приведет к излому.
2. Некоторые приведенные формулировки, например, «поперечные трещины в головке рельса и трещины из-за них» не всегда могут быть однозначно истолкованы и не отвечают терминологии нормативных документов.
3. Ряд приведенных рекомендаций классификации касается т.н. «сварных» стыков, которые применяются в рельсовых путях еще не очень часто.

В связи с этим, данную классификацию нельзя признать достаточно исчерпывающей и рекомендовать к использованию в представленном виде.

Позже подобная «Рекомендуемая классификация дефектов рельсов» была разработана рядом авторов под руководством А.А. Короткого, которая, к сожалению, так и не была утверждена.

Проект классификации дефектов и повреждений рельсов разрабатывался и авторским коллективом под руководством профессора И.Б. Зеленова [62] в рамках учебных программ подготовки и аттестации специалистов, обучающихся по программе «Обследование и техническое диагностирование крановых рельсовых путей», однако этот документ до настоящего времени имеет статус рекомендуемого и, представляя определенный интерес для специалистов, пока не может претендовать на некий законченный норматив.

Представляет интерес система классификации дефектов рельсов, принятая на железнодорожном транспорте. Учитывая, что многие марки железнодорожных рельсов находят применение и в конструкции крановых рельсовых путей, остановимся на этом подробнее.

«Железнодорожная» система классификации дефектов рельсов [100] включает три нормативных документа. Первый документ «Классификация дефектов рельсов» объясняет структуру кодового обозначения дефектов, второй – «Каталог дефектов рельсов», дает подробное описание каждого дефекта с его изображением, третий – определяет «Признаки дефектных и остродефектных рельсов».

Все дефекты рельсов в классификации кодированы трехзначным числом. Использована следующая структура кодового обозначения: первая цифра определяет вид дефекта рельса и место его появления по элементам сечения рельса (головка, шейка, подошва); вторая цифра определяет разновидность дефекта с учетом основной причины его зарождения и развития; третья цифра указывает на место расположения дефекта по длине рельса.

Первые две цифры отделяются от третьей точкой.

Кодировка вида дефекта рельса и место его появления по элементам сечения

рельса (головка, шейка, подошва) уточнены, например, цифрой «2» кодируют «поперечные трещины в головке рельса и изломы из-за них». Несколько иначе выглядят и формулировки «разновидности дефекта рельса, определяемые основной причиной его зарождения и развития»:

0 – дефекты, связанные с недостатками и нарушениями технологии производства рельсов;

1 – дефекты, зависящие от металлургического качества рельсовой стали (местные неметаллические включения, вытянутые вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек) и связанная с этим недостаточная контактно-усталостная прочность рельсового металла;

2 – дефекты, связанные с некачественной обработкой концов рельса;

3 – дефекты, связанные с нарушениями требований инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути, а также с нарушением технологии обработки болтовых отверстий рельсов металлургическими комбинатами, линейными предприятиями путевого хозяйства дорог;

4 – дефекты, связанные с усиленным специфическим воздействием подвижного состава на рельсы (боксование, ползуны и др.), в т.ч. из-за нарушения режимов вождения поездов или из-за недостатков в содержании экипажной части подвижного состава;

5 – дефекты, полученные в результате механических воздействий на рельсы (удар инструментом, рельса о рельс и т.п.);

6 – дефекты в зоне сварных стыков рельсов, связанные с недостатками и нарушениями технологии сварки рельсов;

7 – дефекты, связанные с недостатками и нарушениями технологии закалки рельсов;

8 – дефекты, связанные с недостатками и нарушениями технологии наплавки рельсов или приварки рельсовых соединителей;

9 – дефекты, вызванные коррозией или другими, не перечисленными выше причинами.

Буквы «В» и «Г» после второй цифры означают соответственно

«вертикальную» или «горизонтальную» ориентацию расположения дефекта (трещины в рельсе). Цифровое обозначение места расположения дефекта (третья цифра в номере дефекта) принято следующим:

- 1 – в стыке (на расстоянии до 75 см от торца);
- 2 – вне стыка;
- 3 – в зоне контактной стыковой сварки рельсов.

Отсутствие третьей цифры в коде означает, что дефект может быть расположен в любом месте по длине рельса.

Согласно изложенной «железнодорожной классификации», например, дефект «46.3» может быть расшифрован так: смятие головки (4), вызванное недостатком технологии сварки (6), сварка выполнена электроконтактным способом.

Позднее для железнодорожных рельсов Е.А. Шуром была разработана так называемая «новая классификация» [190], таблица из которой продублирована в данной работе (Таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Новая классификация дефектов железнодорожных рельсов, предложенная Е.А. Шуром [190]

| Элемент профиля | № группы | Наименование группы дефектов                                   | Код дефекта, соответствующий его виду (0-4) и основной причине образования |                                                               |                                                            |                                |                                            |
|-----------------|----------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|
|                 |          |                                                                | Нарушение технологии изготовления рельсов                                  | Недостаточная прочность (после пропуска гарантийного тоннажа) | Недостаточная прочность (до пропуска гарантийного тоннажа) | Дефекты в зоне болтовых стыков | Ненормативные условия эксплуатации рельсов |
|                 |          |                                                                | 0                                                                          | 1                                                             | 2                                                          | 3                              | 4                                          |
| Головка         | 1        | Трещины и выкрашивание на поверхности                          | 10.1-2                                                                     | 11.1-2                                                        | 12.1-2                                                     | 13.1                           | 14.1-2                                     |
|                 | 2        | Поперечные трещины                                             | 20.1-2                                                                     | 21.1-2                                                        | 22.1-2                                                     | -                              | 24.1-2                                     |
|                 | 3        | Продольные трещины в головке и в зоне перехода головки в шейку | 30.1-2                                                                     | 31.1-2                                                        | -                                                          | 33.1                           | -                                          |
|                 | 4        | Износ и смятие                                                 | 40.0                                                                       | 41.0,2                                                        | -                                                          | 43.1                           | 44.0                                       |
| Шейка           | 5        | Дефекты в шейке                                                | 50.1                                                                       | -                                                             | -                                                          | 53.1                           | -                                          |
| Подошва         | 6        | Дефекты в подошве                                              | 60.1-2                                                                     | -                                                             | -                                                          | -                              | 64.1-2                                     |
| Все сечение     | 7        | Изломы                                                         | 70.1-2/<br>20.1-2                                                          | 71.1-2,/<br>21.1-2                                            | 72.1-2/<br>22.1-2                                          | 73.1/33.1                      | 74.1-2/<br>24.1-2                          |
|                 |          |                                                                | 70.1-2/<br>60.1-2                                                          | 71.1-2,/<br>31.1-2                                            | -                                                          | 73.1/53.1                      | 74.1-2/<br>64.1-2                          |
| Все сечение     | 8        | Изгибы                                                         | -                                                                          | -                                                             | -                                                          | -                              | -                                          |
| Любой           | 9        | Прочие                                                         | -                                                                          | -                                                             | -                                                          | -                              | -                                          |

Продолжение таблицы 1.5

| Элемент профиля | № группы | Наименование группы дефектов                                   | Код дефекта, соответствующий его виду (5-9) и основной причине образования |                                                                  |                                                               |                                                       |                                                       |
|-----------------|----------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
|                 |          |                                                                | Ненормативное механическое воздействие на рельс                            | Дефекты сварных стыков (после пропуска гарантированного тоннажа) | Дефекты сварных стыков (до пропуска гарантированного тоннажа) | Нарушение технологии наплавки и приварки соединителей | Коррозионная усталость, изломы без усталостных трещин |
|                 |          |                                                                | 0                                                                          | 1                                                                | 2                                                             | 3                                                     | 4                                                     |
| Головка         | 1        | Трещины и выкрашивание на поверхности                          | -                                                                          | 16.3-4                                                           | 17.3-4                                                        | 18.1-2                                                | 19.0-2                                                |
|                 | 2        | Поперечные трещины                                             | 225.1-2                                                                    | 26.3-4                                                           | 27.3-4                                                        | -                                                     | -                                                     |
|                 | 3        | Продольные трещины в головке и в зоне перехода головки в шейку | -                                                                          | -                                                                | -                                                             | 38.1                                                  | -                                                     |
|                 | 4        | Износ и смятие                                                 | -                                                                          | 46.3-4                                                           | 47.3-4                                                        | -                                                     | -                                                     |
| Шейка           | 5        | Дефекты в шейке                                                | 55.1-2                                                                     | 56.3-4                                                           | 57.3-4                                                        | -                                                     | -                                                     |
| Подошва         | 6        | Дефекты в подошве                                              | 65.1-2                                                                     | 66.3-4                                                           | 67.3-4                                                        | -                                                     | 69.1-2                                                |
| Все сечение     | 7        | Изломы                                                         | 75.1-2/<br>25.1-2                                                          | 76.3-4/<br>26.3-4                                                | 77.3-4/<br>27.3-4                                             | -                                                     | 79.1-2                                                |
|                 |          |                                                                | 75.1-2/<br>55.1-2                                                          | 76.3-4/<br>56.3-4                                                | 77.3-4/<br>57.3-4                                             |                                                       |                                                       |
|                 |          |                                                                | 75.1-2/<br>65.1-2                                                          | 76.3-4/<br>66.3-4                                                | 77.3-4/<br>67.3-4                                             |                                                       |                                                       |
| Все сечение     | 8        | Изгибы                                                         | 85.1-2                                                                     | 86.3-4                                                           | -                                                             | -                                                     | -                                                     |
| Любой           | 9        | Прочие                                                         | -                                                                          | -                                                                | -                                                             | 98.0-1-2                                              | 99.1,2,3,4                                            |

Анализ принципов классификаций, предложенных различными авторами, показывает, что у дефектов крановых и железнодорожных рельсов много общего.

Скорее всего, одна из классификаций стала позже прототипом для остальных. При этом очень важно отметить формулировки некоторых «железнодорожных» терминов, связанных с рельсами, которые по ряду причин отсутствуют в терминологии кранового рельсового пути. Приведем некоторые из них.

Например, «дефект рельса» характеризуется нарушением, вызвавшим любое отклонение его геометрии или качественных свойств от норм, соблюдение которых обеспечивает работоспособное состояние рельса [100].

К дефектам рельсов относят: трещины, отслоения и выкрашивания рельсового металла, все виды износа, величины которого превышают нормированные значения, пластические деформации в виде смятия, оплывов металла головки рельса, коррозия, механические повреждения.

Отказ рельса вызывается дефектом, при котором исключается пропуск поездов (полный отказ, например, при изломе рельса) или возникает необходимость в ограничении скорости движения поездов (частичный отказ, например, образование волнообразных неровностей на поверхности катания головки рельса и т.п.).

Рельсы, в зависимости от их повреждения и дефекта, подразделяются на остродефектные и дефектные.

Основными признаками остродефектных рельсов являются:

- поперечные, продольные или наклонные, видимые или внутренние (выявленные дефектоскопными средствами) трещины в головке независимо от их размера;
- продольные трещины и выколы из-за них в местах перехода головки в шейку, начинающиеся с торца рельса с одной или двух сторон шейки, независимо от их размера;
- трещины от болтовых отверстий и трещины в шейке рельса, независимо от их размеров;
- местный износ или коррозия кромки подошвы рельсов глубиной более 8 мм для рельса Р75, более 7 мм для рельса Р65 и более 6 мм для рельса Р50;

- продольные и поперечные трещины в подошве, независимо от размеров, выколоты части подошвы рельса;
- поперечный излом рельса.

Остродефектный рельс – это рельс, представляющий прямую угрозу безопасности движения из-за возможного разрушения под поездом или схода колес с рельса из-за его повреждения. После обнаружения остродефектный рельс подлежит немедленному изъятию из пути (замене).

Дефектный рельс – это рельс, у которого в процессе эксплуатации произошло, как правило, постепенное снижение служебных свойств ниже нормативного уровня, однако еще обеспечивается безопасный пропуск поездов, хотя в ряде случаев уже требуется введение ограничения скорости движения. Такие рельсы заменяют в плановом порядке. Режим их эксплуатации до момента устранения дефектов зависит от конкретных условий.

Перечисленные признаки остродефектных рельсов железнодорожного пути важны для определения аналогичных признаков браковки рельсов кранового пути.

### 1.3.2 Определение дефекта рельса для рельсового пути грузоподъемных кранов. Признаки недопустимых дефектов и повреждений рельсов.

Действовавшая до 1992 года редакция «Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» не содержала требований к состоянию рельсов.

Прежде чем говорить о «допустимых» или «недопустимых» дефектах рельсового кранового пути, необходимо сформулировать само понятие дефекта. Используя некоторые из формулировок, приведенные в предыдущем разделе данной работы, введем ряд новых терминов и определений, которые ранее не применялись.

Под дефектом или повреждением рельса далее будем понимать нарушение,

вызванное любым отклонением его геометрии или показателей назначения от норм, соблюдение которых обеспечивает работоспособное состояние рельса. Очень важно отметить, что по аналогии с определением дефекта, принятом на железнодорожном транспорте [1], «отсчет» или «признак наличия» дефекта начинается от работоспособного состояния рельса, т.е. отклонения рельса, находящиеся в пределах допусков соответствующих стандартов или технических условий при прокатке, по механическим или химическим свойствам дефектами не являются.

Под отказом рельса, который вызван дефектом или повреждением, далее будем понимать нарушение, при котором без проведения ремонта или замены рельса исключается разрешение передвижения крана (грузовой тележки) как с грузом, так и без груза.

Заметим, что применительно к рельсам кранового рельсового пути мы не будем вводить понятия «полного» или «частичного» отказа, ибо в отличие от железнодорожного транспорта при движении крана невозможно уменьшить номинальную скорость передвижения (без изменения параметров приводов механизма передвижения) или уменьшить грузоподъемность без оснащения его механизма подъема ограничителем грузоподъемности.

По аналогии с классификацией, принятой на железнодорожном транспорте, рельсы, в зависимости от их повреждения и дефекта, будем подразделять на остродефектные и дефектные.

Остродефектный рельс – это рельс, представляющий прямую угрозу безопасности передвижения из-за возможного разрушения под краном (грузовой тележкой) или схода ходовых колес с рельса из-за его повреждения. После обнаружения остродефектный рельс подлежит либо немедленному изъятию из пути (замене), либо проведению восстановительного ремонта.

Заметим, что в отличие от требований к «остродефектному» рельсу на железной дороге, при наличии признаков которых рельс подлежит безусловной замене, приведенное определение допускает «проведение восстановительного ремонта». Автору данной работы встречались на практике случаи, когда

лопнувший посередине 12,5 метровый рельс «вылечивался» установкой дополнительных накладок, т.е. организацией добавочного стыка. Учитывая невысокие скорости движения многих кранов, такое ремонтное техническое решение на практике можно считать вполне допустимым.

Дефектный рельс – это рельс, у которого в процессе эксплуатации произошло, как правило, постепенное снижение служебных свойств ниже нормативного уровня, однако еще обеспечивается безопасный пропуск крана (или грузоподъемной тележки) в течение ограниченного промежутка времени.

Заметим, что в отличие от требований к «дефектному» рельсу на железной дороге, при наличии признаков которых в ряде случаев уже требуется введение ограничения скорости движения, применительно к кранам допускается их обычная эксплуатация в течение ограниченного промежутка времени.

«Ограниченный промежуток времени» обычно назначают экспертным путем, исходя из фактической группы классификации крана, конкретного вида дефекта (повреждения) рельса при достижении им граничных величин перехода к «остродефектному», например, согласно рекомендаций руководящего документа [117] или действовавших ранее «Правил...» [150]. Дефектные рельсы обычно подлежат замене в плановом порядке.

При разработке редакции «Правил...» [149], было решено привести некоторые признаки браковки рельсов кранового пути.

Поскольку при эксплуатации кранов, как было отмечено выше, регулировка скорости их движения (в основном) может быть реализована только в периоды пуска и торможения, возможность эксплуатации кранов на дефектных рельсах с пониженной скоростью или пониженной грузоподъемностью (без изменения характеристик механизмов крана) реализована быть не может.

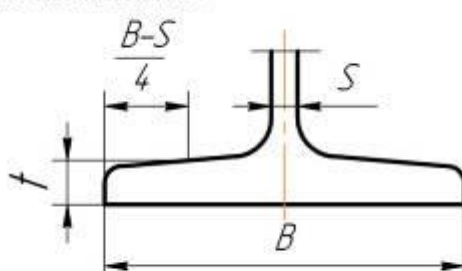
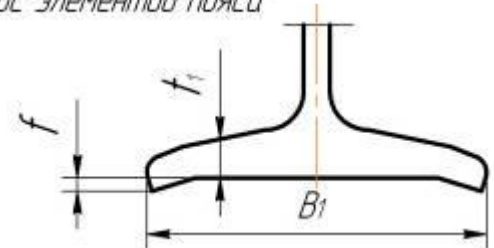
В связи с этим, было решено не выделять отдельно и не вводить в «Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов» оба определения: «остродефектные» и «дефектные» рельсы, поскольку на последних, как было отмечено выше, разрешена нормальная эксплуатация крана в течение «ограниченного промежутка времени».

Сам термин «остродефектный рельс» в терминологии «Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов», а также РД 10 –112 (части, касающиеся кранов на рельсовом ходу) было решено не использовать, и в качестве критериев браковки рельсов опорных кранов применить только два обобщенных критерия (признака) [149]:

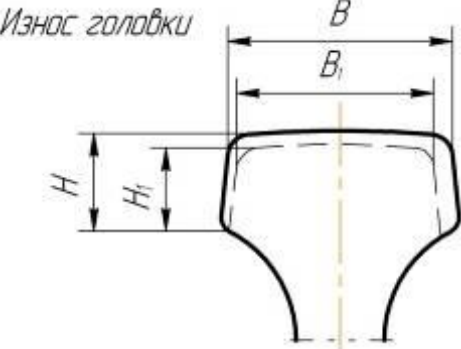
- наличие трещин и сколов любых размеров;
- наличие вертикального, горизонтального или приведенного (вертикального плюс половина горизонтального) износа головки рельса более 15% от соответствующего размера неизношенного профиля.

Это решение было реализовано в 1991 году, когда в качестве браковочных признаков рельсов в Правилах [149], а затем и в [150] были введены только отличительные признаки остродефектных рельсов, приведенные в таблице 1.6 данной работы.

Таблица 1.6 – Браковочные показатели рельсов крановых путей [149, 150]

| Наименование узла (детали) рельсового пути                                                 | Дефект (повреждение)                                                                                                                                                                                                                            | Браковочный показатель, при котором рельс должен быть забракован                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Пояс монорельсового пути для электроталей (тельферов) и подвесных монорельсовых тележек | <p><i>Размеры номинальные</i></p>  <p><i>Износ элементов пояса</i></p>  | $\Delta B = B - B_1$ $\Delta B \geq 0,05B$<br>$\Delta t = t - t_1$ $\Delta t \geq 0,2t$<br>$f \geq 0,15t$ |

## Продолжение таблицы 1.6

|                                                                                 |                                                                                    |                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2. Рельс крановый или железнодорожный для рельсового пути грузоподъемного крана |  | $\Delta H = H - H_1 \geq 0,15H$ $\Delta B = B - B_1 \geq 0,15B$ <p>Приведённый износ</p> $\Delta H(\%) + 0,5\Delta B(\%) \geq 15\%$ |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Следует отметить, что если оценке износа подвергается крановый рельс в виде квадратного или прямоугольного профиля, то в качестве  $H$  и  $H_1$  принимают, соответственно, его первоначальную и изношенную величину.

Практика применения сформулированных браковочных показателей как в нашей стране, так и в некоторых других странах СНГ (например, Белоруссии, Казахстане, Узбекистане), начиная с 1992 года показала их достаточную эффективность.

### 1.3.3 Статистические характеристики неровностей рельсового пути. Допуски на отклонения рельсового пути кранов от проектного положения

Прохождение краном любого дефекта или повреждения рельса обычно сопровождается возникновением дополнительной силы определяемой размерами дефекта (повреждения), его протяженностью вдоль направления движения и скоростью движения крана. Чем больше (или протяженнее) дефект или чем выше скорость крана, тем силовое влияние дефекта (неровности) выше.

Кроме дефектов и повреждений каждого из рельсов, неровности кранового рельсового пути «дополняются» отклонениями пути в целом от проектного положения, а также наличием зазоров в стыках при данной конкретной температуре эксплуатации.

В работах различных авторов [6, 10, 51, 84], показано, что такие суммарные неровности кранового рельсового пути имеют случайный характер. В этой связи,

требования к общим допускам на них должны быть сформулированы с учетом основных положений теории анализа случайных процессов. Сформулируем, какими должны быть требования к допускам на статистические характеристики этих случайных функций для так называемого «безопасного» кранового рельсового пути.

Как показывают экспериментальные исследования ряда авторов [6, 10, 51, 84], плавные отклонения или неровности рельсового пути по высоте (разные высоты установки) каждого из рельсов (за исключением резкого изменения профиля рельса в стыках), не сказываются на нормальной (безопасной) эксплуатации кранов и крановых ходовых колес, поэтому нас, в первую очередь, будут интересовать неровности рельсового пути в плане.

Для удобства дальнейшего изложения введем определения неровностей кранового рельсового пути в плане. Под неровностями  $\eta_{1P}$  и  $\eta_{2P}$  будем понимать отклонения первого и второго рельсов от проектных отметок в плане, а суммарной неровностью  $\eta$  будем характеризовать отклонение в плане колеи кранового рельсового пути в целом.

Первым основным требованием для крановых рельсовых путей является наличие близости к нулю средних и среднеквадратичных значений неровности колеи  $\eta$ . На практике это требование выполнить очень сложно, ибо появление местных отклонений рельсов является объективным процессом, связанным как с возможным изменением конфигурации оснований строительных конструкций, так и с постепенным износом головок рельсов.

Допустимый уровень средних  $\bar{\eta}$  и среднеквадратичных значений неровности колеи кранового рельсового пути  $\sigma_{\eta}$  может быть назначен лишь тогда, когда дополнительно известны данные о плотности распределения этих отклонений.

В большинстве случаев, как показывают исследования ВНИИПТМАШ и ЦНИИСК [6, 10], распределения неровностей хорошо описываются нормальным законом. Тогда с вероятностью 0,997 можно допустить отклонение размера колеи в плане со следующими параметрами [87, 55]:

$$|\eta \pm 3\sigma_\eta| \leq |P_3| ; \quad (1.1)$$

где  $P_3$  – допуск на ширину колеи, который может быть принят в качестве «безопасного» или нормального по условиям эксплуатации грузоподъемных кранов.

Условие (1.1) нельзя признать достаточным, поскольку оно не всегда совпадает с величиной свободного зазора  $a$ , определяемого по следующей формуле [37]:

$$a = (b_K - b_P) / 2 ; \quad (1.2)$$

где  $b_K$  и  $b_P$  – соответственно, ширина дорожки качения кранового колеса и ширина головки кранового рельса, мм.

Движение кранового колеса по рельсу (движение без заклинивания) будет происходить до тех пор, пока величины сужения или расширения колеи не превысят величины свободного зазора между ребордой колеса и боковой гранью головки рельса.

Если величина

$$a \leq 2|P_3| ; \quad (1.3)$$

то «безопасная» или нормальная эксплуатация крана, при которой не произойдет вероятного «распора» (наружу или внутрь) колеи крана, будет обеспечена [55].

На достаточно прямолинейных участках пути при равномерной компенсации активных сил силами сопротивления движению, для кранов с хорошо выставленными ходовыми колесами, как показывают результаты экспериментов [5, 48, 65, 83], продолжительность контакта реборд с рельсами невелика. При наличии дефектов и искривлений рельсов характер движения крана может существенно меняться и на случайный процесс колебаний при движении крана накладываются вынужденные частичные «повороты» или «сдвиги» крана поперек пути. Все это приводит к увеличению времени контакта реборд крановых колес с боковыми гранями головок рельсов и, как следствие, к их взаимному износу.

Указанное обстоятельство позволяет обосновать важное требование к периоду затухания автокорреляционных функций неровностей  $\eta_{1P}$ ,  $\eta_{2P}$  и  $\eta_{2P}$ , которое можно сформулировать в следующем виде: с целью уменьшения вероятности «сдвижки» крана поперек пути для отрезков (интервалов) пути, равных длине базы крана, необходимо иметь близкие к нулю значения автокорреляционных функций рассмотренных неровностей.

Физический смысл сформулированного требования заключается в том, что если в текущий момент времени  $t$  под первой (по направлению движения) парой колес крана имеет место значительное отклонение рельсов от проектной отметки, то вероятность такого же отклонения под второй парой колес крана должна быть близка к нулю.

Выполнение данного требования на практике приводит к необходимости минимизации уровня и ограничения протяженности локальных искривлений рельса, которые не должны быть больше длины базы крана.

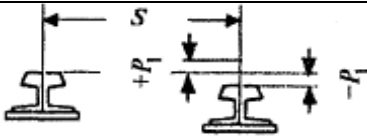
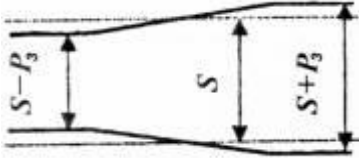
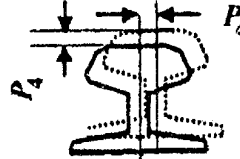
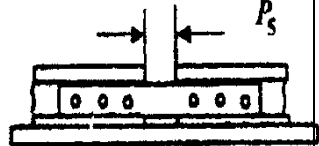
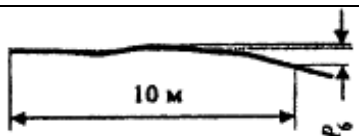
Анализируя разнообразные статистические оценки и существующие нормы на отклонение крановых рельсовых путей (Таблица 1.7 [184]), можно заметить, что среди них отсутствует показатель постоянства размера колеи. Из общего допуска на отклонение ширины колеи  $\pm P_3$ , невозможно сделать вывод о количественной оценке «нарушений» проектного размера колеи крана, т.е. о степени постоянства этого размера на всем участке движения крана.

Таким показателем «постоянства размера колеи» можно считать коэффициент взаимной корреляции  $r_{\eta_1\eta_2}$  неровностей  $\eta_{1P}$  и  $\eta_{2P}$ . Особенно важно сохранить постоянный размер колеи по всей длине участка движения крана при высоких величинах среднеквадратичных значений неровности колеи кранового рельсового пути  $\sigma_\eta$  и высоких скоростях движения крана. Это требование выполняется при наличии высокой взаимной корреляции отклонений каждого из рельсов в плане, т.е. когда  $r_{\eta_1\eta_2} \rightarrow 1$ . Данные о коэффициенте взаимной корреляции  $r_{\eta_1\eta_2}$  неровностей  $\eta_{1P}$  и  $\eta_{2P}$  можно получить по результатам статистической обработки данных планово-высотной съемки рельсового

кранового пути (см. проект 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.).

Получив любым из экспериментальных способов массив численных данных о неровностях рельсового кранового пути с суммарной неровностью в плане  $\eta$ , его можно подвергнуть численному дифференцированию, в результате которого получить новый массив данных скорости изменения суммарной неровности в плане  $\eta'$ . Изменяя и сокращая шаг дискретизации проведенных замеров вдоль кранового рельсового пути, можно оценить «порядок влияния» не только т.н. плавных отклонений рельса в плане от проектного положения, но даже реальных размеров стыков и дефектов головки каждого из рельсов. Однако на практике обработку статистических данных результатов дискретных замеров неровностей  $\eta_{1P}$  и  $\eta_{2P}$  выполняют достаточно редко. Обычно в этих случаях результаты планово-высотной съемки сравнивают с допусками на отклонение рельсовых путей кранов от проектного положения, приведенных в приложении к [184], что и проиллюстрировано в таблице 1.7 настоящей работы.

Таблица 1.7 – Предельные величины отклонений рельсового пути от проектного положения в плане и профиле [184]

| Отклонение, мм                                                                                        | Графическое представление отклонения                                                | Тип кранов |          |          |            |                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------|----------|------------|------------------------|
|                                                                                                       |                                                                                     | мостовые   | башенные | козловые | портальные | мостовые перегружатели |
| Разность отметок головок рельсов в одном поперечном сечении $P_1$ , мм<br>$S$ - размер колеи (пролет) |    | 40         | 45-60    | 40       | 40         | 50                     |
| Разность отметок рельсов на соседних колоннах $P_2$ , мм                                              |    | 10         | -        | -        | -          | -                      |
| Сужение или расширение колеи рельсового пути (отклонение размера пролета — $S$ в плане) $P_3$         |  | 15         | 10       | 15       | 15         | 20                     |
| Взаимное смещение торцов стыкуемых рельсов в плане и по высоте $P_4$                                  |  | 2          | 3        | 2        | 2          | 2                      |
| Зазоры в стыках рельсов при температуре 0 °С и длине рельса 12,5 м $P_5$                              |  | 6          |          |          |            |                        |
| Разность высотных отметок головок рельсов на длине 10 м кранового пути (общая) $P_6$                  |  | -          | 40       | 30       | 20         | 30                     |

В таблице 1.7:

1. Измерения отклонений  $P_1$  и  $P_3$  выполняют на всем участке возможного движения ПС через интервалы не более 5 м.
2. При изменении температуры на каждые  $10^\circ\text{C}$  устанавливаемый при устройстве зазор  $P_5$  изменяют на 1,5 мм, например при температуре плюс  $20^\circ\text{C}$  установленный зазор между рельсами должен быть равен 3 мм, а при температуре минус  $10^\circ\text{C}$  – 7,5 мм.
3. Величины отклонений для козловых кранов пролетом 30 м и более принимают как для кранов-перегрузателей.
4. При установке импортного крана, величина отклонения  $P_3$  должна быть приведена в соответствие с фактическим зазором между ребордами его ходовых колес (или направляющими роликами, при безребордных колесах) и головкой рельса. Если, например, этот зазор составляет 15 мм, то отклонение  $P_3$  должно быть принято равным 7,5 мм.

#### **1.4 Анализ конструкций специальных кранов, для которых нужны дополнительные критерии оценки их состояния работоспособности в эксплуатации**

В практике проведения работ по техническому диагностированию и оценке надежности грузоподъемных кранов, эксплуатируемых на рельсах, встречаются такие конструкции, которые нельзя продиагностировать и рассчитать, руководствуясь лишь известными методиками и нормативными документами.

В первую очередь, к таким кранам следует отнести грузоподъемные мостовые краны, эксплуатируемые на объектах использования атомной энергии (сокращенно – ОИАЭ) (Рисунок 1.1). Требования безопасности к изготовлению и эксплуатации таких кранов приведены в «Правилах устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии» - НП -043-11 [134].

Например, полярный кран, обслуживающий реакторное отделение современной АЭС (фрагмент крана представлен на фото (Рисунок 1.1) [99]) перемещается по круговому рельсу, содержит вспомогательные механизмы, а также снабжен антисейсмическими устройствами, предотвращающими соскок самого крана и его грузовых тележек в случае возникновения сейсмического толчка. Разумеется, из-за наличия кранового рельса, выполненного в виде окружности, нормативы на отклонения от проектного положения не могут соответствовать требованиям, приведенным в таблице 1.7 и нуждаются в дополнительном обосновании.

Значительную специфику имеют и судовые грузоподъемные краны, устанавливаемые в трюмах некоторых специальных судов. Их конструктивное исполнение также должно исключать соскок с рельсового пути как самого крана, так и его грузовой тележки при движении судна в штормовую погоду. Пример такой конструкции крана приведен на фото (Рисунок 1.2). На фото (Рисунок 1.2), движение грузовой тележки осуществляется с помощью ходовых колес, опирающихся на нижнюю полку двутавра, что обычно используется в конструкциях однобалочных мостовых кранов. Однако, для предупреждения соскока грузовой тележки, а также ее самопроизвольного перемещения вдоль рельсового пути применена зубчатая рейка, снабженная шестерней привода механизма передвижения, имеющего нормально замкнутый тормоз. Шестерня после монтажа грузовой тележки прижимается и входит в зацепление с зубчатой рейкой, что предотвращает ее последующее нежелательное перемещение в вертикальной плоскости. Подобная конструкция реализована и на механизме передвижения самого крана (на фрагменте крана, представленного на рисунке 1.2, не показана).

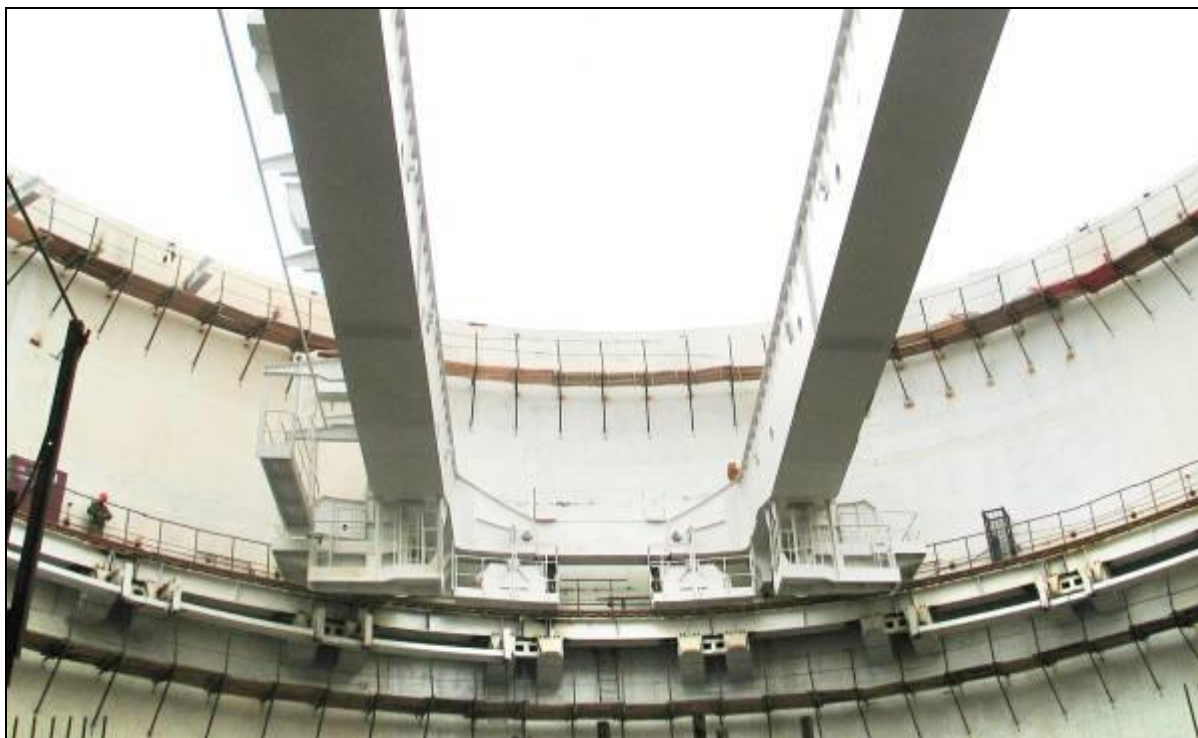


Рисунок 1.1 – Фрагмент конструкции полярного крана реакторного отделения АЭС



Рисунок 1.2 – Пример конструкции судового крана специального назначения

Несколько иное конструктивное решение применяется в случаях

использования на кранах антисейсмической защиты (Рисунок 1.3) [99], которое также препятствует соскоку крана без груза при возникновении сейсмического толчка. Как видно из рисунка 1.3, кран в этом случае удерживается на рельсе специальными скобами, охватывающими головку рельса.



Рисунок 1.3 – Пример конструкции «легкого» крана в сейсмостойком исполнении, снабженного устройством удержания крана в продольном и поперечном направлениях

Таким образом, возникает целый ряд специфических требований, которые следует учитывать при развитии положений технического диагностирования и оценке надежности подобных конструкций грузоподъемных кранов не только на стадии проектирования, но и в последующей эксплуатации. Научное обоснование некоторых подходов, позволяющих выполнять подобные оценки, будет приведено ниже в 1.5 – 1.6 настоящей работы.

## 1.5 Техническое диагностирование металлоконструкций грузоподъемных машин специального назначения. Состояние вопроса

Начиная с 90-х годов прошлого столетия, когда экономическое положение нашей страны было особенно сложным, возникла необходимость в продлении сроков службы различных видов вооружения и грузоподъемных машин специального назначения. В связи с этим, был выполнен ряд исследований, позволяющих установить критерии предельного состояния их металлических конструкций и отдельных узлов, а также разработать методики определения возможности и условий их дальнейшей эксплуатации в составе оборудования ВС РФ.

В частности, первоначально такие работы были выполнены применительно к некоторым элементам металлоконструкций, входящих в состав известных ЗРК С-300, показанным на рисунках 1.4 – 1.6.



Рисунок 1.4 – Пример универсальных передвижных вышек типа 40В6М, входящих в состав ЗРК С-300

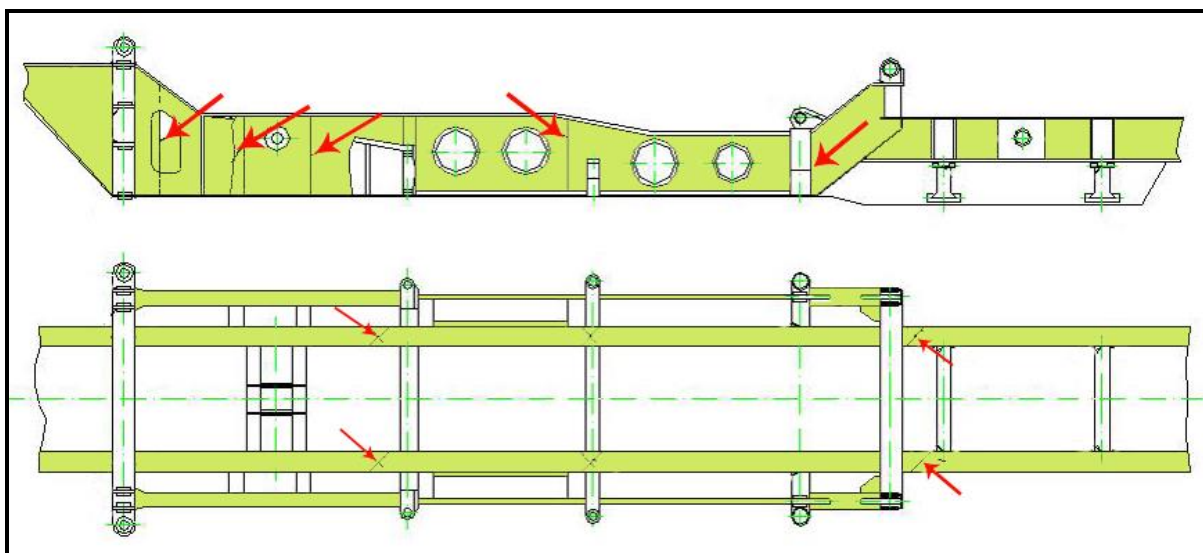


Рисунок 1.5 – Фрагмент металлоконструкции вышки типа 40B6M с указанием мест, подвергаемых неразрушающему контролю

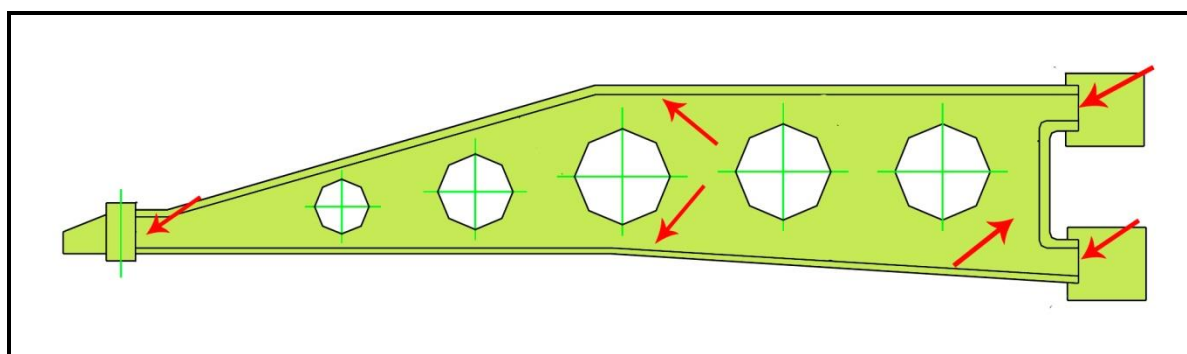


Рисунок 1.6 – Схема металлоконструкции аутригера вышки типа 40B6M с указанием мест, подвергаемых неразрушающему контролю

Затем, в начале 2000-х годов указанные исследования были продолжены с участием автора настоящей работы применительно к грузоподъемным устройствам и механизмам, установленным на кораблях ВМФ РФ, которые легли в основу нормативных документов [109, 110]. В частности, были установлены необходимые объемы технического диагностирования грузоподъемных механизмов кораблей ВМФ РФ, а также отработаны методы, учитывающие специфику конструктивного исполнения их металлоконструкций. Некоторые типовые повреждения и дефекты, выявленные при техническом диагностировании металлоконструкций и сборочных единиц таких устройств,

представлены на рисунках 1.7 – 1.11.



Рисунок 1.7 – Пример наличия локальных остаточных деформаций на стреле килектора (показано желтой стрелкой)



Рисунок 1.8 – Фрагмент шарнирного устройства опоры стрелы килектора. Пример коррозионного повреждения

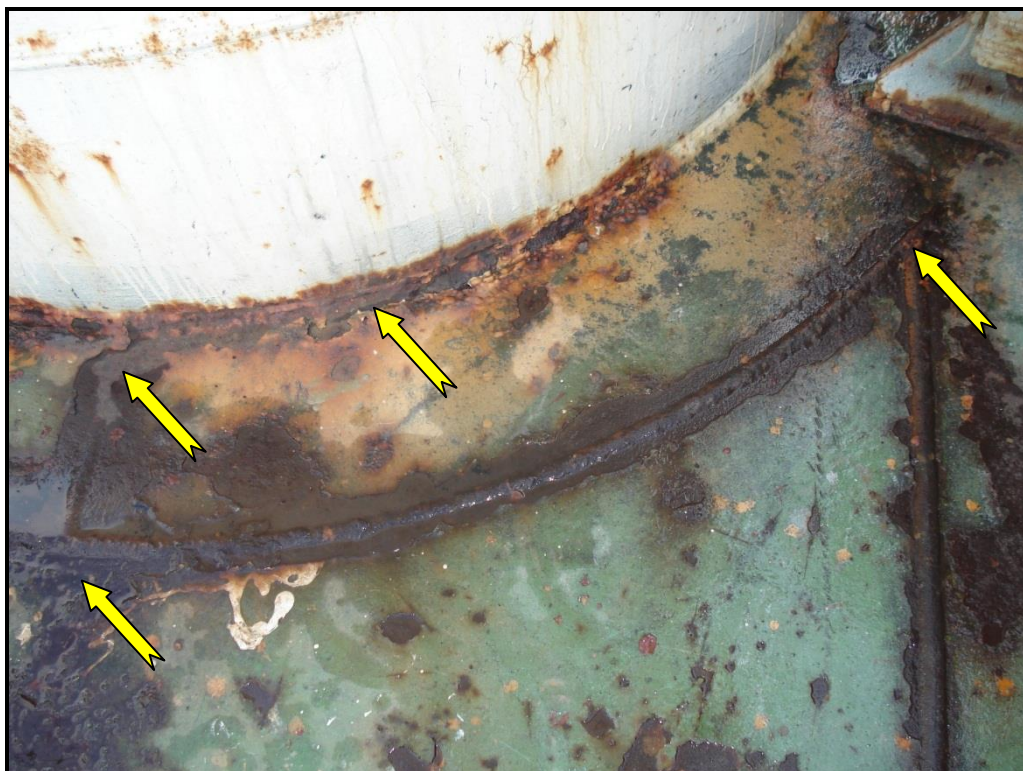


Рисунок 1.9 – Пример коррозионного повреждения сварных швов нижней части портала килектора

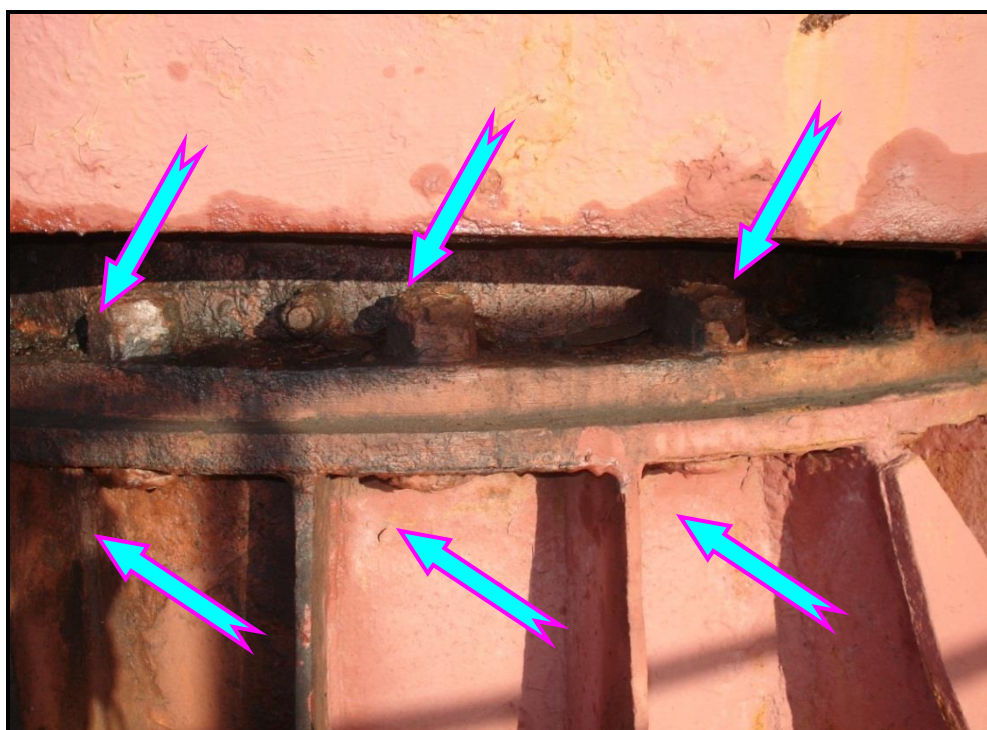


Рисунок 1.10 – Коррозионное повреждение и нарушение целостности болтов опорно-поворотного устройства палубного крана

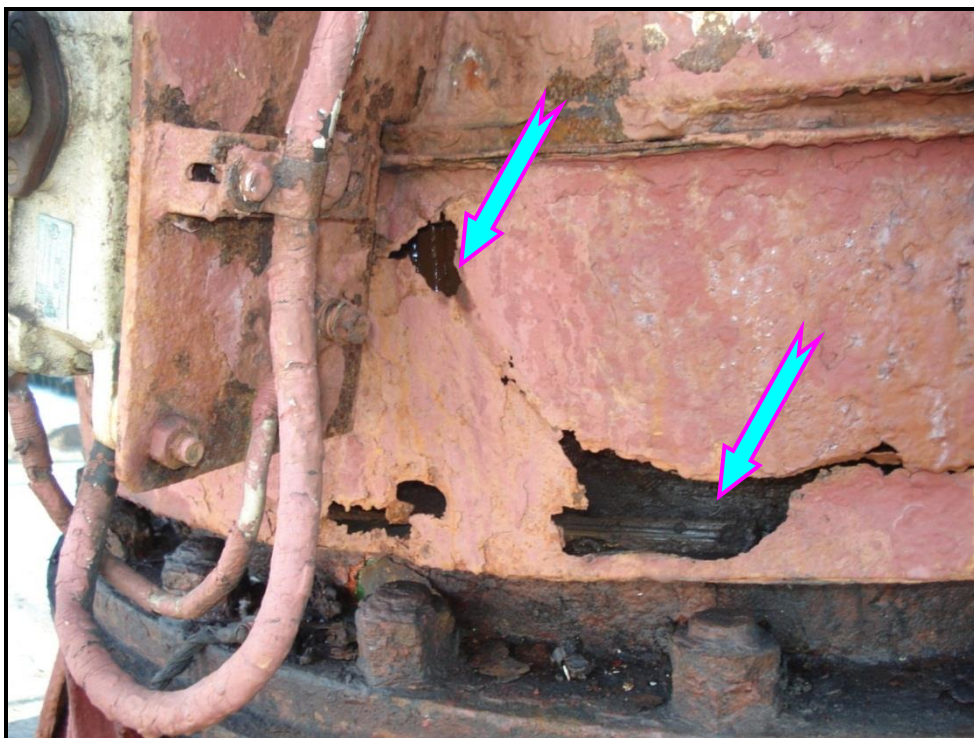


Рисунок 1.11 – Коррозионное повреждение корпусных элементов опорно-поворотного устройства палубного крана

### **1.6 Развитие области применения магнитных методов технического диагностирования**

Результаты анализа действующих методик по техническому диагностированию серии РД 10-112 для различных типов подъемных сооружений (ПС) и иного грузоподъемного оборудования, показали следующее.

- среди разработанных ранее, отсутствует полноценная методика для технического диагностирования железнодорожных кранов, в частности кранов ЕДК, а также специального грузоподъемного оборудования ВС РФ.

- различные части РД 10-112 содержат не одинаковые браковочные показатели для однотипных элементов металлоконструкций и механизмов ПС.

- разработанные Б.Е. Поповым, Е.А. Левиным и др. исследователями методы по коэрцитиметрии металлоконструкций, определяющие границы «пораженного»

металла с целью определения зоны металлоконструкции, требующей последующего усиления, нуждаются 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.).

Что касается методики технического диагностирования кранов типа ЕДК, то она была разработана с участием автора на основе уже имеющихся методик по оценке технического состояния других типов грузоподъемных кранов и имеющихся критериев браковки специфических конструкций механизмов железнодорожных кранов ЕДК [111]. Ее новизна заключается в систематизации и обобщении имеющихся критериев оценки работоспособного состояния, поэтому мы на ней более подробно останавливаться не будем. Что же касается использования магнитных методов контроля, применяемых для определения границ пораженного металла конструкций грузоподъемных кранов различного типа (в том числе и железнодорожных кранов типа ЕДК), а также грузоподъемного оборудования ВС РФ, то на этом остановимся более подробно.

#### 1.6.1 Магнитный контроль состояния элементов металлических конструкций с применением структуроскопов (коэрцитиметров)

Коэрцитивная сила — (от лат. *coercitio* — удерживание), значение напряженности магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферро- или ферромагнитного вещества [20]. Измеряется в А/м (в системе СИ), однако в практике диагностирования конструкций грузоподъемного оборудования чаще применяют производную единицу измерения — А/см. По величине коэрцитивной силы различают следующие магнитные материалы:

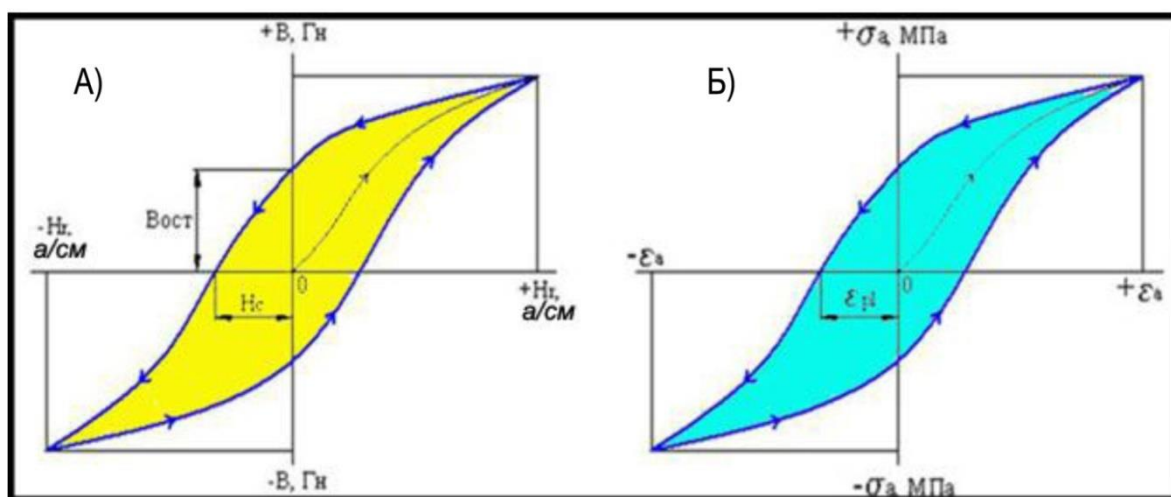
Магнитомягкие материалы — материалы с низкой коэрцитивной силой, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в относительно слабых магнитных полях (до 8000 А/м). После перемагничивания внешне они не

проявляют магнитных свойств, так как состоят из хаотически ориентированных намагниченных до насыщения областей. Примером могут служить различные стали, в том числе и стали, применяемые для изготовления металлоконструкций грузоподъемных кранов. Чем большей коэрцитивной силой обладает магнит, тем он устойчивее к размагничивающим факторам.

Магнитотвердые материалы – материалы с высокой коэрцитивной силой, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряжённостью в тысячи и десятки тысяч а/м. После намагничивания магнитно-твердые материалы остаются постоянными магнитами из-за высоких значений коэрцитивной силы и магнитной индукции. Примерами являются редкоземельные магниты *NdFeB* и *SmCo*, бариевые и стронциевые магнитотвердые ферриты.

Магнитный метод неразрушающего контроля (далее НК) механических свойств металла, на основе коэрцитивной силы для ферромагнитных материалов основан на корреляции между их магнитными и физико-механическими свойствами. Оказалось, что и магнитные, и физико-механические свойства ряда сталей одновременно зависят от одних и тех же факторов: химического состава, режима термической обработки, пластической деформации, микро- и макронапряжений, расположения дислокаций и др.

В случае углеродистых низколегированных сталей вышеперечисленные факторы одновременно и однозначно влияют на механические и магнитные свойства металла (Рисунок 1.12) [20, 121]. Поэтому магнитный метод НК механических свойств металла, на основе коэрцитивной силы, может успешно применяться для контроля напряженно-деформированного состояния металла, уровня пластической деформации и усталостных повреждений наиболее нагруженных узлов металлоконструкций, работающих в условиях длительного циклического нагружения.



А) Магнитная петля гистерезиса

$H_C$  – коэрцитивная сила, а/см;

$B_{ост}$  – остаточная магнитная  
индукция, Гн;

Б) Механическая петля гистерезиса

$\varepsilon_{pl}$  – остаточная деформация, мм;

$\sigma_a$  – амплитуда напряжений, МПа;

Рисунок 1.12 – Иллюстрация корреляции процессов магнитного и механического нагружения стальных образцов

Магнитные свойства стальных металлоконструкций при циклическом нагружении формируются в условиях сложно напряженного состояния под влиянием растягивающих, изгибающих нагрузок и крутящих моментов. Стальные металлоконструкции как бы собирают и хранят информацию, однозначно связанную с максимальными величинами действовавших нагрузок, в результате чего структура металла стальной детали конструкции выполняет функции своеобразного запоминающего датчика пикового значения силы, то есть, идет процесс накопления повреждений и микропластической деформации, приводящей к разрушению металла с последующей потерей несущей способности конструкции. А ряд магнитных параметров, однозначно связанных с количеством нарушений структуры металла, таким образом, являются своеобразным отображением механического режима нагружения конструкции.

На основании проведенного анализа, в качестве основного контролируемого магнитного параметра в рамках данной работы, как сказано выше, выбрана

величина коэрцитивной силы  $H_C$  (а/см), так как она однозначно связана с остаточной пластической деформацией  $\varepsilon_{pl}$  при статическом и циклическом нагружении металлоконструкций в процессе эксплуатации [145, 146]. Ранее отмечено рядом исследователей, что в периоды изготовления металлоконструкций, монтажа и последующей эксплуатации, связанными с нагружением их элементов, происходит возрастание текущего значения коэрцитивной силы ( $H_C$ ) [145, 146, 147].

Таким образом, при наличии корреляционных зависимостей между  $H_C$  и пластической деформацией, по величине коэрцитивной силы, можно вести контроль накопления повреждений в металле, получать данные об упругопластической деформации металла, а также прогнозировать его усталостную долговечность.

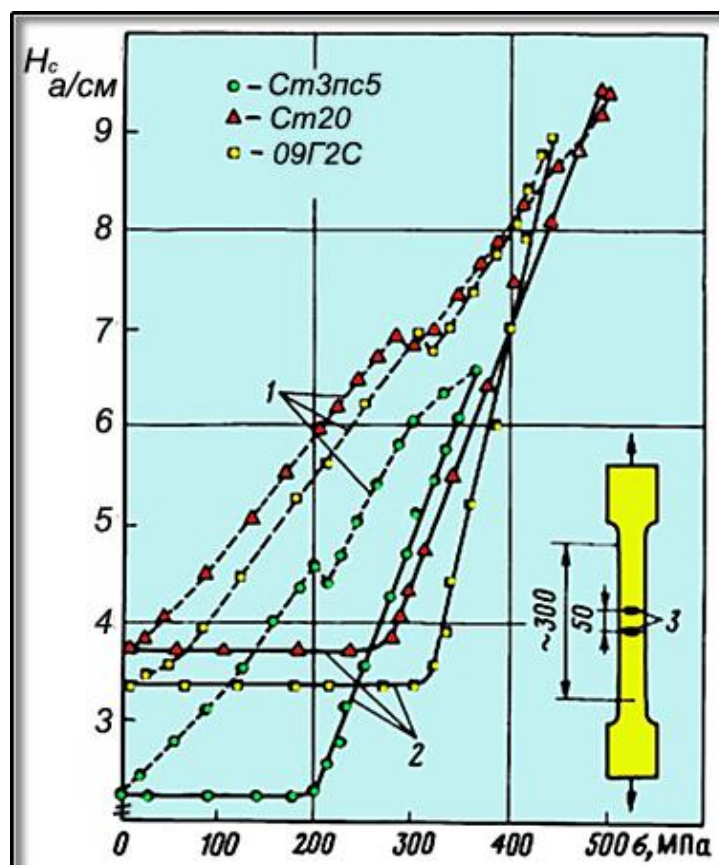
Единство природы намагничивания металла, упругопластической деформации, накопления повреждений и роста коэрцитивной силы позволяет моделировать на образцах процесс нагружения металла при эксплуатации в условиях сложнапряженного состояния.

На рисунке 1.13 [121, 145, 146] показаны зависимости коэрцитивной силы  $H_C$  и действующих напряжений при статическом растяжении плоских образцов из сталей СтЗпс5, Ст20 и 09Г2С.

При непрерывном растяжении стандартных образцов толщиной 5-10 мм в упругой области кривой нагружения коэрцитивная сила возрастает пропорционально приложенному напряжению до величины  $H_{CT}$ , соответствующей пределу текучести  $\sigma_T$ . В области текучести и разупрочнения металла начинается необратимая перестройка доменной структуры за счет разворота 90- и 180-градусных доменных границ. В результате образуется небольшая площадка, или "зуб" текучести.

При увеличении нагрузки в области необратимых деформаций рост коэрцитивной силы продолжается одновременно с формированием новой доменной структуры и активным накоплением повреждений в металле.

Упрочнение металла на стадии, так называемого «предразрушения», вызывает окончательную перестройку доменной структуры, рост коэрцитивной силы до максимальных значений (в зависимости от марки стали) и сопровождается появлением хрупких микротрещин на стыках и границах зерен.



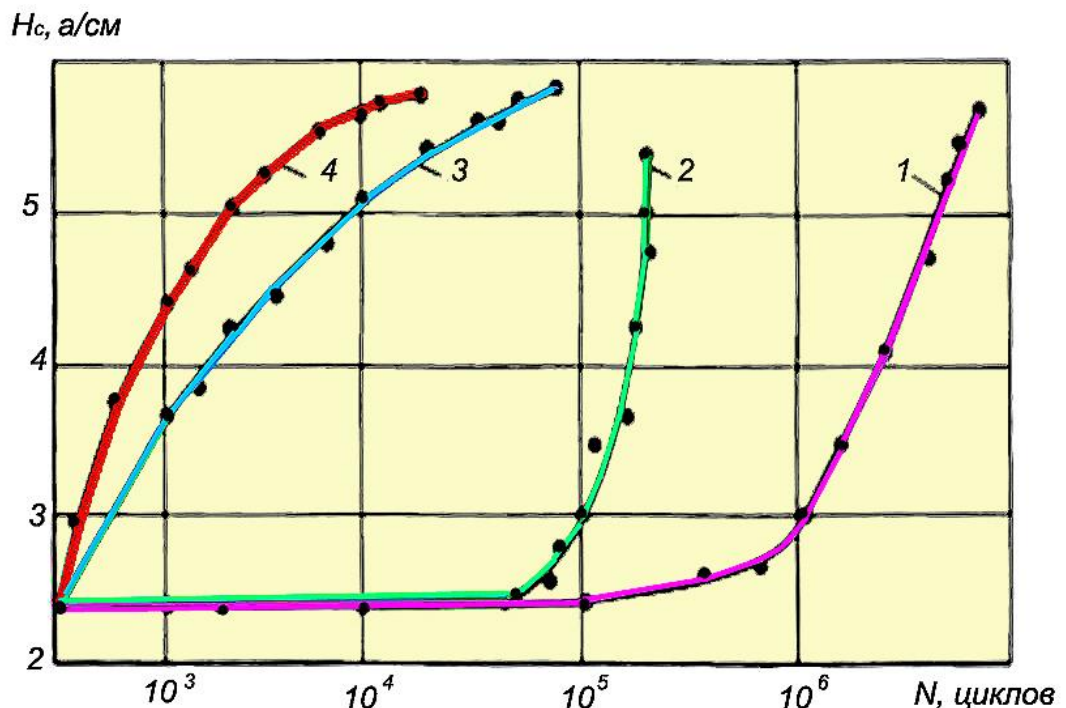
1 — результаты измерений под нагрузкой; 2 — результаты измерений после разгрузки; 3 — места установки полюсных наконечников коэрцитиметра

Рисунок 1.13 – Зависимость коэрцитивной силы и действующих напряжений при испытании образцов на растяжение

После образования и раскрытия магистральной трещины происходит частичное снятие напряжений в зоне развития трещины и снижение коэрцитивной силы. Максимальные ее значения  $H_{CB}$  соответствуют пределу прочности металла  $\sigma_B$ . При ступенчатом нагружении и измерении коэрцитивной силы после разгрузки образца, когда магнитный параметр реагирует только на остаточные (внутренние) напряжения и деформации, в упругой области коэрцитивная сила

остается постоянной, равной исходной, а после достижения предела текучести она растет по линейному закону. При этом энергия, затрачиваемая на работу разрушения металла и максимальные значения коэрцитивной силы в обоих случаях практически одинаковы.

Такой энергетический подход правомерен и при анализе усталостного разрушения металла. Подтверждение этому получено при испытании (циклическом нагружении плоских образцов из стали ВСт3сп5) при цикле с амплитудой, моделирующей легкий, умеренный и тяжелый режимы работы металлоконструкций ПС [121] по классификации стандарта [106]. Образцы из стали ВСт3сп5 (Рисунок 1.14) [121] сначала испытали при нагружении  $\sigma = 200 \cdot \text{МПа}$ , потом, соответственно, при напряжениях  $\sigma = 250 \cdot \text{МПа}$ ,  $\sigma = 300 \cdot \text{МПа}$  и, наконец,  $\sigma = 350 \cdot \text{МПа}$ , таким образом, охватив весь диапазон нагружений, которые могут испытывать крановые металлоконструкции различных групп классификации (режимов работы) во время эксплуатации.



1 –  $\sigma = 200 \cdot \text{МПа}$ ; 2 –  $\sigma = 250 \cdot \text{МПа}$ ; 3 –  $\sigma = 300 \cdot \text{МПа}$ ;

4 –  $\sigma = 350 \cdot \text{МПа}$

Рисунок 1.14 – Зависимость коэрцитивной силы от числа циклов нагружения

Анализ кривых на рисунке 1.14, показал, что зависимости коэрцитивной силы от числа циклов нагружения во многом повторяют известные кривые роста повреждаемости стали от усталостного нагружения.

Почему же все-таки из всего многообразия оценок с применением методов неразрушающего контроля [145, 146], нами был выбран именно данный метод НК (внешний вид структуроскопа показан на рисунке 1.15)?



Рисунок 1.15 – Внешний вид структуроскопа КРМ-Ц-К2М (слева) и ультразвукового дефектоскопа А1212М (справа)

Поясним это на примере анализа двух различных методов НК: акустической эмиссии и измерения коэрцитивной силы (Рисунок 1.16) [121].

Анализ кривых на рисунке 1.16, показывает, что в области малоциклового усталости (до  $10^4$  циклов), обе кривые плавно нарастают с различными углами наклона, т.е. оба метода могут быть использованы для оценки накопления циклов нагружения. Однако при дальнейших оценках результатов проведенного эксперимента зафиксирован «провал» синей кривой, полученной методом акустической эмиссии («провал» синей кривой показан красной стрелкой на

рисунке 1.16), что не дает оснований использовать данный метод в области высоких значений числа циклов нагружений. При этом поведение красной кривой, полученной измерением коэрцитивной силы, подобного «провала» не имеет и ее последующее возрастание объективно отражает характер дальнейшего усталостного нагружения образцов.

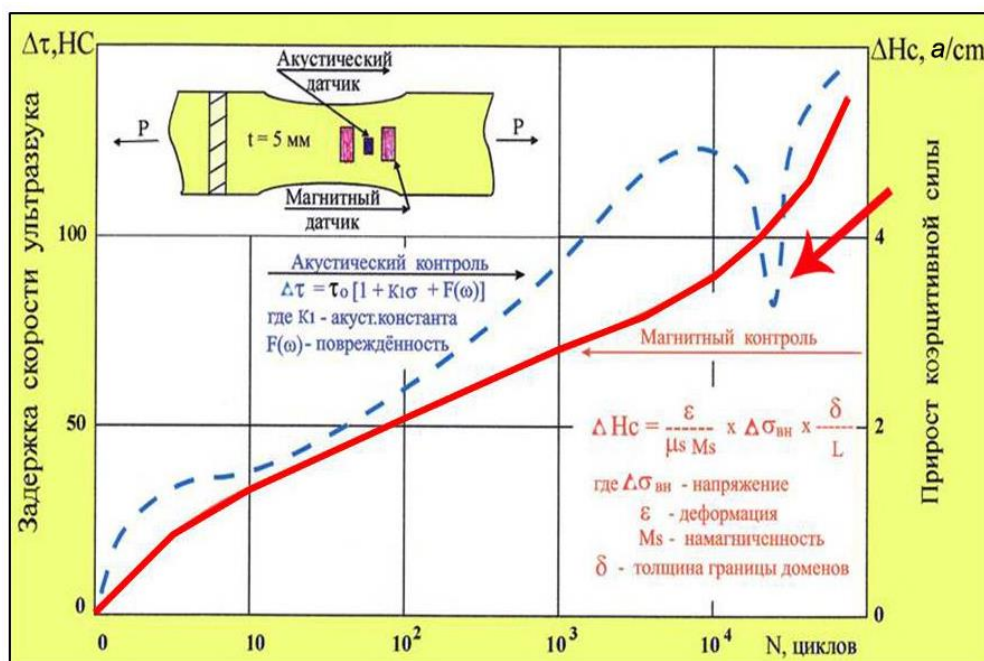


Рисунок 1.16 – Сравнительные результаты НК, полученные методами акустической эмиссии и измерения коэрцитивной силы при усталостных испытаниях образцов из малоуглеродистой стали ВСт3сп5

Для общей оценки состояния металлоконструкций ПС при техническом диагностировании, как утверждают авторы данного метода [121], достаточно провести анализ распределения коэрцитивной силы. Выявить наиболее нагруженные элементы, имеющие  $H_{C \text{ MAX}}$  и сравнить полученные значения коэрцитивной силы со значениями  $H_{C0}$  ненагруженной стали,  $H_{CT}$  – стали, находящейся на стадии начала пластических деформаций и  $H_{CB}$  – стали, достигшей предела прочности, а также с соответствующими пределами текучести и прочности для стали, из которой изготовлены несущие (расчетные) элементы

диагностируемой металлоконструкции. Сопоставив средние и максимальные значения коэрцитивной силы с усталостными номограммами для соответствующих групп классификации (режима нагружения) и марки стали, можно сделать вывод о возможном «остаточном» ресурсе металлической конструкции подъемного сооружения.

Однако, задача оценки так называемого «остаточного ресурса» металлических конструкций при выполнении данной диссертационной работы не ставилась по следующим причинам:

1. На абсолютные цифры «остаточного ресурса» влияет значительное число случайных факторов, например, качество изготовления сварных швов, выдерживание проектной геометрии металлоконструкции, которое позволяет адекватно оценивать распределение полей напряжений при нагружении конструкции и т.п.

2. Кроме известных концентраторов напряжений, которые учитывают при расчете и проектировании металлоконструкций на усталостную прочность, реально существуют дополнительные концентраторы напряжений, возникающие при эксплуатации и ремонтах, влияние которых учесть не всегда представляется возможным.

3. Реальное нагружение любой металлоконструкции подъемного сооружения индивидуально. Оно может соответствовать или не соответствовать расчетному (заявленному). Учесть это можно лишь установкой регистратора параметров (РП), который будет фиксировать наработку с момента ввода ПС в эксплуатацию, однако нормативных алгоритмов подсчета наработки для этих регистраторов в стране пока нет.

Эти задачи, в первом приближении, могут быть решены с использованием данных о сталях, из которых изготовлены металлоконструкции соответствующих грузоподъемных кранов или изделий военного назначения, а также проведением дополнительных измерений коэрцитивной силы.

При этом, поскольку направление полей напряжений в конструкции заранее неизвестно, в каждом из наиболее нагружаемых в процессе эксплуатации мест

металлоконструкции, измерения следует выполнять 2 раза:

- при положении датчика намагничивания вдоль элемента, и
- при положении датчика намагничивания поперек элемента.

Полученные показания структуроскопа (коэрцитиметра), при этом, следует занести в соответствующую графу таблицы.

Казалось бы, приведенная методика [121], полученная при испытаниях стальных образцов достаточно доказательна для получения результатов по оценке ресурса и надежности отдельных элементов металлоконструкций, однако, в ней не все так однозначно, особенно, когда речь заходит о наиболее ответственных металлоконструкциях специального или военного назначения.

#### 1.6.2 Совершенствование методических основ контроля состояния элементов металлических конструкций с применением структуроскопов (коэрцитиметров).

Начало практического применения магнитной структуроскопии (коэрцитиметрии) выявило ряд спорных вопросов, которые необходимо учесть на практике, в частности:

а) перечень сталей, приведенных в работе [121], не содержит ряда сталей, применяемых для изготовления грузоподъемного оборудования специального назначения.

б) полученные характеристики для сталей в работе [121] приведены для толщин 20 мм, в то время как конструкции с меньшими толщинами могут характеризоваться иными параметрами намагничивания.

На основании проведенных исследований выявлено, что текущие показания прибора надо сравнивать с неким «эталоном», изготовленным из данной или аналогичной по свойствам партии стали. В противном случае, не совсем понятно, с чем сравнить полученные результаты: то ли они уже отражают некую «наработку» реальной металлоконструкции, то ли фактические магнитные несоответствия (особенности) физико-механических свойств стали, из которой

они изготовлены. Вопрос этот далеко не праздный, ибо многим реальным конструкциям уже по несколько десятков лет, какая-либо техническая документация на них утеряна и абсолютно отсутствуют данные о возможных заменах стали, если они осуществлялись при изготовлении анализируемых металлоконструкций.

Получение образцов с реальной конструкции для оценки химического анализа и механических свойств также не всегда возможно, ибо часто связано с нанесением концентраторов напряжений на реальную конструкцию, которую после операции изъятия образцов, будет необходимо подвергнуть неизбежному ремонту с применением сварки. Для указания мест, которые могут служить «эталоном» для получения данных об исходных магнитных свойствах материала (стали), из которой изготовлена та или иная металлоконструкция, обратимся к анализу рисунков и схем, приведенных в данном разделе работы.

Например, это может быть верхняя часть оголовка стрелы килектора, показанного на правой части рисунка 1.7 красной стрелкой. Поскольку, верхний блок подвески удержания стрелы находится несколько ниже оголовка, верхняя часть оголовка не нагружается во время эксплуатации и функционально нужна лишь для закрепления опоры нижнего блока. В связи с этим, эта часть металлоконструкции практически сохраняет исходные свойства проката, из которого когда-то изготовили стрелу килектора.

Это относится не только к оголовку стрелы килектора, приведенного на рисунке 1.7, но и ко всем оголовкам стрел кранов стрелового типа, в том числе пневмоколесных (см. показанное красной стрелкой на рисунке 1.17), самоходных, порталных, консольных, а также оконечностям консолей полукозловых и козловых кранов [45, 49, 58].

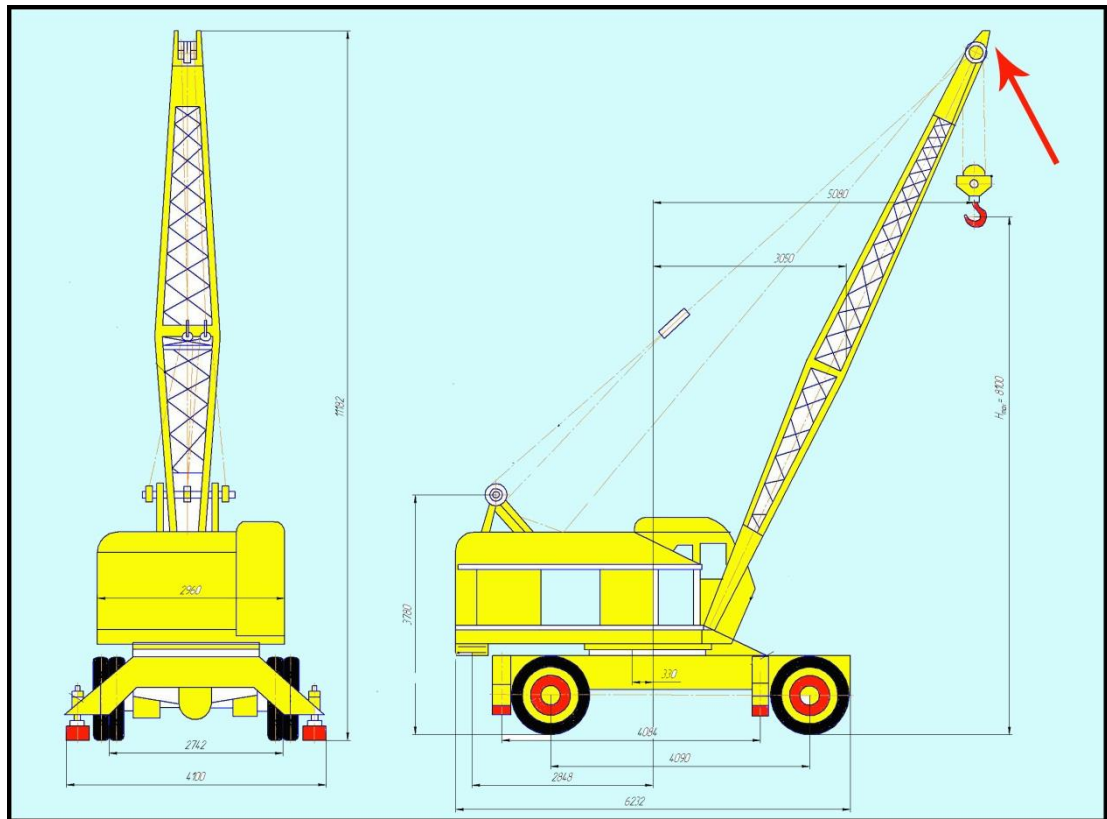


Рисунок 1.17 – Схема внешнего вида пневмоколесного крана КС -4362.

Красной стрелкой показана ненагруженная часть оголовка стрелы крана

Получая информацию о первоначальных магнитных свойствах стального проката, из которого изготовлена металлоконструкция, следует помнить о разбросе его свойств и толщин. Анализ этих измерений, приведенный в разных источниках [121], показывает, что результаты испытаний образцов как малоуглеродистых, так и низколегированных сталей дают разброс по магнитным свойствам, как правило, около 1 а/см. То есть, погрешность получения первоначальных свойств сталей около 10-15% всегда будет присутствовать, особенно в реальных конструкциях, и получить более точные значения экспериментальных коэрцитивных сил, видимо, не представляется возможным.

Дополнительно, из анализа графиков, представленных ранее на рисунке 1.14, хорошо видно, что для малоуглеродистых сталей, которые имеют высокую пластичность, первоначальные циклические нагрузки не существенно изменяют показатели коэрцитивных сил, что позволяет с меньшей погрешностью определить их первоначальные магнитные свойства, однако одновременно, при

этом, возрастает погрешность оценки наработки (циклического нагружения) в начале эксплуатации (вплоть до  $6 \times 10^4$  циклов нагружения).

Вторым наиболее значимым источником погрешностей выполняемых измерений, является разброс толщин сталей, из которых изготовлена реальная металлоконструкция. С одной стороны, стандартами на стальной прокат, из которого изготовлена металлоконструкция, всегда предусмотрен допуск по толщине, а с другой стороны – это конструктивное исполнение металлоконструкции, которое предусматривает различную толщину ее элементов для обеспечения заданного предельного уровня внутренних напряжений во время эксплуатации. Например, известно, что классическая конструкция главной балки мостового крана имеет более толстые пояса, по сравнению с толщинами ее стенок [121].

Дополнительно, измерение коэрцитивных сил сопряжено еще с учетом влияния фактической коррозии (см. примеры коррозионных поражений, представленный на рисунках 1.8 – 1.11), погрешность получения искомых результатов может быть еще выше.

Каким же образом следует учитывать разность толщин элементов, подвергаемых оценкам магнитных свойств? Обратимся для этого к работам В.А. Попова [147], выполненным ранее на Харьковском заводе ПТО им. В.И. Ленина.

Как уже было отмечено выше, первичные значения коэрцитивной силы  $H_{C0}$ , равно как и механические свойства, зависят от многих факторов: химического состава стали, величины зерна, наличия структурной неоднородности, состояния поставки металлопроката (горячекатаный или холоднокатаный прокат, в отожжённом или нормализованном состоянии). Поэтому в методических указаниях [121], допускается разброс значений  $H_{C0}$ , например, для малоуглеродистых сталей типа СтЗсп5 - 2,3-3,2 а/см, для стали 09Г2С - 2,5-4,5 а/см.

На протяжении 10 лет при проведении научно-исследовательских работ по оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкций в

процессе изготовления кранов на Харьковском заводе ПТО им. В.И. Ленина весь поступающий на завод металлопрокат при входном контроле подвергался не только химическому анализу и механическим испытаниям, но и металлографическим исследованиям и замерам коэрцитивной силы  $H_{C0}$ .

После изготовления крановых металлоконструкций составлялась карта магнитного контроля (КМК) на основе замеров значений  $H_C$  в соответствии со схемой контроля. Тем самым определялись остаточные сварочные напряжения.

Таким образом, косвенно оценивалась и технологичность конструкции с одновременным контролем соблюдения технологии производства сварочных работ [147].

В первые годы внедрения магнитной структуроскопии «головной болью» специалистов по неразрушающему контролю была оценка напряжённо-деформированного состояния металлоконструкций с толщиной элемента свыше 20 мм, что особенно важно для кранов горно-металлургического комплекса, работающих в тяжёлом и весьма тяжёлом режимах работы. При наличии признаков деградации металла в отдельных зонах (особенно возле сварных швов) показания приборов явно были занижены.

При разработке переносных коэрцитиметров разработчиками выбирались оптимальные размеры электромагнитов, чтобы глубина проникновения магнитного потока в изделие, которая задаётся сечением магнитных полюсов электромагнита, обеспечивала возможность измерения  $H_C$  для толщин в 6-20 мм. Но и в этом случае, как показали исследования, показания приборов не всегда прямо пропорциональны коэрцитивной силе при изменении толщины металла.

При анализе результатов входного контроля наблюдался значительный разброс значений  $H_C$  (Рисунок 1.18) в зависимости как от исходного состояния проката (величины зерна), так и толщины [147].

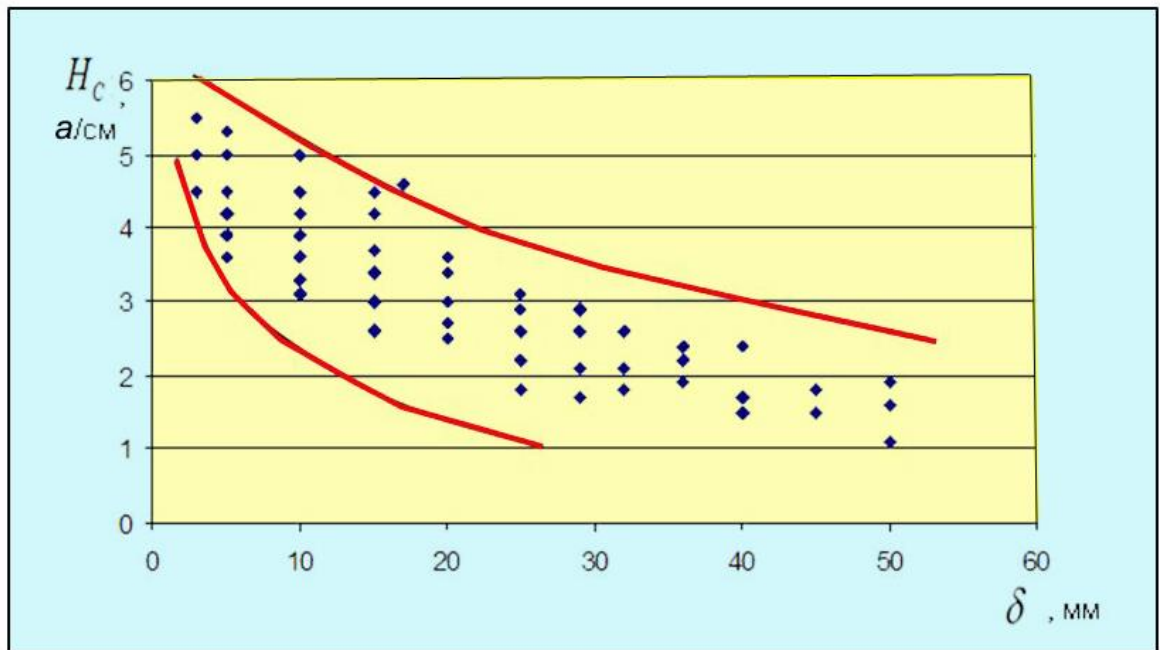


Рисунок 1.18 – Зависимость изменений значений  $H_{C0}$  (по показаниям структуроскопа КРМ-Ц-К2М) от толщины проката из стали 09Г2С

Для решения возникшей проблемы измерения  $H_C$  в разных по толщине элементах металлоконструкции стали применять паспортизированные экспериментальные образцы из различных марок сталей со ступенчатым (пошаговым) изменением сечений с известными механическими свойствами, химическим составом, микроструктурой и значением  $H_C$  в каждом сечении образца. При этом прокат каждой марки стали разделялся на группы, в том числе, по величине зерна, состоянию поставки и термообработке.

После математической обработки результатов измерений по методике [147] для каждого образца определялись аппроксимирующие функции, которые положены в основу программного обеспечения интерпретации замеров  $H_C$ , получаемых на объекте.

Например, на рисунке 1.19 показана зависимость значений  $H_C$  (по показаниям прибора КРМ-ЦК-2М) от толщины металлопроката для сталей марок 09Г2С и Ст3 в состоянии поставки и для стали 10ХСНД на ступенчатом образце, вырезанном из обечайки трубы крана-перегрузателя (после аварии) из зоны с

наибольшим значением  $H_C$  [147].

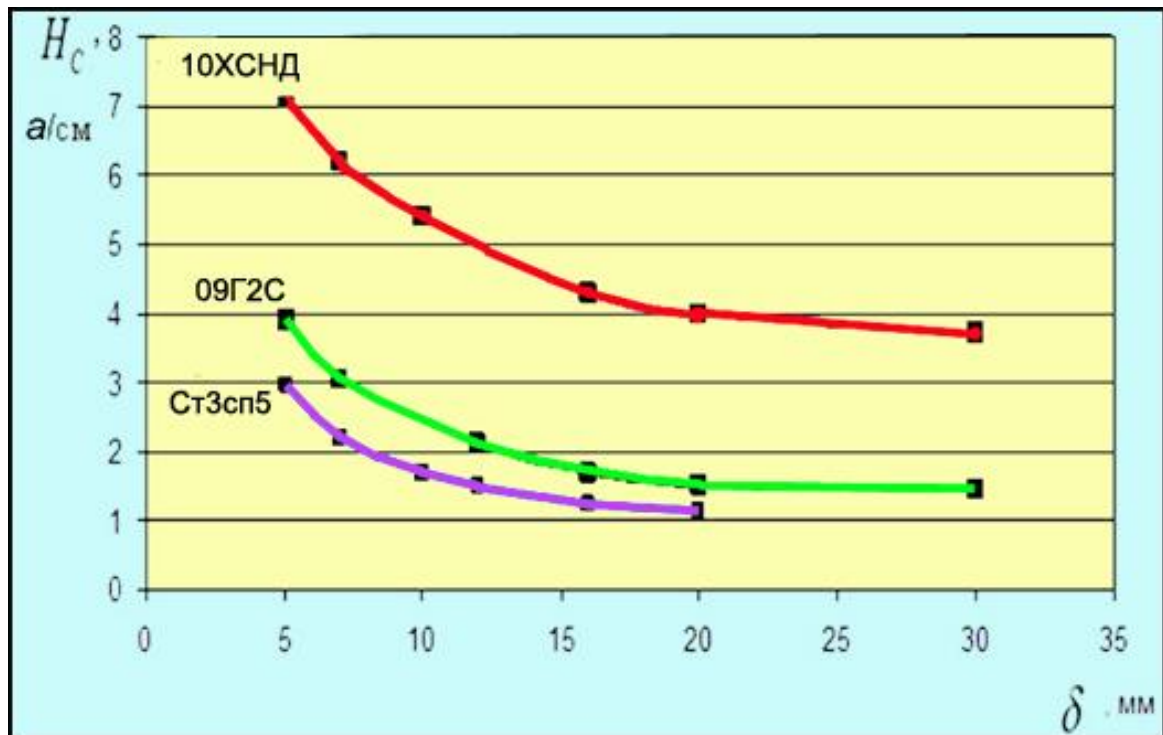


Рисунок 1.19 – Зависимость изменений значений  $H_C$  от толщины металлопроката ( $\delta$ , мм) для разных марок сталей

В результате проведенных работ, был создан банк данных паспортизированных образцов, в том числе из металлопроката, вырезанного из элементов металлоконструкций на различных стадиях деградации металла, в том числе, из зон разрушения металлоконструкций после аварий.

Из приведенных выше примеров следует, что дальнейшее развитие магнитного контроля для оценки напряженно-деформированного состояния металлоконструкций, должно строиться не только на основе совершенствования магнитных структуроскопов, но и с применением компьютерных технологий, позволяющих:

- а) фиксировать показания приборов в процессе контроля, и
- б) осуществлять интерпретацию полученных значений в автоматизированном режиме при контроле разных по толщине элементов металлоконструкций, с учетом различных марок сталей.

В таблице 1.8 приведены значения  $H_{C0}$ ,  $H_{CT}$  и  $H_{CB}$  для ряда сталей, применяемых в краностроении [121] и дополнена нами выделенной строкой со сталью ВСтГпс5, которая применялась для изготовления металлоконструкций грузоподъемных машин специального назначения. Анализ статистических данных, полученных при магнитной диагностике нескольких сотен подобных сооружений из традиционных сталей, позволил сформировать базу данных и установить критерии оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкций.

В зависимости от принятых в нормативно-технической документации критериев при расчете конструктивной прочности несущих элементов критические значения коэрцитивной силы  $H_{C\text{уст}}$  могут быть установлены на уровне максимальных  $H_{CT}$  или  $H_{CB}$ , соответствующих прочностным свойствам стали, из которой выполнены металлоконструкции [121].

При эксплуатации металлические конструкции, как правило, работают в условиях сложнапряженного состояния. Однако магнитный контроль вдоль направления действия главных напряжений (деформаций) позволяет определить максимальные действующие внутренние напряжения, а с учетом реального режима нагружения оценить, так называемый, «остаточный» ресурс отдельных несущих элементов и всей металлоконструкции в целом.

Таблица 1.8 – 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 | $\delta$ , % | $H_{C0}$                        | $H_{CT}$   | $H_{CB}$   | $H_{C\text{ уст}}$ |
| Ст3            | 350                   | 210                  | 22           | 2,5                             | 5,0        | 6,0        | 5,8                |
| ВСтЗсп5        | 400                   | 240                  | 25           | 3,0                             | 5,5        | 6,5        | 5,9                |
| <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>         |
| 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               |

где:  $H_{C0}$  – исходное значение коэрцитивной силы;

$H_{CT}$  – значение коэрцитивной силы соответствующей уровню внутренних напряжений, равных пределу текучести стали;

$H_{CB}$  – значение коэрцитивной силы, соответствующей уровню внутренних напряжений предела прочности стали  $\sigma_B$ .

$H_{C\text{ уст}}$  – значение коэрцитивной силы, соответствующей уровню внутренних напряжений критическому (по усталости).

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 [121]. Такой информационной чувствительности к процессам деградации металла пока не выявлено ни у какого иного параметра неразрушающего контроля. Более того, если металл при нагружении испытал в каком либо локальном объёме хотя бы однократное воздействие нагрузки, превышающей значение предела текучести

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

$\sigma_{0,2}$ , то при последующем измерении, значение  $H_C$  в этом месте уже никогда не вернётся к исходному значению  $H_{C0}$  [121], т.к. в этой области металл переходит из области упругих (обратимых) деформаций в упруго-пластическую область диаграммы нагружения [121]. По сути значения  $H_{C0}$ ,  $H_{CT}$  и  $H_{CB}$  являются такими же характерными значениями для каждой марки металла, как и механические характеристики  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_B$ , а отношение прироста значений  $\Delta H_C$  к рассматриваемому интервалу времени ( $\Delta T$ ) определяет скорость накопления повреждений в структуре металла от возникающих напряжений.

### 1.6.3 Методика технического диагностирования металлических конструкций и ее использование при диагностике металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения

Данная методика разработана группой авторов под руководством профессора А.С. Липатова при участии автора данной работы.

1.6.3.1. До начала выполнения работ по техническому диагностированию ответственных металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения изготавливаются стальные образцы, конфигурация которых приведена на рисунке 1.20 из стали, которая указана в паспорте (формуляре) изделия. Для рассмотренного примера – согласно формуляру, сталь 09Г2С.

Размеры площадок, показанные на рисунке 1.20 синим цветом, должны обеспечивать возможность установки датчика структуроскопа (коэрцитиметра) и обеспечивать дополнительные свободные границы площадки, не занятые датчиком, не менее 5 мм с каждой стороны, чтобы при проведении измерений на показания прибора не повлияли изменения механических свойств металла на границах образца, возникающие в результате его механической обработки.

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 1.20 [147], из имеющихся в наличии.

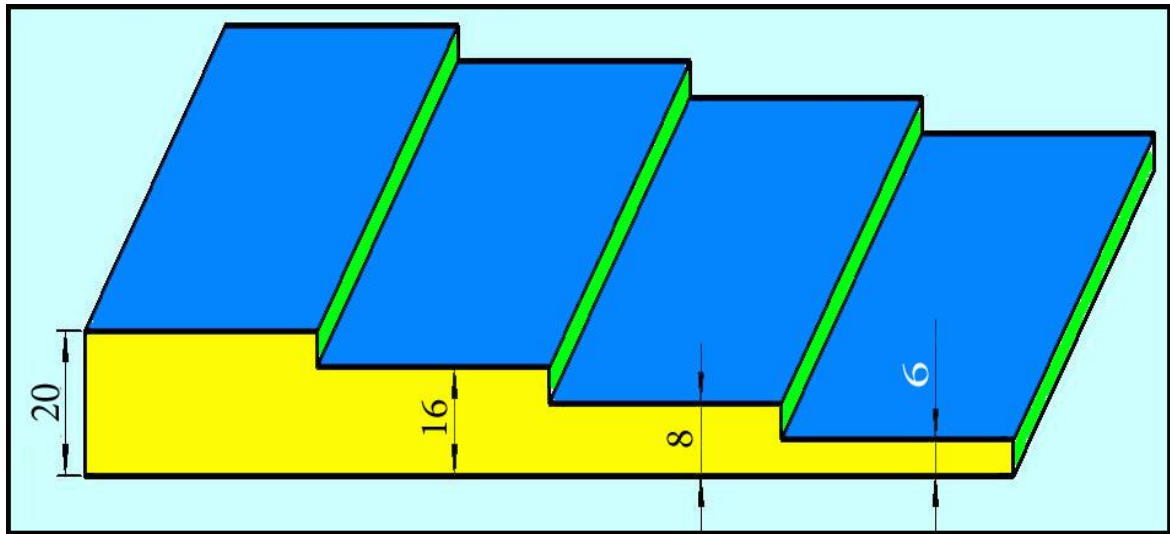


Рисунок 1.20 – Форма стального образца для тарировки показаний структуроскопа (коэрцитиметра) в зависимости от толщины исследуемой металлоконструкции

1.6.3.2. По чертежам общих видов металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения намечают предварительную схему выполнения замеров  $H_C$ , по аналогии со схемами, представленными, например, на рисунках 1.5 и 1.6.

1.6.3.3. 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. Примеры приведены на рисунках 1.21 и 1.22.

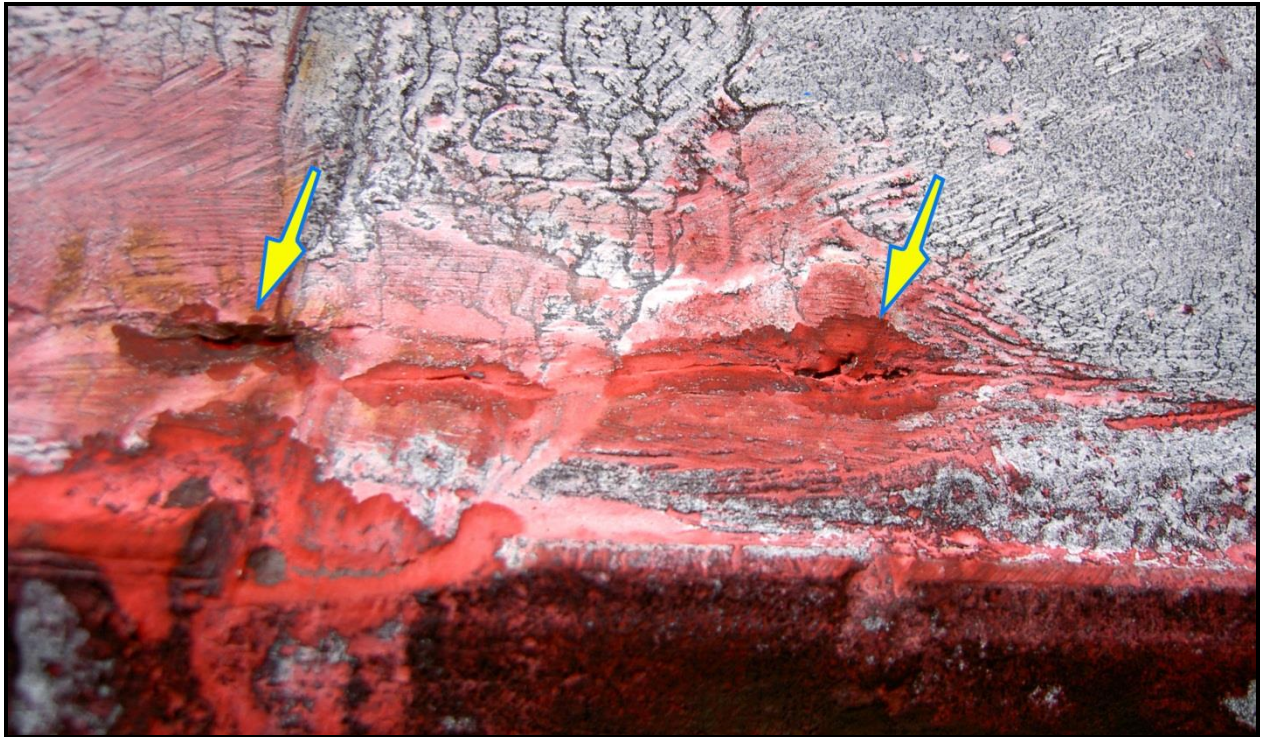


Рисунок 1.21 – Пример выявления наружных трещин в металлоконструкции с применением пенетрантов

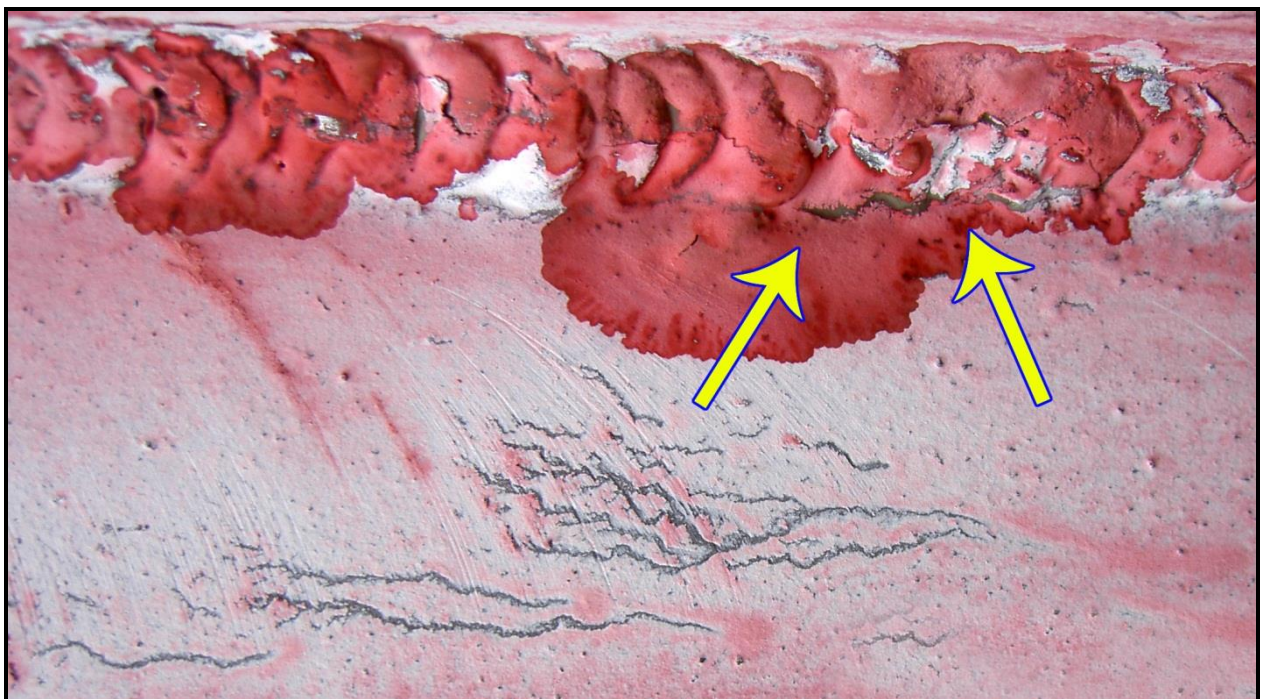


Рисунок 1.22 – Пример выявления наружных трещин в сварном шве с применением пенетрантов

1.6.3.4. Для выявленных поврежденных зон металлических конструкций грузоподъемного оборудования специального назначения, устанавливают границы изменения физико-механических свойств, которые необходимы для определения зоны, подвергаемой последующему ремонту. Пример выполнения указанных замеров приведен на рисунках 1.23 – 1.26. Границы зоны перехода к непораженному металлу отмечают контрастной липкой лентой или мелом (пример на рисунке 1.23).



Рисунок 1.23 – Пример выявления зоны пораженного металла вокруг трещины при проведении технического диагностирования вышки типа 40В6М с применением структуроскопа (коэрцитиметра) КРМ-Ц-К2М. Положение датчика КРМ-Ц-К2М на снимке – поперек направления прокатки профиля листа



Рисунок 1.24 – Пример выполнения измерений  $H_C$  при проведении технического диагностирования вышки типа 40В6М с применением структуроскопа (коэрцитиметра) КРМ-Ц-К2М. Положение датчика КРМ-Ц-К2М на снимке – вдоль направления прокатки профиля листа



Рисунок 1.25 – Пример выполнения измерений  $H_C$  при проведении технического диагностирования вышки типа 40В6М с применением структуроскопа (коэрцитиметра) КРМ-Ц-К2М. Положение датчика КРМ-Ц-К2М на снимке – вдоль направления прокатки профиля листа



Рисунок 1.26 – Пример выполнения измерений  $H_C$  при проведении технического диагностирования вышки типа 40В6М с применением структуроскопа (коэрцитиметра) КРМ-Ц-К2М. Положение датчика КРМ-Ц-К2М на снимке – вдоль направления прокатки профиля листа

1.6.3.5. Далее, согласно рисунку 1.5, выполняют замеры в других местах металлоконструкции, отмеченных на схеме при выполнении п. 1.6.3.2 настоящей методики. Результаты проведенных измерений  $H_C$  заносят в таблицу. Пример заполнения приведен в таблице 1.9, дополнительные результаты замеров на конкретной вышке типа 40В6М приведены в Приложении А к данной работе.

Таблица 1.9 – 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                    |

1.6.3.6. Руководствуясь данными о стали, из которой изготовлена металлоконструкция, согласно таблице 1.8, выбираем усредненные данные для стали 09Г2С в диапазоне толщин до 20 мм и заносим их в таблицу 1.10:

Таблица 1.10 – 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 | $\delta$ , % | $H_{C0}$           | $H_{CT}$ | $H_{CB}$ | $H_{C\text{ уст}}$ |
| 09Г2С       | 450                   | 310                  | 20           | 4,0                | 7,8      | 9,5      | 9,5                |

Сравнивая физико-механические свойства стали с результатами замеров,

приведенных в таблице 1.9, можно сделать следующие выводы:

а) Все реально полученные в результате замеров величины  $H_C$  соответствуют диапазону, приведенному в таблице 1.8 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 (замеры 4 и 9, таблица 1.9) 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 1.9) может косвенно указывать на наличие дефекта сварки или места зарождения трещины, однако сравнение результата данного замера с данными таблицы 1.8, позволяет сделать вывод, что 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.

1.6.3.7. Поскольку все данные  $H_C$ , полученные в ходе проведения замеров, соответствовали листам одинаковой толщины, а их фактические величины не превысили установленных пределов, корректировать полученные показания структуроскопа (коэрцитиметра) КРМ-Ц-К2М с учетом вышеизложенных требований п.1.6.3.1 не требуется.

В заключение данного раздела следует отметить, что изложенная методика была положена в основу исследований, выполненных по заказу ряда министерств и ведомств РФ, и вошла в состав следующих ведомственных нормативных документов:

- «Методики по оценке технического состояния, остаточного ресурса, срока службы, определения возможностей и условий дальнейшей эксплуатации

грузоподъемных устройств, установленных на кораблях и судах ВМФ, плавучих кранов». Утверждена командиром в/ч 72190 в 2007 г.

- «Методики проведения обследования и технического диагностирования автомобильных кранов, эксплуатируемых в в/ч 31600, с целью продления срока их эксплуатации», Утверждена командиром в/ч 31600 в 2009 г.

- «Методики по техническому диагностированию грузоподъемного оборудования железнодорожных кранов ЕДК с целью установления возможности продления срока их службы и условий дальнейшей эксплуатации. - РД 10 – 112 – РЖД», согласована Начальником управления государственного строительного надзора в 2012 г.

## **1.7 Выводы по разделу 1**

1.7.1. Обобщен научный и практический опыт, положенный в основу развития отечественных методик по экспертизе и техническому состоянию грузоподъемных кранов.

1.7.2. Обоснованы действующие допустимые критерии перехода грузоподъемного крана в неработоспособное состояние.

1.7.3. На основании анализа известных классификаций, принятых на железнодорожном транспорте, предложены классификации дефектов и повреждений рельсов путей железнодорожных кранов.

1.7.4. Сформулированы признаки недопустимых дефектов и повреждений рельсового пути грузоподъемных кранов.

1.7.5. Обоснованы и систематизированы допуски на отклонения рельсовых путей грузоподъемных кранов от проектного положения с учетом статистических характеристик их неровностей в плане.

1.7.6. Выполнен обзор работ по техническому диагностированию металлоконструкций грузоподъемных машин специального назначения. Продолжено развитие и совершенствование методических основ контроля состояния элементов металлических конструкций с применением

структуроскопов (коэрцитиметров).

1.7.7. Разработана методика технического диагностирования металлических конструкций, которая использована при диагностике грузоподъемного оборудования специального назначения и доведена до практического внедрения в ряде нормативных документов.

## **2 ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И РИСКА ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

### **2.1 Основные предпосылки, учитываемые при оценке надежности и риска**

Согласно статистическим данным Ростехнадзора [166], производственный травматизм и аварийность на подъемных сооружениях занимают третье место (после травматизма в угольной и горнорудной промышленности) и составляет примерно 90 аварий в год.

Приведенная статистика свидетельствует о необходимости поиска дополнительных методов снижения аварийности и повышения безопасности парка грузоподъемных кранов.

Введем следующее определение: «безопасность грузоподъемных кранов» – это состояние крана, при котором риск от возникновения аварии ограничен допустимым (приемлемым) уровнем [57].

«Авария», как это сказано в [184], – событие, приводящее либо к падению груза, либо к разрушению элементов «первой группы»: несущих элементов металлической конструкции, стальных канатов и т.д. Очевидно, что безопасность эксплуатируемых грузоподъемных кранов может быть достигнута путем разработки и реализации ряда системно взаимосвязанных методов (мероприятий), обеспечивающих предупреждение аварий с грузоподъемными кранами, т.е. снижающих риск их эксплуатации. Упомянутые «методы» должны выполняться на всех этапах жизненного цикла грузоподъемного крана.

1. Стадия проектирования. На стадии проектирования требуемые надежность, прочность, ресурс (срок службы) и безопасность грузоподъемного крана достигается выполнением расчета (оценки) по методу предельного состояния. При этом с учетом допустимого (приемлемого) уровня риска обычно оценивают следующие предельные состояния проектируемого крана [172, 66]:

- 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 [172].

Таким образом, в ходе проектирования требуется рассчитать риск, который должен быть ниже допустимого, при этом надежность и гарантию от возникновения предельного состояния металлической конструкции за весь последующий срок службы должна обеспечиваться следующими методами:

- надлежащим статистическим учетом возможных и наиболее неблагоприятных характеристик материалов, которые в свою очередь характеризуются вероятностным разбросом. Например, назначать расчетное сопротивление стали путем деления нормативного сопротивления на коэффициент надежности по материалу, учитывающий выборочный характер контроля и возможность попадания в конструкцию металла с пониженными характеристиками, т.е. основанный на статистических данных;
- учетом возможных перегрузок и наиболее невыгодного (но реально возможного) сочетания нагрузок и воздействий. Например, назначать расчетные нагрузки путем умножения нормативных нагрузок на статистические

коэффициенты надежности по нагрузкам, учитывающие возможные отклонения нагрузок в неблагоприятную сторону;

- надлежащим выбором расчетных схем и предпосылок расчета.

Таким образом, на стадии проектирования выявленные и идентифицированные опасности должны быть оценены с точки зрения их соответствия критериям приемлемого риска.

Оценка риска включает в себя анализ частоты отказов, анализ последствий выявленных событий и анализ неопределенностей результатов [85].

Предположим, что  $S$  – множество всех вероятных неблагоприятных событий  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ . Обозначим  $K$  – каждое из возможных сочетаний событий, из которых определенное сочетание  $K_i$  является подмножеством неблагоприятных событий множества  $S$ , записываемых в виде [85]:

$$K = \{S_{k1}, S_{k2}, \dots, S_{ki}\}. \quad (2.1)$$

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

$$K_i = \{K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{ik}, N_i\}. \quad (2.2)$$

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:

$$\sum_{i=1}^k P_i(K_{ij}) + P_i(N_i) = 1. \quad (2.3)$$

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:

$$R_{isk} = \sum_{i=1}^k A_{ij} P_i(K_{ij}). \quad (2.4)$$

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  $R_{isk \text{ фактический}} \leq [R_{isk}]$  [177], т.е. риск фактический меньше или равен допустимому риску (Риск грузоподъемного крана является допустимым (приемлемым), если его величина настолько незначительна, что ради выгоды, получаемой от данного крана, общество готово пойти на этот риск [177]).

Выполнение этого условия при проектировании эквивалентно выполнению требований предельных состояний по несущей способности, т.е.:

$$R_N \leq \Phi(W, R_M, y_i, y_s), \quad (2.5)$$

где  $R_N$  – наибольшее возможное за весь срок службы эксплуатационное усилие (или напряжение) при неблагоприятном сочетании нагрузок и воздействий;

$\Phi$  – предельная минимальная расчетная несущая способность элемента;

$W$  – геометрические характеристики элемента;

$R_M$  – расчетное сопротивление стали;

$y_i, y_s$  – заданные коэффициенты надежности и условий работы, фактически отражающие «допустимый» уровень риска достижения предельного состояния за весь период эксплуатации металлической конструкции грузоподъемного крана.

2. Стадия изготовления. На данной стадии жизненного цикла грузоподъемного крана также должно быть обеспечено выполнение условия, что  $R_{isk \text{ фактический}} \leq [R_{isk}]$  [177]. Требуемые надежность, прочность, ресурс (срок службы) и безопасность конструкции достигается выполнением технологии изготовления и системой контроля качества выполненных работ (в соответствии с требованиями проекта и нормативных документов). Заметим, что на этой стадии происходит накопление информации о всех отступлениях от требований проекта и действующих норм, что крайне необходимо для оценки безопасности грузоподъемного крана в дальнейшем. Эти данные должны заноситься в паспорт

крана и сохраняться в нем до списания крана. Утеря владельцем паспорта крана существенно увеличивает трудоемкость (сроки) и качество проведения экспертизы промышленной безопасности.

3. Стадия эксплуатации. На стадии эксплуатации грузоподъемного крана также должно быть обеспечено выполнение условия, что  $R_{isk \text{ фактический}} \leq [R_{isk}]$  [177], поскольку именно на стадии эксплуатации грузоподъемного крана фактически происходит проверка адекватности моделей надежности, прочности, ресурса (срока службы), безопасности и назначенного уровня риска, применяемых на стадии проектирования и изготовления, фактическим условиям эксплуатации. Заметим, что понятие безопасность грузоподъемного крана в эксплуатации относительно новое и оно во многом тождественно понятию «приемлемого риска», о чем было сказано выше. До введения данного термина применительно к грузоподъемным кранам применялось понятие «техническое состояние», которое описывалось как «исправное», «неисправное», «работоспособное» или «неработоспособное».

Поэтому, в настоящее время существует проблемная ситуация, заключающаяся в отсутствии методов перехода от результатов инженерного обследования (технического диагностирования) отдельных грузоподъемных кранов к оценке безопасности (оценке надежности и риска) в соответствии с требованиями Федерального законодательства.

Теория надежности занимается проблемами обеспечения надежной работы механических систем. Эта теория рассматривает [42]:

- методы количественного определения и сравнительной оценки надежности с учетом факторов, влияющих на ее величину;
- конструктивные и производственные мероприятия, обеспечивающие заданную надежность;
- способы эксплуатации, поддерживающие надежность на заданном уровне.

Развиваемая в настоящее время параметрическая теория надежности механических систем [15], в том числе и грузоподъемных кранов, представляет

собой попытку ввести в расчеты надежности больших систем анализ физико-механических явлений, приводящих к отказам. При этом вероятность безотказной работы  $P(t)$  становится функционалом некоего случайного процесса  $v(t)$ , который характеризует изменение параметров системы во времени.

Под надежностью элемента (системы) будем понимать вероятность выполнения заданных функций в заданных условиях в течение заданного периода времени [15].

Количественные показатели, характеризующие надежность грузоподъемного крана, являются важнейшими его параметрами, такими же, как например, грузоподъемность, скорости рабочих механизмов, производительность и т.д. Для определения грузоподъемности и скоростей рабочих механизмов обычно пользуются классической схемой, применяемой в современном машиностроении. Суть которой заключается в следующем. Если описать состояние грузоподъемного крана в каждый момент времени с помощью вектора  $\mathbf{u}$  – элемента пространства состояний  $U$ , полагая, что  $t_0 = 0$ , то каждой реализации процесса  $u(t)$  соответствует некоторая траектория в пространстве состояний  $U$ . Под  $t$  в данном случае можно подразумевать не только физическое время, но например, наработку грузоподъемного крана.

Внешние воздействия на грузоподъемный кран характеризуются векторным процессом  $\bar{q}(t)$ , где  $\bar{q}(t)$  – вектор воздействий из соответствующего пространства воздействий  $Q$ . Уравнение состояния грузоподъемного крана в этом случае можно представить в виде:

$$\bar{u} = H[\bar{q}], \quad (2.6)$$

где  $H$  – некоторый оператор, реализующий расчетную схему и метод расчета.

Однако, такой метод целесообразен только тогда, когда комплекс условий, заметно влияющих на результат, не является чрезмерно сложным. В действительности же даже незначительное изменение условий часто является причиной ненадежной работы грузоподъемного крана, а время, потребное для их

проверки, выходит за целесообразные пределы.

В связи с этим для исследования надежности грузоподъемного крана используют другую схему – вероятностную, сущность которой сводится к тому, что из всего сложного комплекса условий (воздействий)  $\bar{q}(t)$  выбирают некоторый, сравнительно простой, комплекс условий (воздействий) и вместо предсказания появления события в результате воздействия всего комплекса  $\bar{q}(t)$ , ограничиваются утверждением, что при наличии условий  $\beta$  факту  $U$  соответствует определенная вероятность.

Понятие «отказ» является центральным в теории надежности и непосредственно связано с понятием «надежность грузоподъемного крана». Одним из условий длительной бесперебойной работы грузоподъемного крана является гарантированная безотказность его элементов в течение определенного, заранее заданного срока (в частном случае, например, для кранов мостового типа – до первого капитального ремонта, указанного в паспорте крана) [16, 143].

К наиболее широко применяемым критериям надежности грузоподъемных кранов относятся [143]:

- вероятность безотказной работы в течение заданного отрезка времени (например, срока службы);
- ресурс до первого капитального ремонта;
- интенсивность отказов;
- среднее время между соседними отказами; и т.д.

Считают, что грузоподъемный кран работает безотказно, если он при определенных условиях эксплуатации сохраняет свои параметры назначения и показатели безопасности в заданных пределах в течение определенного промежутка времени.

Если обозначить через  $T$  время непрерывной безотказной работы подъемного сооружения от начала работы до отказа, а через  $t$  – время, для которого требуется определить вероятность безотказной работы изделия  $P(t)$ , то  $P(t)$  есть вероятность того, что случайная величина  $T$  будет больше или равна  $t$ ,

то есть

$$P(t) = P(T \geq t). \quad (2.7)$$

Обычно принимают

$$P(0) = 1 \quad \text{и} \quad P(\infty) = 0. \quad (2.8)$$

Вероятность безотказной работы определяется формулой [15]:

$$P(t) = \lim_{\substack{\Delta t \rightarrow 0 \\ N_0 \rightarrow \infty}} \frac{N_0 - \sum_{i=1}^{\frac{t}{\Delta t}} n_i}{N_0}, \quad (2.9)$$

где  $N_0$  – число изделий в начале испытаний;

$n_i$  – число вышедших из строя изделий в интервале времени  $\Delta t_i = \Delta t = \text{const}$ ;

$t$  – время, для которого определяется  $P(t)$ ;

$\Delta t$  – принятая продолжительность  $i$  – го интервала времени.

$P(t)$  охватывает все факторы, существенно влияющие на надежность (при использовании эксплуатационных статистических данных) и дает возможность использовать ее при расчете надежности аналогичных грузоподъемных кранов до их изготовления.

Вероятность противоположного события, т.е. отказа  $q(t)$  есть вероятность того, что за время  $t$  произойдет хотя бы один отказ:

$$q(t) = q(T > t). \quad (2.10)$$

Так как вероятности отказа и безотказной работы события противоположные, то, как было отмечено выше [15],

$$P(t) = 1 - q(t). \quad (2.11)$$

Оценка надежности обычно начинается на стадии проектирования. За последние годы были развиты различные методы оценки надежности. Условно можно выделить два класса моделей: статические и динамические.

К основным методам оценки надежности, используемым на практике,

относятся: метод дерева неисправностей (отказов), метод дерева событий, Марковский метод, метод таблиц решений, метод сокращения сети, анализ видов отказов и последствий, анализ критичности, предварительный анализ опасности и другие, а также различные их разновидности. Конкретное использование этих методов зависит от различных факторов, включая требования, выдвигаемые при решении конкретной задачи. Например, метод дерева отказов является одним из основных при решении задач, связанных с надежностью грузоподъемного крана [36, 57].

Во многих случаях надежность технических систем оценивают без учета фактора времени. При этом надежность компонентов системы предполагается постоянной. Это, как правило, предварительный или элементарный анализ. Как известно, надежность системы при этом характеризуется блок-схемой [36]. В свою очередь, блок-схема состоит из многих блоков, представляющих подсистемы (части системы – подъемного сооружения). Вероятность отказа или надежность системы определяют путем оценки надежности ее элементов (составляющих). При этом вероятность отказа компонентов предполагается не изменяющейся со временем (постоянной).

Метод анализа с использованием дерева отказов был разработан в лаборатории «Белл телефон» Х.А. Уотсоном еще в 1961-1962 годах, теперь же он узаконен в нашей стране стандартом [36]. Деревья отказов являются сложными логическими структурами. Для их построения и количественного анализа необходимы знания булевой алгебры, теории множеств и других разделов математики.

Полезность применения дерева отказов заключается в следующем [36]:

- анализ сосредоточен на отыскании отказов;
- выявляются важные для отказов аспекты системы;
- обеспечивается графическое представление материала;
- появляется возможность проведения качественного и количественного анализа надежности системы;
- обеспечивается возможность сосредоточиться на конкретном отказе

системы;

- появляется возможность глубокого проникновения в процесс работы системы.

Фактически деревья отказов стали средством общения специалистов в области надежности. Нежелательное событие, являющееся предметом анализа, располагается вверху дерева отказов (конечное событие) и соединяется с другими событиями вплоть до исходных путем констатаций событий и логических символов. Основное преимущество дерева отказов в сравнении с другими методами заключается в том, что анализ ограничен выявлением только тех элементов системы и событий, которые приводят к данному конкретному отказу или аварии.

Построив дерево отказов, его необходимо подвергнуть качественному и количественному анализам для выявления сочетаний исходных аварийных событий, ведущих к возникновению опасных ситуаций в системе. После того, как эти сочетания выявлены, система может быть модернизирована и потенциальные опасности уменьшены.

Ниже рассмотрим метод вероятностного анализа безопасности металлоконструкций наиболее массовых мостовых кранов, который базируется на представленной общей модели состояния грузоподъемного крана.

Вероятностный анализ безопасности металлоконструкции мостового крана обычно включает обобщенный анализ «дерева событий» (ДС) и «дерева отказов» (ДО).

ДС позволяет проанализировать и построить логико – графическую модель развития аварийных ситуаций, начинающихся с одного и того же исходного события – отказа конструктивного элемента мостового крана, и вероятности возникновения данного сценария развития аварийной ситуации. Для дальнейшей оценки безопасности мостового крана необходимо найти все возможные причины аварии мостового крана, проанализировать взаимосвязи между отдельными исходными событиями и оценить их влияние на возникновение конечного события – одной из типичных аварий мостового крана, а также найти наиболее

опасные сочетания исходных событий и провести их количественную оценку.

Построенная с использованием дерева отказов логико – графическая модель безопасности металлоконструкции мостового крана позволяет провести количественную оценку безопасности и определить зависимость риска отказа металлоконструкции мостового крана от вероятностных характеристик исходных событий.

Зная характеристики надежности отдельных элементов металлоконструкции мостового крана, например, их наработку до отказа, можно определить риск отказа  $Q_s$  мостового крана в целом – вероятность того, что конечное событие – аварийный отказ металлоконструкции мостового крана произойдет в момент времени  $t$ . В силу предположения независимости исходных событий, принципа единичности отказа и логики построения ДО, вероятность наступления конечных событий  $A$ , связанных логическим оператором «И», равна произведению вероятностей  $Pr_{i_j}$ , событий  $e_{i_j}$ ,  $j=1,...,n_i$  [15]:

$$Pr_{\text{"И"}} = \prod_{j=1}^{n_i} Pr_{i_j}, \quad (2.12)$$

а зависимость вероятности  $Pr$  "или" наступления событий  $Pr$  "или",  $j=1,...,n_i$ , где  $n_i$  может принимать значение от 1 до  $N$ , связанных логическим оператором «ИЛИ», от вероятностей  $Pr_{i_j}$  событий  $e_{i_j}$ ,  $j=1,...,n_i$  определяется по формуле:

$$Pr_{\text{"ИЛИ"}} = 1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - Pr_{i_j}). \quad (2.13)$$

Таким образом, зная математические зависимости причинно-следственных связей с использованием логических операторов «И», «ИЛИ» можно, двигаясь снизу вверх по структуре ДО металлоконструкции мостового крана от исходных событий к главному, произвести оценку надежности его металлоконструкции в целом.

Из опыта, накопленного при проведении экспертного обследования и технического диагностирования состояния мостовых кранов, рядом авторов [71] и нами [56] установлено, что степень влияния повреждения или отказа несущего

элемента металлоконструкции на безопасность различна даже на однотипных по конструктивному исполнению мостовых кранах.

Имеющаяся статистическая информация по интенсивностям отказов расчетных элементов металлоконструкций, в связи с ее обезличенностью и отсутствием индивидуального подхода, не позволяет объективно оценить уровень безопасности конкретного мостового крана. Поэтому для получения фактических величин интенсивностей отказов конструктивных элементов металлоконструкций мостовых кранов С.С. Чичериным [187] предложен экспертный метод, позволяющий определить оценку – «вес» отказа с учетом индивидуальных особенностей конкретного крана.

Согласно предложенному методу, группой квалифицированных специалистов (экспертов) в процессе проведения экспертизы промышленной безопасности мостового крана составляются опросные листы с указанием наиболее значимых отказов и диапазона (предела изменения) изменчивости каждого отказа по принятой 10-ти бальной шкале (см. таблицу 2.1) [187]. Полученные таким образом опросные листы можно легко обработать методами математической статистики.

Таблица 2.1 – Оценка значимости отказов конструктивных элементов металлоконструкции, принимаемые при экспертном обследовании и техническом диагностировании мостового крана

| № п.п. | Наименование узла металлоконструкции мостового крана                                                                         | Характеристика обнаруженного отказа металлоконструкции                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Оценка значимости отказа |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1.     | Концевая балка:<br>- торцевая стенка;<br>- вертикальная стенка;<br>- верхний пояс;<br>- нижний пояс.                         | Повреждения, <b>значительно снижающие</b> несущую способность элементов конструкции:<br>- поперечные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $L_s > 0,3B_s$ , где $B_s$ – ширина элемента;<br>- продольные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $V_s > 0,3L_s$ , где $L_s$ – длина элемента;<br>- общая деформация несущих элементов, превышающая допустимые величины на 50%;<br>- коррозия свыше 10% толщины элемента.                                                                                                                     | Категория «А»            |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 9                        |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5                        |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 6                        |
| 2.     | Главная балка:<br>- узел сочленения главной и концевой балок;<br>- верхний пояс;<br>- вертикальная стенка;<br>- нижний пояс; | Повреждения, <b>значительно снижающие</b> несущую способность элементов конструкции:<br>- поперечные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $L_s > 0,3B_s$ , где $B_s$ – ширина элемента;<br>- продольные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $V_s > 0,3L_s$ , где $L_s$ – длина элемента;<br>- остаточный прогиб главных балок $f > 0,0035L$ ; главных балок после статических испытаний; $L$ – пролет крана.<br>- общая деформация несущих элементов, превышающая допустимые величины на 50%;<br>- коррозия свыше 10% толщины элемента. | Категория «А»            |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 9                        |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 6                        |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 8                        |
| 3.     | Металлоконструкция грузовой тележки                                                                                          | Повреждения, <b>снижающие</b> несущую способность элементов конструкции:<br>- поперечные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $L_s > 0,3B_s$ , где $B_s$ – ширина элемента;<br>- продольные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $V_s > 0,3L_s$ , где $L_s$ – длина элемента;<br>- общая деформация несущих элементов, превышающая допустимые значения на 50%;<br>- коррозия свыше 10% толщины элемента                                                                                                                                  | Категория «Б»            |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5                        |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 3                        |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5                        |
|        |                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2                        |

Продолжение таблицы 2.1

| № п.п. | Наименование узла металлоконструкции мостового крана                                                                         | Характеристика обнаруженного отказа металлоконструкции                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Оценка значимости отказа                               |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 4.     | Концевая балка:<br>- торцевая стенка;<br>- вертикальная стенка;<br>- верхний пояс;<br>- нижний пояс                          | Повреждения, снижающие несущую способность элементов конструкции:<br>- поперечные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $L_s > 0,3B_s$ , где $B_s$ – ширина элемента;<br>- продольные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $V_s > 0,3L_s$ , где $L_s$ – длина элемента;<br>- общая деформация несущих элементов, превышающая допустимые значения на 50%;<br>- коррозия свыше 10% толщины элемента                                                                                            | Категория «Б»<br><br>5<br><br>3<br><br>5<br><br>2      |
| 5.     | Главная балка:<br>- узел сочленения главной и концевой балок;<br>- верхний пояс;<br>- вертикальная стенка;<br>- нижний пояс; | Повреждения, снижающие несущую способность элементов конструкции:<br>- поперечные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $0,03B < l < 0,3B$ , где $B$ – ширина элемента;<br>- продольные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $0,03L < l < 0,3L$ , где $L$ – длина элемента;<br>- остаточный прогиб главных балок $0,0022L < f < 0,0035L$ ; где $L$ – пролет крана;<br>- общая деформация несущих элементов, превышающая допустимые значения на 50%;<br>- коррозия свыше 10% толщины элемента | Категория «Б»<br>5<br><br>4<br><br>3<br><br>5<br><br>2 |
| 6.     | Металлоконструкция грузовой тележки                                                                                          | Повреждения, снижающие несущую способность элементов конструкции:<br>- поперечные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $0,03B < l < 0,3B$ , где $B$ – ширина элемента;<br>- продольные трещины по основному металлу и сварным швам «суммарной» длиной $0,03L < l < 0,3L$ , где $L$ – длина элемента;<br>- общая деформация несущих элементов, превышающая допустимые значения на 50%;<br>- коррозия свыше 10% толщины элемента                                                                                        | Категория «Б»<br>5<br><br>3<br><br>5<br><br>2          |

Метод, предложенный С.С. Чичериным, принципиально может быть использован при экспертном обследовании и техническом диагностировании грузоподъемных мостовых кранов, эксплуатируемых в условиях, отличающихся от указанных в паспорте крана. Однако в этом случае система оценок, принимаемых согласно указаниям таблицы 2.1 [187], должна быть существенно

расширена. Такие предложения (дополнения) приведены, например, в нормативном документе [117] применительно к учету воздействия агрессивной среды на коррозию отдельных элементов металлических конструкций.

Применение метода, предложенного С.С. Чичериным, зачастую практически затруднено, поскольку невозможно дать, например, количественных оценок изменениям механических свойств металла от времени эксплуатации крана или спрогнозировать отказы сварных соединений, если они выполнены совершенно для иных условий эксплуатации.

Для грузоподъемных кранов на рельсовом ходу нередко отказы из-за высоких погрешностей установки крановых ходовых колес – элементов их механизмов передвижения и значительных отклонений рельсового пути от проектного положения.

Серьезных корректив в эксплуатации требуют и другие быстро изнашиваемые на практике элементы таких механизмов кранов, как, например, стальные канаты, срок службы которых в ряде случаев составляет всего несколько месяцев.

В соответствии со статистикой отказов и описаниями наиболее опасных аварийных ситуаций, приведенных в работах [56, 155], как правило, ограничиваются лишь учетом влияния следующих условий эксплуатации, отличающихся от указанных в паспорте крана:

- воздействием низких температур (температур, ниже предельного уровня, указанного в паспорте крана) на хладостойкость расчетных (несущих) сварных элементов металлоконструкций грузоподъемных кранов, вызывающее возможный лавинообразный рост трещин и хладноломкость;
- воздействием высоких температур на стальные канаты металлургических кранов, приводящее к термоциклической усталости канатов и последующему их внезапному разрыву;
- воздействием высоких динамических нагрузок в системе «кран – рельсовый путь», обусловленное высокими погрешностями установки крановых

колес и отклонениями ширины колеи кранового пути от проектных положений. Наличие высоких динамических нагрузок в системе «кран – рельсовый путь» вызывает ускоренный рост усталостных трещин в расчетных (несущих) элементах металлоконструкций грузоподъемных кранов, а также в элементах строительных конструкций, на которых установлен крановый рельсовый путь;

- нарушением периодичности и/или невыполнением необходимых технологий при ремонтах.

Выбор приведенных ограничений для последующей оценки влияния всего многообразия неблагоприятных условий эксплуатации объясняется следующим:

- данные неблагоприятные условия вызывают возникновение внезапных отказов элементов т.н. «первой группы»: металлических конструкций, стальных канатов и т.п., выход из строя которых может сопровождаться падением крана и/или транспортируемого груза;

- при отсутствии в стране значительного опыта производства специальных кранов для низких температур и термостойких канатов для металлургических кранов, указанные неблагоприятные условия объективно являются достаточно частыми [25];

- при отсутствии в производстве и монтаже кранов инженерных методов оценки погрешности установки крановых ходовых колес, прогнозировать неблагоприятное воздействие крана на крановый путь было невозможно;

- постепенное старение и расшатывание элементов каркаса здания приводит к непредсказуемым воздействиям на кран со стороны рельсового пути крана, и т.д.

С целью снижения затрат на поставку нового крана, текст технического задания (требований к конструкции и механизмам) выхолащивается по взаимному согласию потребителя – поставщика. Это приводит к несоответствиям грузоподъемного крана и его механизмов условиям последующей эксплуатации и, как следствие, росту потока отказов и переходу крана в предельное состояние.

На основе анализа различных документов (опросных листов, технических

требований и технических заданий), нами предложена следующая таблица условий, которые дополнительно должны учитываться при проектировании и поставке грузоподъемных кранов (см. таблицу 2.2) [57].

Таблица 2.2 – Условия, которые следует учитывать при поставке грузоподъемных кранов для специальных условий эксплуатации

| №  | Характеристика производства                                    | Дополнительные факторы, учитываемые при поставке грузоподъемного крана                                                       |
|----|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Помещения с повышенной (более 40 °С) температурой              | Соответствие оборудования и эргономики кабины повышенной температуре                                                         |
| 2  | Открытые площадки                                              | Воздействие солнца, дождя, ветра и снега.                                                                                    |
| 3  | Открытые площадки, тропический климат                          | Повышенная температура, воздействие солнца, дождя и ветра.                                                                   |
| 4  | Открытые площадки, арктический и холодный климат               | Пониженная температура, воздействие дождя ветра и снега.                                                                     |
| 5  | Гальваническое, травильное производство, электролиз            | Повышенная температура, высокая влажность, воздействие паров кислот и щелочей                                                |
| 6  | Строительные конструкции, на которых установлен рельсовый путь | «Просадки» колонн и подкрановых балок, отклонения рельсового пути, если это существенно для эксплуатации данного типа кранов |
| 7  | Металлургия меди и алюминия                                    | Повышенная температура, высокая влажность, пары кислот и щелочей, электромагнитное поле                                      |
| 8  | Закалочное производство                                        | Повышенная температура, воздействие теплового излучения и паров масел                                                        |
| 9  | Литейное производство                                          | Повышенная температура, воздействие теплового излучения на краны и канаты, пыль.                                             |
| 10 | Холодильные склады                                             | Постоянное воздействие низких температур                                                                                     |
| 12 | Градирни                                                       | Дождь, снег, солнце, водяной пар                                                                                             |
| 13 | Компьютерные помещения                                         | Абсолютное отсутствие пыли и течи масла                                                                                      |
| 14 | Объекты использования атомной энергии                          | Повышенная температура, повышенная влажность, ионизирующее излучение.                                                        |
| 15 | Медицинские помещения                                          | Повышенные требования к окраске, отсутствию течи масла, шуму и электрической изоляции.                                       |

*Продолжение таблицы 2.2*

|    |                                       |                                                                                                                                     |
|----|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 16 | Пищевые предприятия                   | Повышенные требования к лакокрасочному покрытию, отсутствию течи масла                                                              |
| 17 | ЦБК                                   | Повышенная температура, высокая влажность, пожароопасность производства                                                             |
| 18 | Взрывоопасные зоны                    | Требования к соответствию оборудования заданной категории взрывоопасной среды.                                                      |
| 19 | Деревоперерабатывающая промышленность | Наличие пыли, пожароопасность производства, защита от течи масла                                                                    |
| 20 | Предприятия ЖБИ                       | Наличие пыли, защита от течи масла                                                                                                  |
| 21 | Портовые грузоподъемные сооружения    | Воздействие солнца, морского климата, ветра и снега.                                                                                |
| 22 | Судовые краны                         | Вибрации, наклонные положения, воздействие качки и ударов волн, тропический и морской климат, воздействие ветра для палубных кранов |
| 23 | Горная местность (от 1500 м и выше)   | Холод, пониженное давление, горный климат, воздействие солнца, ветра и снега.                                                       |
| 24 | Часто переставляемые краны            | Воздействие вибрации во время частых транспортных операций                                                                          |

Анализ требований, приведенных в таблице 2.2 [57], показал, что отсутствие соответствия грузоподъемного крана хотя бы одному из них, автоматически создает для него условия, в которых он не полностью будет гарантировать последующую безопасную эксплуатацию.

## **2.2 Оценка состояния грузоподъемного оборудования через возможный риск возникновения аварии**

Из опыта наблюдения за грузоподъемным оборудованием, имеющим незначительное число отступлений параметров от допустимых норм проектирования, известно, что несущие конструкции, рассчитанные на различные сочетания нагрузок, обладают определенным коэффициентом запаса прочности и поэтому при нормальной эксплуатации в течение срока службы каких-либо существенных повреждений не получают.

Таким образом, можно допустить, что появление случайных нагрузок,

ограниченно превышающих допустимый уровень и имеющих незначительную частоту их воздействия, не приведет к каким-либо разрушениям, то есть условие безопасности – отсутствие риска аварии грузоподъемного оборудования – в этом случае можно записать в следующем виде [73]:

$$N \leq [N] \text{ при условии, что } p_{N \geq [N]} \leq [p], \quad (2.14)$$

где  $p_{N \geq [N]}$  – вероятность появления нагрузки  $N$  больше допустимого значения  $[N]$ ;

$[p]$  – допустимая вероятность появления нагрузки больше ее расчетного значения.

Используя определение «риска», приведенное во Введении к данной работе, а также используя условие (2.5), можно определить его значение для конкретных условий:

$$R = Z[p], \quad (2.15)$$

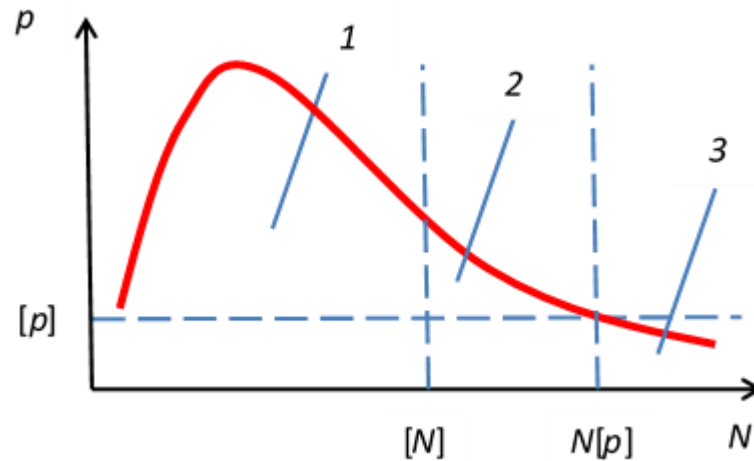
где  $Z$  – возможный ущерб от аварии, связанной с превышением допустимой нагрузки.

Тогда условие безопасности, учитывающее ущерб от возможного события - аварии, связанной с превышением допустимой нагрузки на рассматриваемый элемент («слабое звено») грузоподъемного оборудования, примет вид [74]:

$$N \leq [N] \text{ при } R_{N \geq [N]} \leq [R], \quad (2.16)$$

где  $[R]$  – допустимое значение риска, которое может быть определено или установлено (назначено) для каждого типа грузоподъемного оборудования в зависимости от его назначения и ответственности.

Если под  $N$  понимать любой из возможных силовых факторов в расчетном элементе – «слабом звене» грузоподъемного оборудования, например, нагрузку, напряжения или деформации, то обобщенно влияние  $N$  на риск эксплуатации можно представить в виде функции плотности распределения, показанной на рисунке 2.1 [74].



1, 2, 3 — соответственно, зоны безопасной эксплуатации, повышенной опасности, аварийной опасности

Рисунок 2.1 – Функция плотности распределения силовых факторов в расчетном элементе – «слабом звене» грузоподъемного оборудования  $N$

Анализ рисунка 2.1 показывает, что выделенная зона 2 характеризуется силовыми факторами и вероятностью их появления выше допустимого, и, следовательно, при наличии повреждений (дефектов), вызывающих появление  $N > [N]$  и с вероятностью  $p_{N \geq [N]} > [p]$  существует реальная опасность возникновения нежелательного (аварийного) события.

Установив расчетным или экспериментальным путем плотность распределения силовых факторов  $N$ , определим вероятность нахождения величины  $N$  в интервале от  $[N]$  до  $N[p]$  [74]:

$$p_N = \int_{[N]}^{N[p]} f(N) dN . \quad (2.17)$$

Таким образом, задача оценки риска сводится к нахождению функции распределения  $f(N)$  случайной величины силового фактора  $N$ , которая после подтверждения закона распределения, может быть задана с помощью набора вычисленных статистических характеристик.

Для упрощения процесса принятия решения о возможности эксплуатации

грузоподъемного оборудования с повреждениями или грузоподъемного оборудования, в условиях воздействия нагрузок выше расчетных, можно воспользоваться таблицей 2.3. За основу таблицы 2.3 взята таблица из работы А.А. Короткого, А.С. Липатова и др. [74] и переработана автором данной работы применительно к нагружению крана в целом.

Таблица 2.3 – Таблица оценки состояния риска грузоподъемного оборудования

| Оценка состояния системы | Условия опасности                                         | Количественные параметры                                                                                                                       | Рекомендации                                                                                                                                                 |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Отличная                 | Отсутствуют                                               | Силовой фактор «слабого звена» грузоподъемного оборудования<br>$N < [N]$<br>Параметры вероятности повреждения «слабого звена»<br>$n_i < [n_i]$ | Эксплуатация грузоподъемного оборудования без ограничения                                                                                                    |
| Хорошая                  | Минимально возможные для создания аварийной ситуации      | $N \leq [N]$<br>$n_i \rightarrow [n_i]$<br>Риск при эксплуатации<br>$R_{N \geq [N]} < [R]$                                                     | Профилактический ремонт или в отдельных случаях перевод грузоподъемного оборудования в более легкий режим с уменьшением его грузоподъемности                 |
| Удовлетворительная       | Необходимые и достаточные для создания аварийной ситуации | $N > [N]$<br>$n_i > [n_i]$<br>$R_{N \geq [N]} < [R]$                                                                                           | Капитальный ремонт согласно графику ППР или в отдельных случаях перевод грузоподъемного оборудования в более легкий режим с уменьшением его грузоподъемности |

## Продолжение таблицы 2.3

|                      |                                      |                                                |                                                                                              |
|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Неудовлетворительная | Необходимые и достаточные для аварии | $N > [N]$ $n_i > [n_i]$ $R_{N \geq [N]} > [R]$ | Эксплуатация грузоподъемного оборудования запрещена, нужен срочный его ремонт или утилизация |
|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|

Когда речь заходит об оценке влияния силового фактора  $N$  на отдельное расчетное слабое звено грузоподъемного оборудования, покажем, как учесть это влияние, для случая возникновения риска аварии слабого звена, связанного, например, с потерей им прочности.

В теории проектирования металлических конструкций грузоподъемного оборудования под термином «расчет на прочность» традиционно подразумевается расчет, направленный на защиту конструкции от появления существенных пластических деформаций при нагружении максимальными эксплуатационными нагрузками [165], которые возникают за срок службы машины однократно или весьма малое число раз.

Расчет на прочность обычно является основным при выборе параметров сечений элементов конструкции. Даже в тех случаях, когда критерии сопротивления усталости, жесткости, устойчивости имеют не меньшее значение, первоначальный выбор основных конструктивных параметров производится по условию прочности.

Характеристикой нагружения конструкции в расчетах на прочность являются максимальные эквивалентные напряжения  $\sigma_{es}$ , возникающие от действия эксплуатационных нагрузок. Эти напряжения в общем случае при наличии сложного напряженного состояния в элементе конструкции грузоподъемного оборудования вычисляются с помощью теории прочности. Для сталей, которые идут на изготовление строительных конструкций и металлоконструкций грузоподъемного оборудования обычно используют теорию удельной энергии формоизменения (которая также имеет названия: «четвертая теория», «теория Губера – Мизеса – Генки» или «теория Фон Мизеса»), которая дает наилучшую

сходимость с экспериментом для пластичных сталей [170].

Для элементов, работающих на изгиб (балок крана) и рассчитываемых с использованием гипотезы плоских сечений, которая включает допущение об отсутствии поперечных напряжений между слоями материала, обычно условие прочности записывают в виде [165]:

$$\sigma_{es} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}, \quad (2.18)$$

где  $\sigma_x$  – нормальные напряжения в балке от изгиба и продольной силы;

$\tau_{xy}$  – касательные напряжения от перерезывающих сил и кручения.

Если же касательными напряжениями в зоне действия максимальных напряжений можно пренебречь, то естественно, следует считать  $\sigma_{es} = \sigma_{x \max}$ . Компоненты напряженного состояния в формуле (2.18) могут быть вычислены либо аналитически, либо с применением МКЭ.

Условие прочности в системе расчетов по предельным состояниям, принятым в [165], если в качестве расчетного сопротивления используется  $R_n = \sigma_T$ , имеет следующий вид [165]:

$$\sigma_{es} \leq \gamma_n \gamma_d \gamma_m \sigma_T, \quad (2.19)$$

где  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению грузоподъемного оборудования или его элемента конструкции;

$\gamma_d$  – коэффициент условий работы;

$\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу.

Практическое использование приведенных условий (2.17) - (2.19) показано в 2.4 данной работы.

### **2.3 Обоснование величин контрольных показателей надежности грузоподъемных кранов**

При количественной оценке риска, проводимой в рамках декларирования и экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов

(ОПО) [183], важно соблюдать единство подходов при использовании основных показателей риска аварии. Результаты декларирования промышленной безопасности ОПО, на которых эксплуатируются подъемные сооружения (ПС), показывают, что не всегда достаточно четко и определенно представляются результаты оценки риска аварии, оценка которой для вновь проектируемых и изготавливаемых ПС предписана Техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» - ТР ТС 010/2011 [177].

В качестве определения «аварии ПС» в [184], принято «разрушение зданий (сооружений) ОПО, на которых непосредственно установлены ПС и (или) самих ПС, в том числе падение транспортируемого груза и (или) отдельных частей ПС, а также возникновение в расчетных металлоконструкциях ПС разрушений (или значительных остаточных деформаций), не подлежащих ремонту (восстановлению)».

Рассмотрим понятие «риск аварии», как меру опасности, характеризующую возможность возникновения аварии на ОПО, в состав которых входят эксплуатируемые ПС, и тяжесть ее последствий [153]. Так как авария на ОПО может быть отнесена к случайным событиям, то в самом простом случае мера опасности может быть оценена при анализе случайных величин ущербов (вреда) или потерь от аварии.

Так, например, при рассмотрении события «отказ подъемного сооружения» (или «технический риск», согласно [153]) в теории надежности [186] оперируют дискретной характеристической [21] случайной величиной  $X$ , которая равна 1, если отказ происходит за определенное время, и равна 0, если отказа не происходит. (Однако чаще в теории надежности используют случайную величину  $T$ : момент времени наступления отказа).

В свою очередь события, связанные с крупными нежелательными последствиями в сложных системах (например, авария на опасном производственном объекте (ОПО)), обычно анализируют с помощью рассмотрения случайной величины потерь (ущербов)  $Y \geq 0$  [186] при планируемой или осуществляемой деятельности [40].

В области промышленной безопасности  $Y \geq 0$  – это случайная величина потерь (ущербов, вреда) от аварии ОПО, на которых эксплуатируются ПС. Приведенные в [153] определения количественных показателей риска аварии – индивидуальный, коллективный и социальный риск, ожидаемый ущерб – и представляют собой собственно характеристики случайной величины аварийных потерь  $Y$  при эксплуатации ОПО, в состав которых входят ПС.

Согласно определению, принятому в [177], «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».

Технический регламент [177], устанавливая определение и необходимость разработки «обоснования безопасности – документа, содержащего анализ риска, а также сведения из конструкторской, эксплуатационной, технологической документации о минимально необходимых мерах по обеспечению безопасности, сопровождающий машины и (или) оборудование на всех стадиях жизненного цикла и дополняемый сведениями о результатах оценки рисков на стадии эксплуатации после проведения капитального ремонта», к сожалению, не дает никаких рекомендаций по назначению цифр, так называемых, максимальных показателей риска для различных видов продукции машиностроения, в том числе, и ПС, в число которых входят грузоподъемные краны. В этой связи, представляется целесообразным обосновать не только методику определения указанных показателей, но привести их численные значения для наиболее широко распространенных грузоподъемных кранов «общего назначения».

Одна из попыток «связать» вероятностную составляющую максимально допустимого риска при возникновении аварии ПС с неким социальным (или материальным) ущербом (гибелью людей) сделана профессором А.А. Зарецким в работе [61]. Им предложена таблица 2.4 значений расчетной допустимой вероятности отказа за срок службы крана, в которой все последствия возможных отказов за срок службы крана разделены на 4 категории, в зависимости от числа

погибших во время аварии, величины материального ущерба. Материальный ущерб составляющей риска, при этом, предложено оценивать с учетом стоимости самого крана.

Таблица 2.4 – Значения расчетной допустимой вероятности отказа за срок службы крана, согласно [61]

| Категория<br>вреда<br>отказа | Характеристика тяжести вреда отказа                                                     | Расчетная<br>допустимая<br>вероятность<br>отказа |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| I                            | Гибель более 5 человек или материальный ущерб превышает 10 кратную стоимость крана      | $10^{-6}$                                        |
| II                           | Гибель менее 5 человек или материальный ущерб не превышает 10 кратную стоимость крана   | $10^{-5}$                                        |
| III                          | Риск для жизни людей отсутствует, материальный ущерб примерно равен стоимости крана.    | $10^{-4}$                                        |
| IV                           | Риск для жизни людей отсутствует, материальный ущерб значительно меньше стоимости крана | $10^{-3}$                                        |

Однако такой подход к оценке материальной (социальной) составляющей риска нельзя считать единственно возможным по следующим причинам:

1. При выполнении работ по сертификации типового образца грузоподъемного крана общего назначения заранее неизвестно, в какие условия эксплуатации попадут другие образцы данного ПС. В одних случаях, авария сертифицированного грузоподъемного крана общего назначения может стать источником последующей экологической аварии оборудования цеха и гибели людей, а в других – даже вовсе без нанесения дополнительного ущерба.

2. Не совсем понятно, какое определение «отказа» положено в основу таблицы 2.4. Например, определения «отказа» в [177] и в [184] практически идентичны и означают «событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния». Заметим, что в этом случае «отказ» никак не связан с обязательной гибелью людей и материальной составляющей риска.

3. Рекомендации таблицы 2.4 никак не связаны с конкретным сроком службы

грузоподъемного крана общего назначения и его ресурсом до первого капитального ремонта. Если учесть, что отказ анализируется за определенное время, то значения расчетной допустимой вероятности отказа должны обязательно назначаться не только с определенным сроком службы грузоподъемного крана общего назначения, установленным проектировщиком (изготовителем), но и его ресурсом до первого капитального ремонта. Последнее, пожалуй, даже более важно, поскольку при выполнении капитального ремонта, выполняется «восстановление исправности и полного или близкого к полному восстановлению ресурса изделия с заменой или восстановлением любых его частей, включая, базовые» [184].

Если принять во внимание неопределенность, связанную с местом последующей эксплуатации грузоподъемного крана общего назначения, в сочетании с определением «аварии ПС» [184], приведенным выше и исключив из последующего анализа материальную (социальную) составляющую потерь, мы придем к возможной сравнительной характеристике возникновения допустимого риска, как вероятности отсутствия возникновения аварии грузоподъемного крана общего назначения за определенный срок эксплуатации, например, за назначенный срок службы при проектировании (изготовлении) или за срок, при котором будет выработан назначенный ему ресурс до первого капитального ремонта.

Как известно, при проектировании каждого грузоподъемного крана общего назначения, размеры сечений его несущих элементов металлоконструкции рассчитывают исходя из паспортной грузоподъемности (или грузового момента) и группы классификации (режима) крана, которую задает проектировщик согласно указаниям стандарта [106] (см. таблицу 2.5).

Принимая во внимание, что суммарную наработку грузоподъемного крана общего назначения, учитываемую регистраторами параметров, представляют в виде произведения  $k_m \times U_i$ , вероятность того, что с несущими (расчетными) элементами металлоконструкции грузоподъемного крана за весь срок службы ни

в одном из рабочих циклов не произойдет аварии, можно определить следующим образом:

$$P \leq \frac{1}{k_{mi} \times U_i}, \quad (2.20)$$

где  $k_{mi}$  – коэффициент распределения нагрузок для соответствующего режима нагружения –  $q_i$ , выбираемый из таблицы 2.5 [106];

$U_i$  – максимальное число циклов для соответствующего класса использования, выбираемое из таблицы 2.5 [106] для заданной группы классификации (режима) крана в целом.

Таблица 2.5 – Группы классификации (режима работы) кранов в целом [106]

| 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 |                   |                   |                    |                   |                 |                 |                 |                 |                       |
|                        |                                          | $1,6 \times 10^4$                 | $3,2 \times 10^4$ | $6,3 \times 10^4$ | $1,25 \times 10^5$ | $2,5 \times 10^5$ | $5 \times 10^5$ | $1 \times 10^6$ | $2 \times 10^6$ | $4 \times 10^6$ | более $4 \times 10^6$ |
| $q_1$ - легкий         | 0,125                                    |                                   |                   | A1                | A2                 | A3                | A4              | A5              | A6              | A7              | A8                    |
| $q_2$ - умеренный      | 0,250                                    |                                   | A1                | A2                | A3                 | A4                | A5              | A6              | A7              | A8              |                       |
| $q_3$ - тяжелый        | 0,500                                    | A1                                | A2                | A3                | A4                 | A5                | A6              | A7              | A8              |                 |                       |
| $q_4$ - весьма тяжелый | 1,000                                    | A2                                | A3                | A4                | A5                 | A6                | A7              | A8              |                 |                 |                       |

Заштрихованные области таблицы 2.5 [106] не используют для определения группы классификации (режима работы) крана в целом.

Используя приведенную формулу (2.20), определим максимально допустимую вероятность возникновения аварии для грузоподъемного крана общего назначения, которому при проектировании назначена группа классификации (режима) – A5, полученная для максимального числа рабочих циклов -  $U_5 = 5 \times 10^5$  и коэффициента распределения нагрузок -  $k_m = 0,250$ :

$$P \leq \frac{1}{k_m \times U_i} = 0,8 \times 10^{-5}.$$

Приведенный пример показывает, что если элементы металлоконструкции спроектированы и изготовлены с соблюдением существующих норм,

возникновение в расчетных металлоконструкциях грузоподъемного крана общего назначения разрушений (или значительных остаточных деформаций), не подлежащих ремонту (восстановлению) не произойдет ни в одном из рабочих циклов в течение срока службы грузоподъемного крана, если их расчетная вероятность разрушения или возникновения остаточных деформаций, не подлежащих ремонту, будет  $P \leq 0,8 \times 10^{-5}$ .

Сравнивая полученное значение вероятности со значениями, приведенными в таблице 2.4 [61], можно сделать вывод, что рекомендации профессора А.А. Зарецкого, в случае подобной аварии, могут сопровождаться «гибелью менее 5 человек или материальным ущербом, не превышающим 10 кратную стоимость крана».

Используя формулу (2.20), нами выполнен расчет максимально допустимых вероятностей аварий металлоконструкций грузоподъемных кранов общего назначения и для других групп классификации (режимов). Результаты указанных расчетов для классов использования и коэффициентов распределения нагрузок, определяющих соответствующие группы классификации (режима) крана в целом, приведены в таблице 2.6, опубликованной в работах с участием автора данной работы [57, 95].

Анализ результатов, приведенных в таблице 2.6, показывает, что максимально допустимые значения вероятностей аварий металлоконструкций грузоподъемных кранов общего назначения могут существенно отличаться от приведенных в таблице 2.4 [61] и во всех случаях выше по требованиям, чем  $10^{-3}$  – минимального предела, предложенного профессором А.А. Зарецким. Если даже принять во внимание необходимость выполнения капитального ремонта металлоконструкции грузоподъемного крана в течение срока службы, как это указано проектировщиком (или изготовителем) в паспорте крана при назначении «ресурса до первого капитального ремонта», то проектная вероятность аварии его металлоконструкции все равно должна быть на порядок ниже нижнего предела, приведенного в таблице 2.4 [61].

Таблица 2.6 – 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                                      | $0,63 \times 10^{-4}$             | $0,32 \times 10^{-4}$ | $0,16 \times 10^{-4}$ | $0,8 \times 10^{-5}$  | $0,5 \times 10^{-5}$  | $0,2 \times 10^{-5}$  | $10^{-6}$            |                      |                      |                   |

Для определения фактической проектной вероятности возникновения в расчетных металлоконструкциях грузоподъемного крана общего назначения разрушений (или значительных остаточных деформаций), не подлежащих ремонту (восстановлению), можно воспользоваться методикой, опубликованной автором в работе [92]. Практические расчеты, выполненные для ряда металлоконструкций грузоподъемных кранов общего назначения по методике [92] показывают, что проектная расчетная вероятность аварии в таких случаях (при отсутствии перегрузок крана) обычно удовлетворяет условию (2.20), т.е. отсутствие аварии металлоконструкции грузоподъемного крана в течение срока службы обеспечено.

Оценив риски, связанные с возможной аварией металлоконструкции, выскажем свое мнение и о рисках, связанных с механизмами крана. Согласно определению «аварии ПС» в нормативе [184], нам необходимо оценить «риск падения транспортируемого груза».

Как известно, расчет механизма подъема грузоподъемного крана выполняют исходя из его паспортной грузоподъемности и группы классификации (режима) механизма, которую задает проектировщик согласно указаниям стандарта [106].

Для определения численных значений максимально допустимых вероятностей аварий, связанных с отказами элементов механизма подъема, удерживающих груз (редуктора и тормоза), по форме применимо приведенное выше условие (2.20). Разница лишь в том, что в знаменатель выражения (2.20) вместо  $U_i$  должна быть поставлена  $T_i$  – продолжительность работы механизма в часах, согласно указаниям стандарта [106], а числитель выражения (2.20) умножен на среднюю продолжительность одного рабочего цикла крана, которую можно назначить, используя рекомендации работы [151].

Такой подход определения численного значения максимально допустимой вероятности аварии, разработанный с участием автора и опубликованный в [95], справедлив перед началом эксплуатации и для стальных канатов механизма подъема крана, однако стальные канаты являются быстроизнашивающимися элементами механизма подъема, неоднократно заменяемыми за срок службы крана. В этой связи, в знаменателе должна стоять скорректированная цифра  $T_i$ , что обычно весьма затруднительно, поскольку достаточно достоверной статистики по наработке стальных канатов у проектировщиков пока нет.

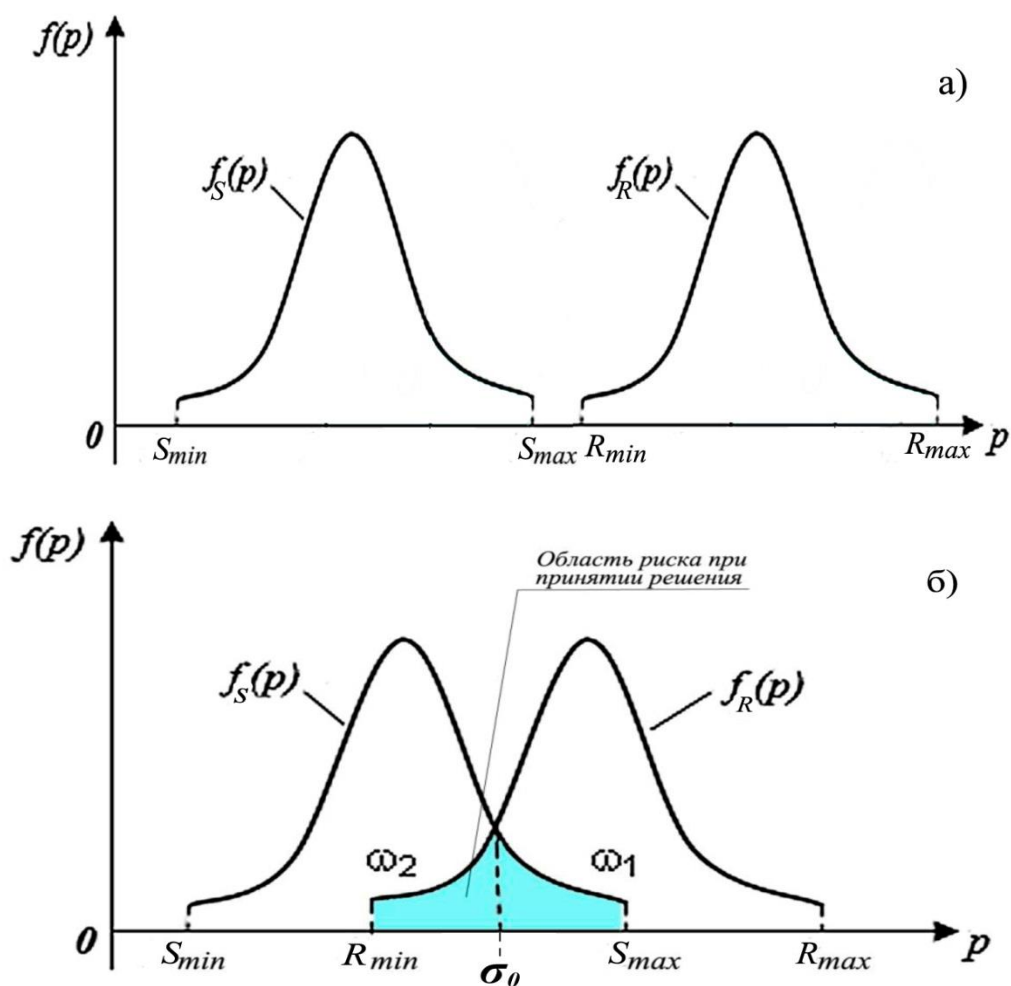
Стальные крюки, установленные на механизмах подъема, как правило, не включают в оценку вероятности падения груза [92], поскольку при правильном выборе их нагрузочная способность существенно превышает грузоподъемность крана.

## **2.4 Методические основы оценки надежности и риска на примере грузоподъемного крана (и механизмов крана) для объекта использования атомной энергии (ОИАЭ)**

В данном разделе работы, в качестве примера, рассмотрим подход к оценке надежности и риска для мостового крана, предназначенного для последующей эксплуатации на одном из ОИАЭ. Это сделано не случайно, поскольку подобный выбор является наиболее общим для мостовых кранов на рельсовом ходу и включает не только использование результатов обычного прочностного расчета металлоконструкции крана и его механизмов, но также и результатов его возможного напряженно-деформированного состояния от нагрузок, которые могут возникнуть при сейсмическом возмущении.

Итак, прежде чем рассмотреть выбранный для примера мостовой кран более подробно, рассмотрим требования к подобным оценкам, которые изложены в ранее выполненных работах и нормативных документах.

Как известно, если металлическая конструкция правильно спроектирована, изготовлена и эксплуатируется с соблюдением всех требований в течение ее расчетного срока эксплуатации, теоретически ее надежность можно представить в виде, показанном на рисунке 2.2 а) [174]:



а) когда надежность равна 1, и б) когда возникает риск разрушения, где  $f_S(p)$  – плотность распределения напряжений в металлической конструкции крана, а  $f_R(p)$  – расчетная плотность распределения вероятностей ее несущей способности

Рисунок 2.2 – Положение плотностей распределения эксплуатационных напряжений и расчетной несущей способности металлоконструкции

Для этого случая ее надежность  $N_{ad}$  можно представить в виде:

$$N_{ad} = \int_{R_{min}}^{R_{max}} f_R(p) dp = 1, \quad (2.21)$$

что означает абсолютную надежность металлической конструкции и вероятность ее разрушения  $Q = 0$ .

Однако, на практике наиболее реальным оказывается случай, представленный на рисунке 2.2 б) [174], означающий, что плотности распределения  $f_S(p)$  и  $f_R(p)$  имеют некоторые общие зоны, обозначенные, соответственно  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$\omega_1 = 1 - \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} f_S(p) dp, \quad (2.22)$$

$$\omega_2 = 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} f_R(p) dp. \quad (2.23)$$

Известно, что профессор, доктор технических наук Н.С. Стрелецкий сформулировал основной принцип всякого инженерного расчета [174], который состоит в том, чтобы было соблюдено *условие неразрушимости*. Исходя из этого принципа, наибольшая возможная или, иначе сказать, предельная нагрузка должна быть меньше или равна наименьшей несущей способности конструкции, вычисленной с учетом рассеяния показателей качества материала, нагрузок и условий работы конструкции, а также с учетом фактора времени. Применительно к максимальной вероятности разрушения пролетных балок металлоконструкции грузоподъемного крана для случая, показанного на рисунке 2.2 б), это условие можно представить в следующем виде:

$$Q_{n\bar{o}} = 1 - (1 - \omega_1) \times (1 - \omega_2) = \omega_1 + \omega_2 - \omega_1 \omega_2 = 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} f_R(p) dp + \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} f_S(p) dp - \left( 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} f_R(p) dp \right) \times \left( \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} f_S(p) dp \right). \quad (2.24)$$

Приказом по Ростехнадзору с 16 августа 2013 г. введены в действие новые Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии (ФНП) [134] для грузоподъемных кранов ОИАЭ. Согласно п. 10 [134], «Проекты кранов ОИАЭ должны разрабатываться в соответствии с проектами ОИАЭ по утверждаемым эксплуатирующей организацией техническим заданиям и (или) исходным техническим требованиям на конструирование (проектирование) специальных кранов (далее – технические задания на кран), требования к

содержанию которых приведены в приложении № 1 к настоящим Правилам».

Среди известных требований, которые установлены к содержанию технического задания на проектирование грузоподъемных кранов для ОИАЭ, пунктом в) приложения 1 [134] включено и требование о «...наличии показателей надежности кранов и их основных элементов (в том числе назначенного срока службы, ресурса до первого капитального ремонта), а также критериев отказов и предельного состояния...».

Следует отметить, что аналогичное требование существовало и раньше, однако нормативов, определяющих структуру, методику и содержание документа по обоснованию надежности грузоподъемного крана и его частей, а также исключению падения в эксплуатации транспортируемых краном грузов до сих пор не принято. В этой связи, представляется целесообразным обобщить и изложить подход, который «де-факто» частично уже используется рядом известных отечественных проектировщиков грузоподъемных кранов для ОИАЭ (например, ОАО НПО «ВНИИПТМАШ», ЗАО «Сиб-Тяжмаш», ЗАО «КТБ «ТЕХНОРОС»), а также предложить единый алгоритм разработки и требования к содержанию документа по обоснованию надежности грузоподъемных кранов ОИАЭ.

Развитие исследований по надежности отечественных грузоподъемных кранов началось еще в 70-х годах прошлого столетия с известных работ В.И. Брауде, Л.В. Коновалова, А.Ю. Пинеса, результаты которых позднее были опубликованы в справочниках и монографиях [16, 70, 143, 172]. По итогам этих работ было разработано несколько отраслевых стандартов, среди которых сегодня наибольший интерес представляет [135], поскольку именно в нем изложен подход к определению показателей надежности.

Разумеется, работы [16, 70, 143, 172] касались лишь оценок надежности общепромышленных кранов и их результаты, например, в части использования конкретных цифр показателей надежности, не в полной мере могут быть применены для грузоподъемных кранов ОИАЭ. Однако, приведенная в них методика и сегодня представляет практический интерес, хотя в ней нужно

отметить следующие недостатки:

- общепромышленные краны для обычных условий эксплуатации не рассчитывают на сейсмические воздействия (сейсмостойкость);
- группы классификаций кранов общего назначения в обычных условиях эксплуатации редко превышают А5, в то время как краны для ОИАЭ проектируют на более высокую группу классификации А6 и выше;
- группы классификации механизмов кранов общего назначения в обычных условиях эксплуатации редко превышают М5, в то время как для механизмов кранов для ОИАЭ минимальной группой классификации механизмов является М5.

Для изложения подхода автора диссертации к оценке надежности крана ОИАЭ [60], рассмотрим в качестве примера, мостовой электрический кран, имеющий грузоподъемность главного подъема 20 т и вспомогательного подъема – 5 т (далее – кран). Данный кран предназначен для выполнения подъёмно-транспортных и погрузочно-разгрузочных операций с высоко-, средне- и низкоактивными отходами, а при завершении эксплуатации АЭС – для выполнения подъёмно-транспортных операций демонтажа оборудования [134].

Целью описания приводимой ниже методики является определение показателей надёжности и вероятности отказов элементов мостового крана, приводящих к падению груза, крана или частей крана при нагрузках и воздействиях указанных в техническом задании на кран, разработанном в соответствии с указаниями приложения [176, 183]. При этом согласно требованиям технического задания, обычно требуется подтвердить, что вероятность отказа (падения груза, крана или частей крана) не превысит  $1,0 \times 10^{-7}$  1/год.

Дополнительными исходными данными, которые необходимы для определения показателей надежности, являются «Расчёт прочности стальной конструкции моста и грузовой тележки», а также «Расчёт крана мостового на сейсмическую прочность». Сами тексты прочностных расчетов, мы приводить не

будем, однако, в тех случаях, когда это будет необходимо, сошлемся на их конкретные результаты.

Основные технические характеристики крана ОИАЭ, для которого необходимо оценить показатели надежности, приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Основные технические характеристики мостового крана ОИАЭ для оценки его надежности

| №№<br>п.п. | Наименование характеристики                                   | Значение или<br>величина                 |
|------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1          | Грузоподъёмность полезная, т:                                 |                                          |
| 1.1        | Главный подъем                                                | 20,0                                     |
| 1.2        | Вспомогательный подъем                                        | 5,0                                      |
| 2          | Группа классификации (режима) работы крана по ИСО 4301/1      | A7                                       |
| 3          | Группа классификации (режима) работы механизмов по ИСО 4301/1 |                                          |
| 3.1        | Главного подъема                                              | M5, при числе рабочих циклов - 325 в год |
| 3.2        | Вспомогательного подъема                                      | M5, при числе рабочих циклов - 6 в год   |
| 4          | Основные геометрические характеристики:                       |                                          |
| 4.1        | База крана, м                                                 | 4,0                                      |
| 4.2        | Пролет, м                                                     | 16,5                                     |
| 4.3        | Колея тележки, м                                              | 2,0                                      |
| 4.4        | Высота подъема главного/вспомогательного, м                   | 18,0/18,0                                |
| 4.5        | Кратность полиспастов:                                        | 2/1                                      |
| 5          | Скорости механизмов, м/сек                                    |                                          |
| 5.1        | Главный подъем груза (номинальная)<br>Вспомогательный подъем  | 0,05<br>0,05                             |
| 5.2        | Передвижения крана (номинальная)                              | 0,33                                     |
| 5.3        | Передвижения тележки (номинальная)                            | 0,33                                     |
| 6          | Масса крана и его составных частей, т                         | 21,7                                     |

## Продолжение таблицы 2.7

|   |                                                                                                                          |                               |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 7 | Сейсмичность максимального расчетного землетрясения (МРЗ), согласно требованиям технического задания, баллы по шкале MSK | 6 баллов по СНиП II-7-81[185] |
| 8 | Материал расчетных элементов металлоконструкции крана и грузовой тележки                                                 | 09Г2С<br>ГОСТ 19281-89 [36]   |

Изложение данной методики начнем с использования общепринятых принципов расчета металлоконструкции мостового крана по предельным состояниям, изложенной в стандарте [173], дополняя эту методику учетом внешних воздействий в специфических условиях эксплуатации крана ОИАЭ, изложенной автором в [57, 96, 98]. Согласно нормативу [164] (часть II, глава 23), расчетные сопротивления проката из стали 09Г2С по пределу текучести при растяжении, сжатии и изгибе –  $R_y$ :

$$R_y = R_{yn} / \gamma_m, \quad (2.25)$$

где  $R_{yn}$  – предел текучести стали, принимаемый по стандартам или техническим условиям на сталь;

$\gamma_m = 1,05$  – коэффициент надежности по материалу.

Предел текучести  $R_{yn}$  стали 09Г2С при толщине проката до 20 мм примем согласно [102] равным 325 МПа. Соответственно, расчетные сопротивления стального проката из стали 09Г2С для последующих расчетов могут быть приняты равными  $R_y = 309,5$  МПа.

Особенности конструкции данного крана для ОИАЭ учтем дополнительным коэффициентом условий работы –  $\gamma_c$ , понижающим расчетное сопротивление  $R_y$ , который, согласно рекомендациям таблицы 4.1 [173], примем равным 0,90 для всех расчетных сочетаний нагрузок. Тогда, скорректированное значение расчетного сопротивления элементов металлоконструкции крана из стали 09Г2С составит:

$$R_{ync} = R_y \times \gamma_c = 278,55 \text{ МПа}.$$

Данный кран является элементом нормальной эксплуатации, важным для безопасности АЭС и, согласно требованиям технического задания, относится к классу безопасности – 1 (классификационное обозначение – 1Н, в соответствии с [134]), по влиянию на безопасность ОИАЭ – группе А, согласно классификации, приведенной в [134] и к оборудованию I категории сейсмостойкости в соответствии с [133]. Требованиями технического задания срок службы крана установлен равным 60 годам, а срок службы до первого капитального ремонта – не менее 12 лет.

В качестве объектов анализа, в приводимой ниже математической модели расчета показателей надежности, примем следующее механическое оборудование крана:

- пролетные балки коробчатого сечения;
- редукторы главного и вспомогательного механизмов подъемов;
- тормоза главного и вспомогательного механизмов подъемов;
- грузовые канаты главного и вспомогательного механизмов подъемов.

Анализ надежности остальных элементов механического оборудования рассматриваемого мостового крана ОИАЭ можно не выполнять с учетом следующих обоснований:

- согласно статистике результатов расчетов металлоконструкции мостовых кранов на сейсмическую прочность, уровень напряжений в их концевых балках существенно ниже уровня напряжений в главных балках, поэтому их разрушение при сейсмическом толчке существенно менее вероятно [91];

- уровень напряжений в ходовых колесах также невысок. Поскольку кран и его грузовая тележка оборудованы дополнительными опорными элементами, вступающими в работу в случае поломки ходовых колес, падение крана или грузовой тележки из-за поломки ходовых колес существенно менее вероятно;

- уровень напряжений в крюках главного и вспомогательного подъема также оценивать не будем, поскольку заготовки крюков, использованные на кранах ОИАЭ обычно устанавливают с запасом по грузоподъемности для нормальных условий эксплуатации: например, заготовку крюка главного подъема данного крана 20Б-1 по

[39] можно использовать до грузоподъемности 25 т, а заготовку крюка вспомогательного подъема 14А-1 по [39] – до грузоподъемности 6,3 т. Соответственно, сейсмический толчок максимального расчетного землетрясения (МРЗ) приведет лишь к кратковременному снижению коэффициента запаса одного из крюков по грузоподъемности, но не к полному его разрушению.

При определении расчетных показателей надёжности кранов для ОИАЭ всегда целесообразно использовать статистическую эксплуатационную информацию по надёжности элементов металлоконструкций кранов-аналогов, даже если она касается кранов общего назначения аналогичных грузоподъемностей, групп классификаций и пролетов. Например, металлоконструкция рассматриваемой математической модели мостового крана полностью соответствует конструкции ранее изготавливаемых мостовых кранов г/п 20 т, группы классификации А7, и лишь дополнена антисейсмическими устройствами, препятствующими сходу с рельсов грузовой тележки и самого крана во время сейсмического толчка.

Определение характеристик надёжности рассматриваемого мостового крана начнем с определения коэффициента готовности  $K_r$ , который согласно требованиям технического задания на рассчитываемый кран должен быть не менее 0,99.

$K_r$  – это вероятность того, что кран будет работоспособен в произвольно выбранный момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания. В случае установившегося режима эксплуатации [143],

$$K_r = T / (T + T_{\text{с}}), \quad (2.26)$$

то есть, отношение средней наработки на отказ, применительно к внезапным отказам не требующих значительных затрат на восстановление работоспособного состояния, к сумме средней наработки на отказ и времени приведения крана в работоспособное состояние (времени восстановления после отказа).

По [34] (таблица 2) выбираем для мостового крана общего назначения

грузоподъемностью 20/5 т среднюю наработку на отказ для аналогичного случая, равную 8000 циклов, тогда коэффициент готовности, можно рассчитать по следующей формуле:

$$K_{г\text{ рас}} = T / (T + T_{\text{е}}) = 0,9998, \quad (2.27)$$

где  $T = 8000$  час – средняя наработка на отказ, применительно к внезапным отказам, не требующим значительных затрат на восстановление работоспособного состояния (с продолжительностью восстановления до 5 часов во время внепланового ремонта);

$T_{\text{е}} = 1,34$  час – среднее время восстановления работоспособного состояния после внезапных отказов. Таким образом, соотношение между расчётным  $K_{г\text{ рас}}$  и установленным  $K_{г}$  значением коэффициента готовности полностью выполняется.

Определение срока службы до капитального ремонта будем вычислять как вероятность того, что кран будет работоспособен в произвольно выбранный момент времени в промежутках между выполнениями планового технического обслуживания.

Для рассчитываемого мостового крана примем условие ориентировочного равенства его наработки до капитального ремонта с краном - аналогом, согласно данным таблицы 3 [154] для специальных мостовых кранов грузоподъемностью до 50 т (к которым относится рассчитываемый нами мостовой кран 20/5). Назначив крану ресурс до капитального ремонта 18000 циклов, подсчитаем его расчётный срок службы до капитального ремонта в годах:

$$T_{п\text{ к}} = T_{п\text{ кп}} / T_{год} = 55 \text{ лет}, \quad (2.28)$$

где  $T_{п\text{ кп}} = 18000$  циклов – средняя наработка до капитального ремонта по крану-аналогу;

$T_{год} = 325$  циклов/год – установленное для крана суммарное время наработки за год, получено суммированием числа циклов в третьем столбце таблицы 2.8 для главного подъема.

Таблица 2.8 – Установленная продолжительность циклов и наработка рассчитываемой модели крана за год, согласно требованиям [176], час

| Наименование и масса груза                                                               | Всего циклов | Циклов за год | Продолжительность цикла, час | Нарботка за год, час | Годовая доля времени, $\times 10^{-3}$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------|------------------------------|----------------------|----------------------------------------|
| Контейнеры со среднерадиоактивными отходами, масса 7,5 т                                 | 368          | 23            | 0,4                          | 9,2                  | 1,1                                    |
| Контейнеры с низкорадиоактивными отходами, масса 7,5 т                                   | 752          | 47            | 0,4                          | 18,8                 | 2,1                                    |
| Контейнеры с высокорадиоактивными отходами, масса 10,5 т                                 | 50           | 1             | 0,4                          | 0,4                  | 0,05                                   |
| Контейнеры, масса 15,3 т                                                                 | 72           | 6             | 0,3                          | 1,8                  | 0,21                                   |
| Плита-кондуктор, масса 7 т                                                               | 304          | 44            | 0,4                          | 8,8                  | 1,3                                    |
| Контейнеры, масса 5,8 т                                                                  | 80           | 16            | 0,3                          | 4,8                  | 0,55                                   |
| Устройство перегрузочное, масса 3,2 т                                                    | 304          | 44            | 0,4                          | 8,8                  | 1,3                                    |
| Плиты перекрытия над отсеками хранения среднеактивных отходов, <i>тах</i> масса 10,626 т | 1254*        | 144           | 0,3                          | 43,2**               | 4,9*                                   |
| Вспомогательный подъем:                                                                  |              |               |                              |                      |                                        |
| Плиты перекрытия над отсеком хранения высокоактивных отходов, <i>тах</i> масса 4,622 т   | 50           | 6             | 0,3                          | 1,8                  | 0,2                                    |

В таблице 2.8 значения продолжительности цикла даны по наихудшему варианту.

Отсюда получаем, что соотношение между расчётным и установленным значением ресурсов до капитального ремонта

$$T_{p\kappa} = 55 \text{ лет} > T_p = 12 \text{ лет}, \quad (2.29)$$

выполняется со значительным запасом.

Учитывая, что на рассматриваемом кране наработка до капитального ремонта, вычисленная по формуле (2.29) близка к полному установленному сроку

службы крана (до списания), то можно принять назначенный (проектный) срок службы до списания  $T_{cn} = 60$  лет в соответствии с указанным в техническом задании на кран.

Вероятность возникновения события, связанного с конкретным видом отказа рассматриваемого крана (например, падения груза при транспортировке), определим построив «дерево неисправностей (отказов)» [94].

Каждому первичному событию в «дереве неисправностей (отказов)» приписывается соответствующая вероятность возникновения этого события за указанный период времени. Вероятность вершинного события вычисляется, при этом, по правилам булевой алгебры.

Вершинное событие – падение груза или частей крана, вычисляется через отказы отдельных элементов. Таким образом, в рассматриваемом случае аварийный отказ крана – это событие, приводящее к падению груза или частей крана.

«Дерево неисправностей (отказов)», разработанное автором для крана, с принятыми обозначениями символов событий по таблице А.1 [36], показано на рисунке 2.3 [94].

Из всех возможных видов отказов (неисправностей) рассматриваемого крана выделим те, которые принципиально могут привести к падению груза или частей крана:

1. Разрушения при сейсмических воздействиях. Вычисляется вероятность разрушения пролётных балок, редуктора подъёма, грузового каната и тормоза. Распределение повторяемости сейсмических воздействий обычно задают в техническом задании на кран «вероятностями не превышения» величин, учитываемых в расчётах ускорений за принятый срок службы 60 лет.

2. Разрушения механических элементов металлоконструкции и механизмов вследствие усталости. Вычисляется вероятность отказа через оценку долговечности пролётных балок и грузового каната, при разрушении которых возможно падение груза. Вероятности отказов из-за усталостного разрушения

остальных механизмов не анализируется, поскольку они на один – два порядка ниже основных элементов, принятых для дальнейшего расчета.

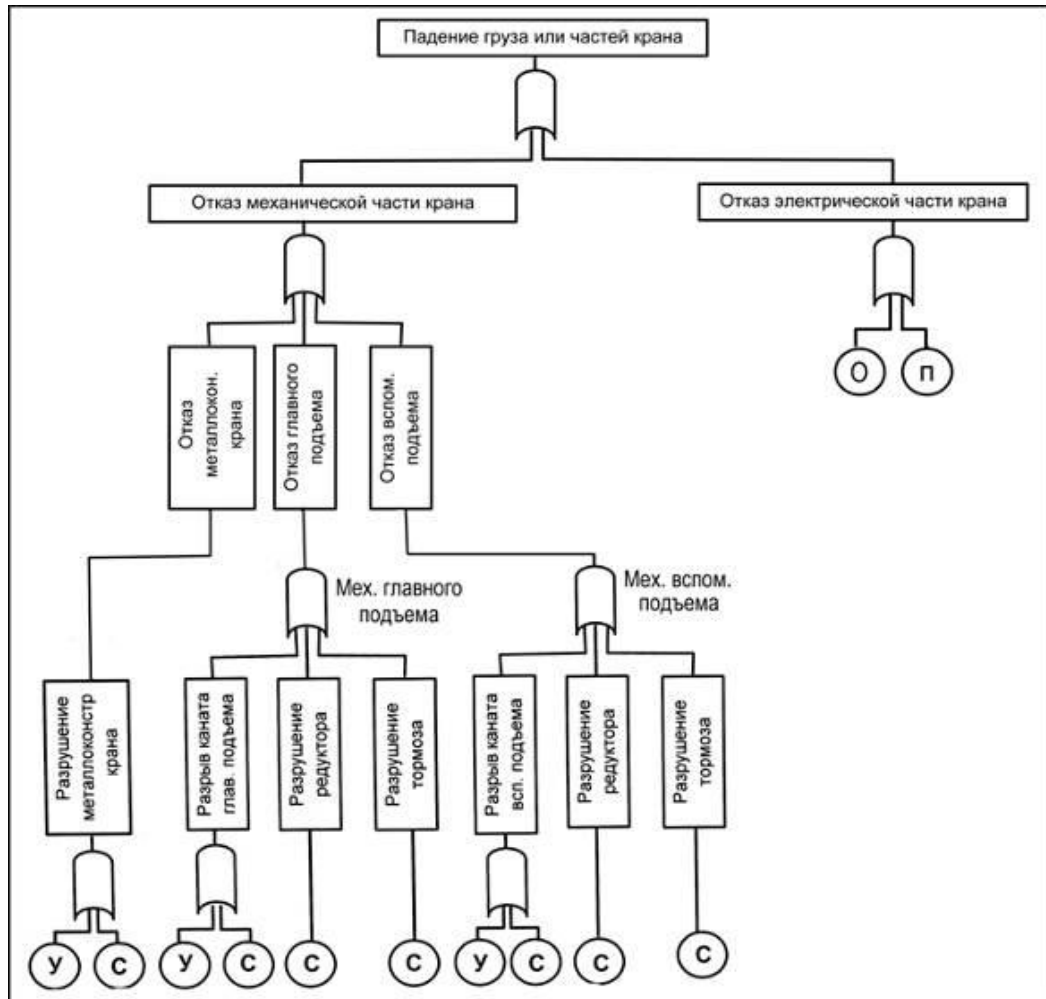


Рисунок 2.3 – Вид «Дерева неисправностей (отказов)» для рассчитываемого мостового крана 20/5т

3. Разрушения от несанкционированного перемещения крана или падения груза вследствие отказа электрической части, соответственно, механизмов подъёма крана, а также ошибок персонала, управляющего краном.

## 2.5 Математическое моделирование оценки надежности и риска на примере мостового крана для объекта использования атомной энергии (ОИАЭ)

Покажем, каким образом можно смоделировать математически вероятность разрушения пролётных балок крана при сейсмическом воздействии. Под разрушением пролётных балок будем понимать потерю их несущей способности в результате перехода верхнего или нижнего пояса балки в пластическое состояние по всей ширине, при этом запас несущей способности за счёт упругого состояния стенок балки в расчёт не принимаем. Предел текучести по стандартам на сталь имеет обеспеченность (вероятность того, что для данного конкретного материала значение  $R_{ync}$  будет не ниже указанной цифры) 95%, тогда, математическое ожидание предела текучести материала металлоконструкции рассчитываемого крана можно определить из следующего выражения [21]:

$$m_R = \frac{R_{ync}}{1 + u_p \cdot v} = 309,0 \text{ МПа}, \quad (2.30)$$

где  $u_p = -1,645$  – квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности 0,95;  $v = 0,06$  – коэффициент вариации предела текучести.

Среднее квадратическое отклонение предела текучести составит [21]:

$$\sigma_R = m_R v = 18,54 \text{ МПа}. \quad (2.31)$$

Расчет прочности проводим по линейной теории, следовательно, напряжения в рассматриваемом сечении конструкции можно выразить как

$$\sigma = K \times q, \quad (2.32)$$

где  $K$  – параметр численно равный напряжению в поясе пролётной балки при МРЗ, при этом напряжения от собственного веса конструкции и груза складываются по абсолютной величине с напряжениями от сейсмического воздействия;

$q$  – вероятность возникновения указанного напряжения (вероятность

возникновения МРЗ, установленная в Техническом задании на срок службы крана).

В настоящее время системная теория надежности стала составной частью более общего раздела прикладных наук – теории больших систем. На этой основе далее развивают методологию проектирования систем и машин, обладающих высокими показателями надежности. К такому классу машин можно отнести и грузоподъемные краны ОИАЭ.

При постановке большинства задач требуемые показатели надежности обычно задают в Технических заданиях на проектирование, то есть считают заданными.

Для невосстанавливаемых элементов системы (или машины) обычно ищут подходящие аналитические аппроксимации либо для вероятности безотказной работы –  $P(t)$ , либо для интенсивности отказов –  $\lambda(t)$  [15].

Ресурсные испытания и наблюдения за выборками в эксплуатации показывают, что в большинстве случаев интенсивность отказов во времени изменяется немонотонно (Рисунок 2.4).

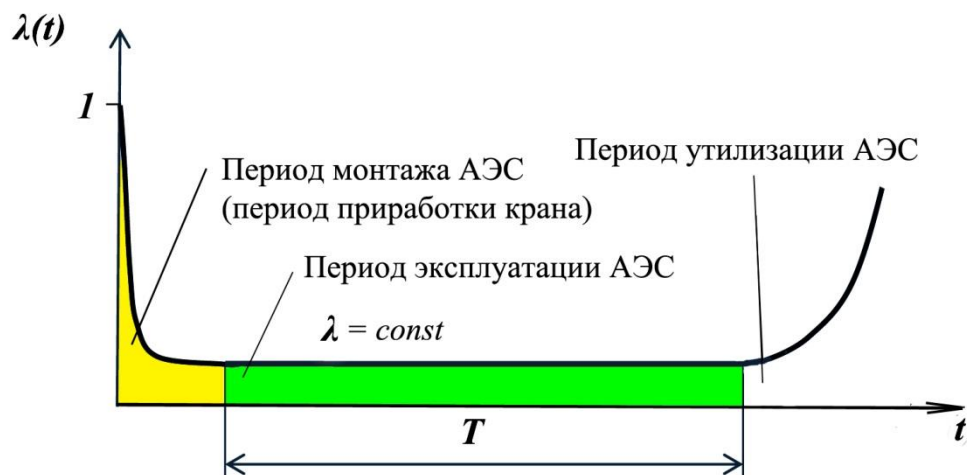


Рисунок 2.4 – Типовое изменение интенсивности отказов –  $\lambda(t)$  во времени

После начального периода приработки наступает достаточно длительный этап, когда интенсивность отказов приблизительно постоянна. Затем, вследствие

изнашивания, старения, накопления усталостных напряжений и других процессов интенсивность отказов возрастает. Когда она достигает некоторого уровня, дальнейшая эксплуатация нецелесообразна и система (грузоподъемный кран) переходит в свое предельное состояние.

Применительно к грузоподъемному оборудованию ОИАЭ, если за начало эксплуатации принять период монтажа оборудования ОИАЭ, когда кран уже работает довольно интенсивно в течение длительного периода выполнения работ по монтажу оборудования (как правило, не менее 1 года), то к началу постоянной эксплуатации объекта все внезапные отказы уже проявят себя и будут устранены. Далее, эксплуатация грузоподъемного оборудования (крана) будет проходить с постоянной интенсивностью отказов  $\lambda(t) = \text{const}$  (невысокий горизонтальный участок кривой на рисунке 2.4).

Для таких случаев, вероятность отказа  $P(t)$  грузоподъемного оборудования общепринято рассчитывать с использованием экспоненциального закона надежности – экспоненциального распределения [143]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.33)$$

Однако, применительно к металлической конструкции крана, подвергаемого сейсмическому воздействию, общее выражение для вероятности отказа (2.33) не совсем подходит, поэтому экспоненциальную плотность распределения необходимо представить в ином виде, например, как функцию напряжений, возникающих в металлоконструкции от случайного сейсмического воздействия.

Согласно [31], вероятность случайного сейсмического воздействия не может быть определена, как точная. Применение интервала повторяемости для характеристики вероятности возникновения сейсмического воздействия является в известной степени условным и не означает, что для сооружений и оборудования сильное землетрясение произойдет в течение предполагаемого срока службы крана 60 лет, а означает лишь возможность того, что это событие произойдет.

В таких случаях, вероятность отказа металлоконструкции грузоподъемного крана ОИАЭ, распределенную по экспоненциальному закону удобно

представлять, в виде экспоненциальной плотности распределения напряжений в металлической конструкции [57]:

$$f_s(p) = e^{-\frac{\lambda}{K}(p-\sigma_0)}, \quad (2.34)$$

где  $\sigma_0$  – напряжения в элементе конструкции при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) от собственного веса металлоконструкции крана и груза,

$\lambda = 9,2$  – интенсивность возникновения МРЗ, установленная в Техническом задании на срок службы крана (60 лет) [176], являющаяся параметром выбранного нами экспоненциального распределения,

$p$  – параметр функции распределения (текущие напряжения в элементе конструкции),

$K$  – параметр численно равный напряжению в поясе пролётной балки при МРЗ из выражения (2.32).

Такое допущение о выборе распределения вполне оправдано, поскольку после периода монтажа объекта ОИАЭ, дальнейшая эксплуатация крана длительно происходит эпизодически до возможного возникновения МРЗ. При этом параметр экспоненциального распределения  $\lambda$ , как показано выше, практически сохраняет свое низкое постоянное значение.

Выбранная форма представления плотности экспоненциального распределения (2.33), является функцией трех параметров:  $p$ ,  $\lambda$  и  $\sigma_0$ . В данном случае параметр  $\lambda$  является параметром масштаба распределения и отношение  $\lambda / K$  показывает скорость убывания плотности распределения с ростом текущих значений напряжений  $p$ . Следует отметить, что численные значения  $\lambda$  в выражениях (2.33) и (2.34) совпадать не будут, поскольку являются функциями различных параметров (времени –  $t$  или напряжений –  $p$ ). Параметр  $\sigma_0$ , входящий в выражение (2.34), фактически определяет начало распределения, то есть смещает точку начала плотности распределения, об этом будет сказано при назначении пределов интегрирования в выражении (2.36).

Примем, что несущая способность металлической конструкции (функция

плотности распределения вероятностей) крана подчиняется нормальному закону, о чем свидетельствуют результаты различных исследований [21, 57]:

$$f_R(p) = \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2}}. \quad (2.35)$$

Тогда основную зависимость математической модели вероятности разрушения пролетных балок при сейсмическом воздействии, с учетом ранее представленной зависимости (2.24) можно получить, после подстановки в нее выражений для  $f_S(p)$  (2.34) и  $f_R(p)$  (2.35) по следующей формуле:

$$\begin{aligned} Q_{нб} &= 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} f_R(p) dp + \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} f_S(p) dp - \left( 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} f_R(p) dp \right) \times \left( \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} f_S(p) dp \right) = \\ &= 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2}} dp + \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} e^{-\frac{\lambda}{K}(p-\sigma_0)} dp - \\ &\quad - \left( 1 - \int_{\sigma_0}^{R_{\max}} \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2}} dp \right) \times \left( \int_{S_{\min}}^{\sigma_0} e^{-\frac{\lambda}{K}(p-\sigma_0)} dp \right) = \\ &= \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} \int_{\sigma_0}^{\infty} e^{\left( -\frac{(p-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2} - \frac{\lambda}{K}(p-\sigma_0) \right)} dp. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Как видно из (2.36), интегрирование ведется от нижнего предела  $\sigma_0$ , поскольку, как было отмечено выше при описании параметров плотности распределения (2.34), ее начало отсчета смещено именно в эту точку.

При практическом вычислении интеграла его верхний предел, как правило, ограничивают и делают равным  $(2 \times R_{unc})$ , поскольку напряжения выше двукратного расчетного сопротивления в металлоконструкции, без ее перехода в пластическое состояние и разрушения, физически возникать не могут. Подставляя в полученное автором выражение (2.36) данные напряжений при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) и условиях НУЭ плюс максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) получаем величины вероятности разрушения пролетных балок мостового крана, которые представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Вероятность разрушения пролётных балок крана при сейсмическом воздействии

| Нагрузка                      | Годовая доля времени, $\Delta t_i$ | Напряжения в поясах пролётных балок при НУЭ, $\sigma_0$ , МПа | Напряжения в поясах пролётных балок при НУЭ+МРЗ, МПа | Вероятность разрушения $Q_i$ , год |
|-------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Собственный вес крана         | 1,0                                | 55                                                            | 65                                                   | $<10^{-12}$                        |
| Эксплуатационный груз до 20 т | $9,94 \times 10^{-3}$              | 108                                                           | 120                                                  | $0,17 \times 10^{-8}$              |
| Эксплуатационный груз до 5 т  | $0,2 \times 10^{-3}$               | 60                                                            | 70                                                   | $<10^{-11}$                        |

При выполнении расчетов параметров вероятности разрушения, результаты которых сведены в таблицу 2.9, для груза 20 т принималось допущение, что кран работает только с максимальным грузом, равным 15,3 т, поскольку это максимальная масса транспортируемого краном контейнера из таблицы 2.8, однако иногда, при вычислении интеграла по формуле (2.36) целесообразно сделать несколько расчетов с различными задаваемыми величинами максимального транспортируемого груза, что позволяет выявить резерв по показателю надежности крана, связанный с небольшим снижением его паспортной грузоподъемности.

Анализ результатов расчета, приведенный в таблице 2.9, показывает, что суммарная вероятность разрушения пролётных балок от сейсмического воздействия существенно ниже предельного значения  $10^{-7}$  1/год, то есть отсутствие разрушения пролетных балок при заданном сейсмическом воздействии 6 баллов по [163] обеспечивается, что соответствует «отличному» состоянию системы, согласно определению таблицы 2.3.

Полученное выражение (2.36) можно использовать для математического моделирования оценки надежности главных балок мостового крана для ОИАЭ. Схема алгоритма указанного математического моделирования представлена на рисунке 2.5.

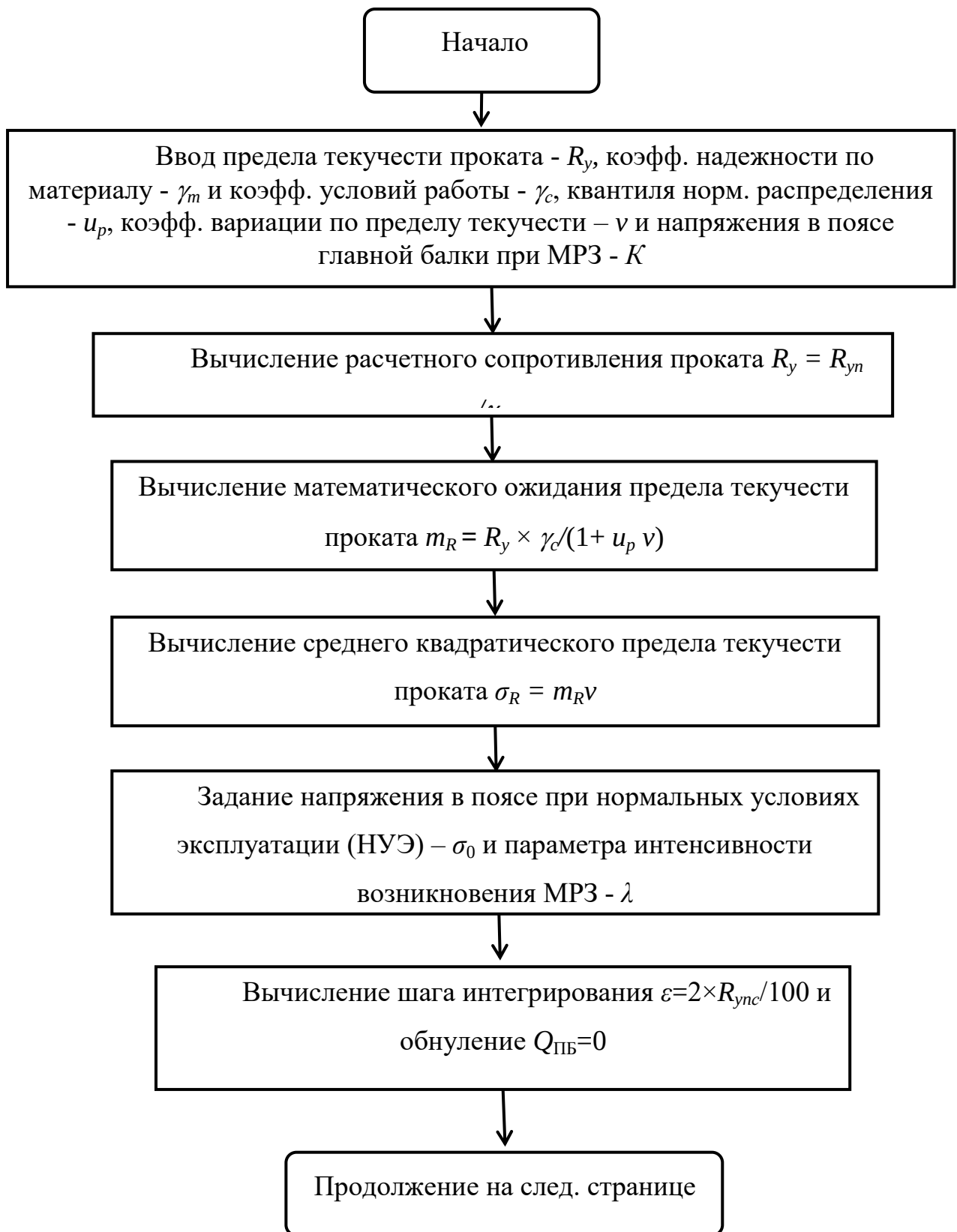


Рисунок 2.5 – Схема алгоритма математического моделирования оценки надежности главных балок мостового крана для ОИАЭ

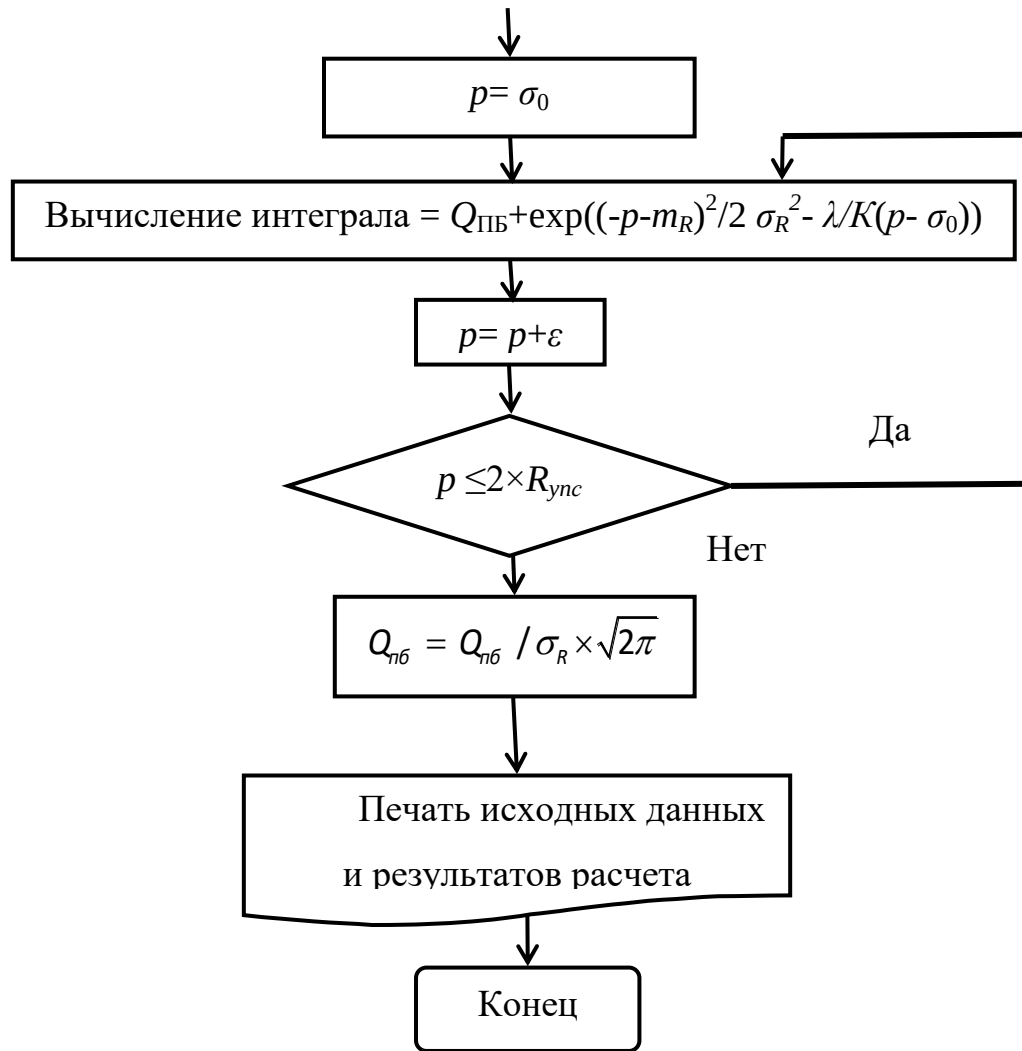


Рисунок 2.5 – Продолжение

Вероятность разрыва канатов главного и вспомогательного подъемов при сейсмическом воздействии также можно определить, используя выражение, аналогичное по форме выражению (2.36).

Известно, что максимальные напряжения в канате при землетрясении возникают при работе с грузом в верхней точке подъема. Для упрощения полагаем, что все время работы груз находится в этом положении.

Главный подъем рассчитываемого крана оснащен стальным канатом  $18 \times 7(1+6) + 5 \times 7(1+6) / 5 \times 7(1+6) + 5 \times 7(1+6) + 1 \times 7(1+6)$ , диаметром  $d = 21$  мм, имеющим временное сопротивление  $2160 \text{ Н/мм}^2$ , разрывное усилие  $S_{\text{разр}} = 387,386 \text{ кН}$ . Расчетное натяжение каната, согласно паспорту крана равно

50,43 кН.

Определим расчётное натяжение каната, соответствующее достижению в материале каната предела текучести:

$$m_R = S_{разр} (q_0 + q_1 d / D_{\delta l}) = 197,65 \text{ кН}, \quad (2.37)$$

где  $q_0 = 0,612$  и  $q_1 = -3,02$  – коэффициенты, зависящие от конструкции и вида свивки каната [202],

$D_{\delta l} = 623,0 \text{ мм}$  – диаметр блоков полиспастной системы рассчитываемого крана по дну ручья.

Коэффициент вариации предела текучести материала каната примем равным  $v = 0,04$ .

Тогда, среднее квадратическое отклонение расчётного натяжения каната, соответствующее достижению в материале каната предела текучести, составит:

$$\sigma_R = m_R v = 7,906 \text{ кН}. \quad (2.38)$$

Теперь мы получили все исходные данные для расчета вероятности разрыва каната главного подъёма грузовой тележки, которые можно для каждого режима нагружения определить численным интегрированием по формуле, аналогичной (2.36):

$$Q_{кан з} = \Delta t_i \frac{1}{\sigma_R \times \sqrt{2\pi}} \int_{S_0}^{\infty} e^{\left( -\frac{(R-m_R)^2}{2 \times \sigma_R^2} - \frac{\lambda}{K_k} (R-S_0) \right)} dR, \quad (2.39)$$

где  $\Delta t_i = 9,94 \times 10^{-3}$  – доля времени за год, для грузов до 20 т из таблице 2.9,

$K_k = 65,3 \text{ кН}$  – натяжение в канате с грузом до 20 т при НУЭ+МРЗ, определяемое расчетом крана на сейсмическое воздействие,

$S_0 = 53,43 \text{ кН}$  – натяжение в канате с грузом до 20 т при НУЭ,

$R$  – параметр интегрирования (текущее усилие в стальном канате).

Формулы (2.36) и (2.39) аналогичны по причине: интенсивность сейсмического воздействия как на кран в целом, так и на его механизмы подъема, транспортирующие груз идентичны, разница состоит лишь в том, что грузовой

канат механизма подъема находится под нагрузкой не все время  $T$ , как весь кран, а лишь относительную долю этого общего времени  $\Delta t_i$ , когда кран транспортирует груз.

Таким же образом можно рассчитать и вероятность разрыва каната вспомогательного подъема, для которого в формулу (2.39) подставляют уже иные параметры  $\Delta t_i$ ,  $K_k$ ,  $S_0$ ,  $m_R$  и  $\sigma_R$ .

По этой же формуле (2.39) рассчитывается и вероятность поломки редукторов, а также тормозов механизмов главного и вспомогательного подъемов. Учитывая аналогичность выкладок и вида формул, совпадающих по форме с (2.39), эти выкладки мы опускаем.

Поскольку работа главного и вспомогательного подъёмов независима, то в суммарной вероятности разрушения механизмов следует учитывать лишь максимальную из вычисленных вероятностей.

Вероятность усталостного разрушения пролётных балок крана можно оценить, приняв во внимание общее число циклов работы крана с эксплуатационным грузом главного подъема, приведенное в таблице 2.9. Так как общее число циклов работы крана значительно меньше  $10^5$  циклов, когда необходимо учитывать факторы, влияющие на выносливость металлоконструкции, то дальнейший расчёт по критерию усталостной прочности не выполняем, поскольку он автоматически обеспечивается.

Завершив анализ вероятностей отказов механического оборудования, перейдем к анализу вероятности отказа электрооборудования рассматриваемого крана 20/5 т для ОИАЭ.

Функциональную схему управления механизмом главного подъёма составим по принципиальной электрической схеме электрооборудования крана, которая представлена в его паспорте. Функциональные схемы управления механизмом главного и вспомогательного подъёма грузовой тележки идентичны.

Ошибку персонала, как единичное непреднамеренное неправильное воздействие на управляющие органы крана или единичный пропуск правильного

действия крановщика, из рассмотрения исключим, как имеющую существенно более низкую вероятность события. Кроме того, крановщик, в случае неадекватной подачи команды управления механизмом подъема груза, обязан немедленно нажать на кнопку «Аварийный стоп» и снять напряжение питания с крана. При аварийном обесточивании крана, все установленные на нем нормально закрытые тормоза затормаживают соответствующие механизмы чисто механически за счет действия пружин. В этом случае, удержание груза происходит краном только за счет работы тормозов механизмов подъема, которые для главного и вспомогательного подъемов, согласно требованиям [134] продублированы.

То есть при всех видах отказов электрооборудования груз будет удерживаться только тормозами, поэтому влияние отказов электрооборудования на вероятность падения груза однозначно определяется вероятностью отказов тормозов механизмов подъема и управления ими.

Из функциональной схемы управления механизмом главного подъёма (Рисунок 2.6) [92], следует, что каждый из 2-х тормозов механизма главного подъема 20т может быть открыт (что является необходимым условием падения груза) только при включении одновременно двух контакторов – контактора 1KM1 и одного из контакторов 2KM3, 2KM4.

Отключение контактора 1KM1 приводит к закрытию всех тормозов одновременно, а контакторы 2KM3, 2KM4 управляют каждый своим тормозом. То есть для открытия каждого из тормозов должны сработать одновременно оба контактора. Причем управление каждым из контакторов осуществляется по нескольким каналам управления, что позволяет не учитывать их влияние на общую вероятность отказа контакторов.

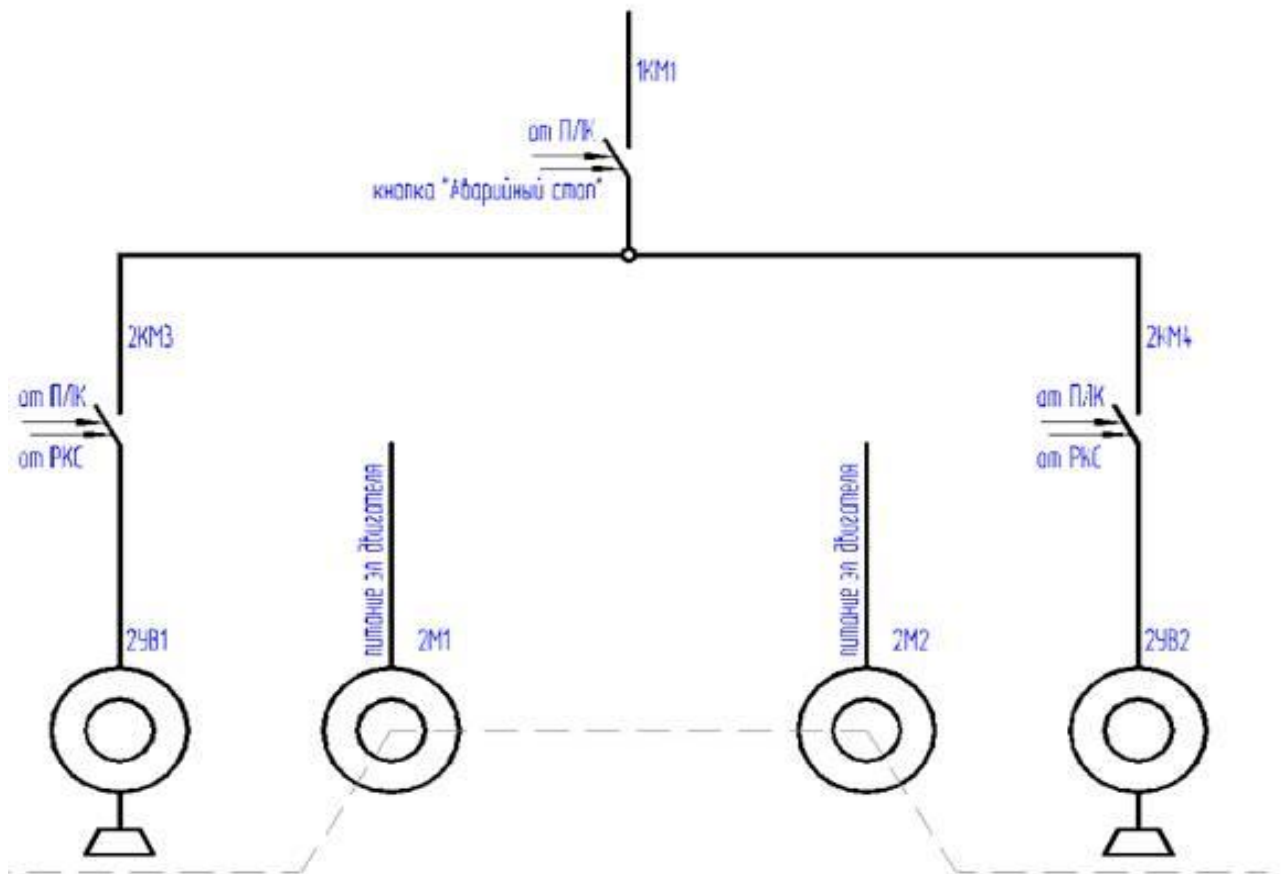


Рисунок 2.6 – Функциональная схема управления механизмом главного подъёма мостового крана 20/5

Таким образом, вероятность отказа управления тормозом может быть оценена как вероятность одновременного отказа двух контакторов.

Поскольку вероятность отказа каждого из тормозов на порядок ниже заданного в техническом задании предельного значения вероятности  $1 \times 10^{-7}$ , то суммарная вероятность отказа тормозов как главного, так и вспомогательного подъемов также будет обеспечена, что соответствует «отличному» состоянию системы, согласно определению таблицы 2.3.

## **2.6 Обоснование надежности после ремонта, реконструкции или модернизации грузоподъемных кранов, эксплуатирующихся на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ)**

Как ранее нами было отмечено в работах [92, 93], для грузоподъемных кранов ОИАЭ, пунктом в) приложения 1 [134] включено и требование о «...наличии показателей надежности кранов и их основных элементов (в том числе назначенного срока службы, ресурса до первого капитального ремонта), а также критериев отказов и предельного состояния...».

Хотя приведенное требование, в первую очередь, относится к вновь проектируемым грузоподъемным кранам ОИАЭ, нередко аналогичная необходимость возникает в оценке показателей надежности конструкторских решений, примененных при ремонте, реконструкции или модернизации указанных кранов.

Обычно в таких случаях используют лишь качественные оценки, как например, «усиление металлоконструкции приведет к ее более надежной работе», или «модернизированная схема механизма подъема крана позволит снизить динамические нагрузки на его металлоконструкцию». Однако, насколько примененные в этих случаях технические решения повлияют на количественные показатели надежности в целом (отсутствие того, что вероятность падения транспортируемого груза, крана или частей крана не превысит  $1,0 \times 10^{-7}$  1/год), подобные «выводы» ответа не дают, а значит и ответ на вопрос о целесообразности их применения для наиболее ответственных грузоподъемных кранов остается открытым.

В общем случае для оценки влияния возможных усиления металлоконструкции крана, примененных при его ремонте, реконструкции или модернизации, можно воспользоваться теми же зависимостями, которые были приведены в 2.5 данной работы (формулы (2.34) – (2.36)).

Для большей определенности, допустим, что металлоконструкция крана, как

и в рассмотренном примере в 2.5, изготовлена из стали 09Г2С с теми же механическими характеристиками.

Из всех возможных видов отказов рассматриваемого крана выбираем лишь те, которые принципиально могут привести к падению крана, частей крана или груза. Это изложено в статье с участием автора [92].

Начнем с анализа вероятности разрушения отремонтированных пролетных балок крана при сейсмическом воздействии. Под разрушением пролётных балок будем понимать потерю несущей способности в результате перехода верхнего или нижнего пояса отремонтированной балки в пластическое состояние по всей ширине, при этом запас несущей способности за счёт упругого состояния стенок балки в расчёт не принимаем.

Вероятность разрушения отремонтированных поясов балок рассчитываемого крана для каждого его режима нагружения работы определяем численным интегрированием по формуле (2.36), однако численные значения параметров  $K$  и  $\sigma_0$ , входящие в эту формулу, будут другими. Их следует принять по результатам прочностного и сейсмического расчетов отремонтированной (усиленной) металлоконструкции.

Если ремонт (усиление) выполнен верно [86] и результаты прочностного и сейсмического расчетов по методу конечных элементов (МКЭ) покажут уровень эквивалентных напряжений ниже того уровня, который ранее был получен для поясов исходной металлоконструкции, продолжать расчет по зависимости (2.36) не имеет смысла, ибо вероятность отказа будет не выше той, которая приведена в расчете надежности исходного, не подвергшегося ремонту крана.

Однако, в ряде случаев, ремонт (усиление) одного из мест металлоконструкции, приводит к перераспределению напряжений по другим элементам. В этих случаях, в качестве расчетных, следует использовать напряжения наиболее «слабого» элемента металлоконструкции. В качестве примера такого перераспределения напряжений, можно привести результаты расчета усиленной главной балки одного из однобалочных мостовых кранов ОИАЭ, показанного на

рисунке 2.7 [96].

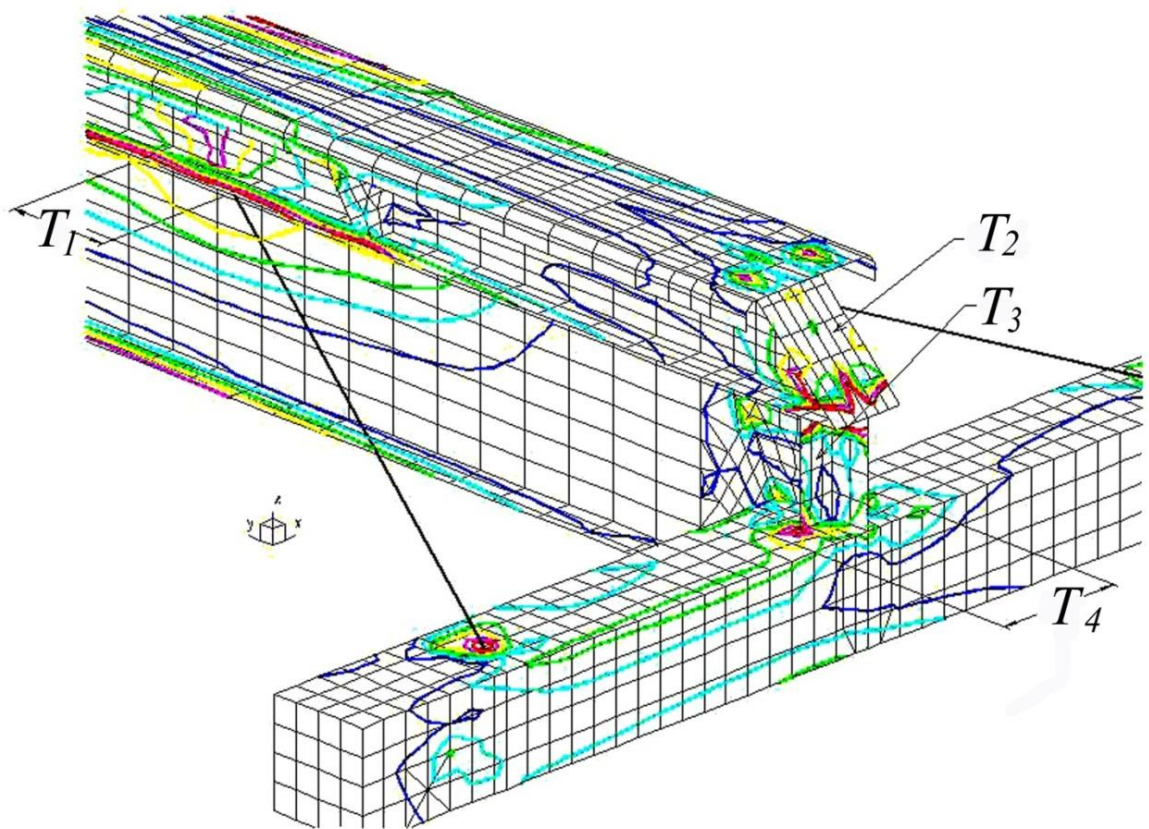


Рисунок 2.7 – Фрагмент картины распределения напряжений в усиленной металлоконструкции однобалочного опорного крана

Максимальные значения расчетных напряжений при МРЗ (до усиления крана) оказались выше 329 МПа и были отмечены в следующих элементах его металлоконструкции:

- в основании Т - образного усиления пролетной балки в месте сочленения раскосов с пролетной балкой;
- в кромке Т - образного усиления пролетной балки в месте ее опирания на концевую балку;
- в верхнем поясе концевой балки в месте опирания на нее пролетной балки.

Первая зона повышенного напряжения имеет ограниченные размеры и введение местного усиления в виде накладки размером 100x100 мм, толщиной 10 мм, позволило распределить локальное перенапряжение и скорректировать его до

расчетного сопротивления  $m_R = 309 \text{ МПа}$ . На рисунке 2.7 напряженное состояние этой зоны после выполнения усиления обозначено  $T_1$ .

Вторая зона повышенного напряжения, а это практически вся кромка изменения сечения, потребовала конструктивного усиления с использованием накладки толщиной 10 мм и шириной 120 мм, что позволило распределить локальное перенапряжение с уменьшением его максимального значения, даже ниже скорректированного расчетного сопротивления  $m_R = 309 \text{ МПа}$ . На рисунке 2.7 напряженное состояние этой зоны после усиления обозначено  $T_2$ .

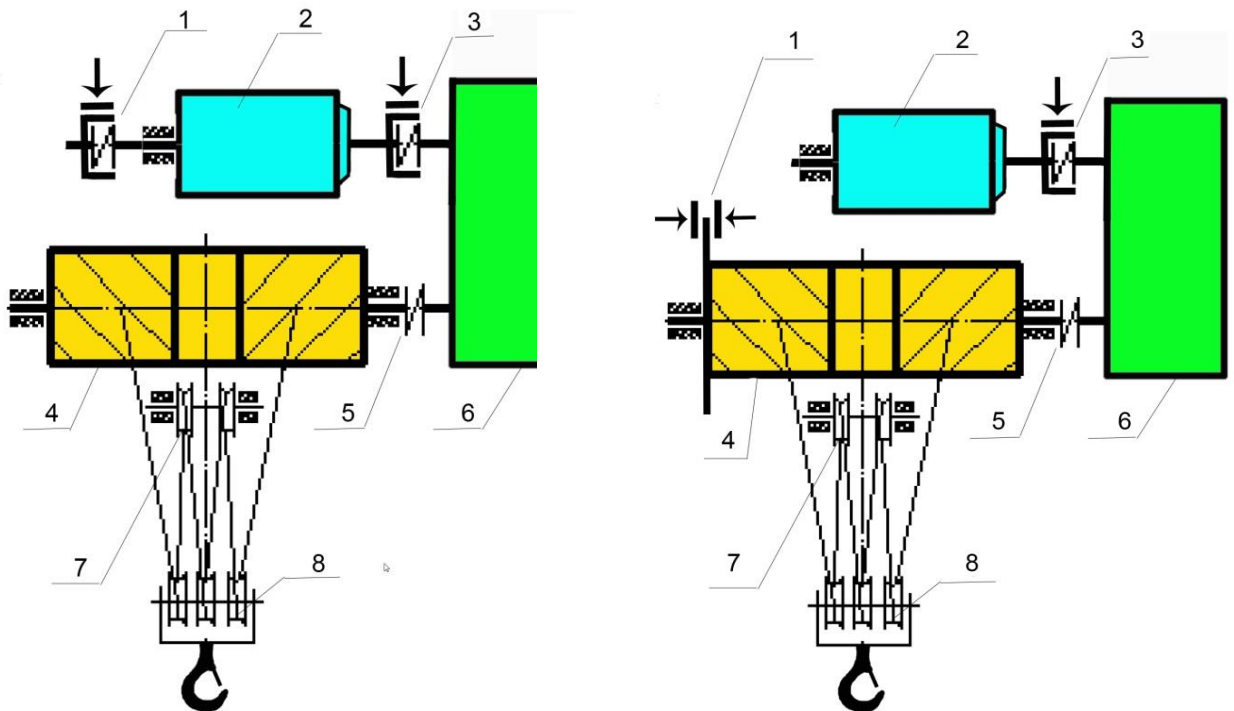
Третья зона повышенного напряжения также имела ограниченные размеры, что позволило использовать местное усиление этой зоны пластиной толщиной 16 мм и шириной 90 мм, которая на рисунке 2.7 обозначена  $T_3$ . Эту усиливающую пластину пришлось закрепить сварным швом на подкладке увеличенного размера -  $T_4$ , что позволило распределить локальное перенапряжение в элементе металлоконструкции со снижением максимального значения напряжения ниже скорректированного расчетного сопротивления  $m_R = 309 \text{ МПа}$ .

Используя данный пример расчета усиления балки, мы умышленно не приводим дополнительных результатов, поскольку в таких случаях важно лишь определить места с наибольшими напряжениями, а затем, если они превосходят скорректированное расчетное сопротивление, добиться путем подбора размеров и толщин усиливающих пластин отсутствия дополнительного пересчета металлоконструкции по зависимости (2.36), если полученные напряжения не будут превосходить первоначальных. В этом случае расчетная надежность системы (крана) будет не ниже первоначальной.

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 пары основного и дополнительного тормозов. На рисунке 2.8 а) приведена традиционная схема механизма подъема, использующая установку дополнительного тормоза - 1 на валу электродвигателя, а на рисунке 2.8 б) – схема механизма подъема с дополнительным тормозом - 1, установленным на ребре канатного барабана.

Каждую из приведенных схем механизмов подъема, с точки зрения теории надежности, можно представить в виде последовательно и параллельно соединенных элементов, что позволяет применить к ним традиционные зависимости расчета вероятности отказа (или противоположной ей – надежности безотказной работы) по показателям отказов (надежности) отдельных элементов [15].



а) дополнительный тормоз установлен на валу электродвигателя

б) дополнительный тормоз установлен 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 2.8 – Кинематические схемы механизмов подъема с использованием дополнительного тормоза

Как известно, самым простым случаем (в расчетном смысле) является последовательное соединение  $n$  - элементов механизма. В таком механизме отказ любого элемента равносител отказу механизма в целом. Следует пояснить, что «последовательным» такое соединение элементов является только в смысле надежности, физически они могут быть соединены как угодно.

Для механизма, состоящего из  $n$  - параллельно соединенных элементов, он перейдет в состояние «полного» отказа только после отказа всех элементов и при условии, что все элементы устройства не только находятся под нагрузкой, но отказы этих элементов статистически независимы.

Учитывая сказанное, выразим вероятности отказа кинематических цепей тормозов механизмов подъема, схемы которых приведены на рисунке 2.8. В схеме механизма подъема, представленной на рисунке 2.8 а), имеем две «параллельных» кинематических цепи (поскольку отказ одного из тормозов не приведет к отказу торможения механизма подъема в целом):

- а) тормоз и электродвигатель;
- б) тормоз.

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:

$$P = p_1 \times p_2 \times p_3 \times \dots \times p_n, \text{ или } P = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (2.40)$$

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

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^n p_i. \quad (2.41)$$

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:

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

или  $P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) = 1 - \prod_{i=1}^n q_i,$  (2.42)

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:

$$Q = \prod_{i=1}^n q_i. \quad (2.43)$$

Тогда, вероятность отказа такой кинематической цепи предлагаем рассчитать следующим образом [92]:

$$Q = 1 - [1 - (1 - p_{\text{торм}} \times p_{\text{эл двиг}}) \times q_{\text{торм}}] \times p_{\text{ред}} \times p_{\text{зуб муф}} \times p_{\text{кан бар}}, \quad (2.44)$$

где  $p_{\text{торм}}$ ,  $p_{\text{эл двиг}}$ ,  $p_{\text{ред}}$ ,  $p_{\text{зуб муф}}$  и  $p_{\text{кан бар}}$ , соответственно, коэффициенты надежности тормоза, электродвигателя, редуктора, зубчатой муфты и канатного барабана, а  $q_{\text{торм}}$  – вероятность отказа тормоза.

Кинематическую цепь тормозов механизма подъема, представленного на рис.2.8 б), также можно представить в виде двух «параллельных» ветвей:

- а) тормоз, редуктор, зубчатая муфта, канатный барабан;
- б) тормоз на реборде канатного барабана.

Вероятность отказа такой кинематической цепи будет определяться несколько иначе [92]:

$$Q = (1 - p_{\text{торм}} \times p_{\text{ред}} \times p_{\text{зуб муфта}} \times p_{\text{кан бар}}) \times q_{\text{торм бар}}, \quad (2.45)$$

где  $q_{\text{торм бар}}$  – вероятность отказа тормоза, установленного на барабане.

Можно заметить, что выражения (2.44) и (2.45), существенно отличаются друг от друга, при этом, нетрудно убедиться, что вероятность отказа для схемы механизма, представленного на рисунке 2.8 а) будет существенно выше вероятности отказа для схемы на рисунке 2.8 б), поскольку надежность тормоза на реборде канатного барабана, установленного в самом конце кинематической

цепи механизма, не зависит от надежности элементов механизма, установленных до него.

Для получения количественного сравнения, примем допущение, что все  $p_i = 0,99$ , а  $q_i = 0,01$ , тогда результатом расчета вероятности отказа тормозов по формуле (2.44) будет  $Q = 0,02989$ , а по формуле (2.45) –  $Q = 0,000394$ . Аналогичный по смыслу результат, что схема механизма подъема на рисунке 2.8 б) надежнее схемы, представленной на рисунке 2.8 а), мог бы быть получен в случае, когда нам заданы конкретные величины  $p_i$  и  $q_i$ , если только элементы механизмов, сравниваемых между собой, однотипны.

В заключение следует отметить, что подходы к оценке надежности технических решений ремонта, реконструкций или модернизаций металлоконструкций и механизмов грузоподъемных кранов ОИАЭ, приведенные в данном разделе, позволяют расширить область применения методического подхода оценки надежности, изложенного в предыдущем разделе данной работы и позволяют применить их при оценке инженерных решений компоновки механизма подъема крана до выполнения в металле.

## 2.7 Выводы по разделу 2

2.7.1. Установлены основные предпосылки, которые необходимо учитывать при оценке надежности и риска грузоподъемных кранов.

2.7.2. Обоснован подход к назначению контрольных цифр по надежности грузоподъемных кранов различных групп классификации, которые можно использовать при оценке требуемого риска грузоподъемных кранов.

2.7.3. Разработана и предложена итоговая таблица максимально допустимых значений вероятностей аварий металлоконструкций грузоподъемных кранов общего назначения, результаты которой 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 [177].

2.7.4. Разработаны математические модели для оценки показателей надежности и риска металлоконструкций и механизмов мостовых кранов для объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

2.7.5. Приведен алгоритм математического моделирования, а также примеры практических расчетов вероятностей аварий, которые можно использовать для определения допустимых значений вероятностей возникновения аварий различных грузоподъемных кранов.

### 3 ОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Как было показано на примере оценки надежности мостового крана для ОИАЭ, рассмотренном в 2.4 – 2.5 данной работы, составной частью приведенных расчетов являются показатели сейсмостойкости его конструкции. Следует отметить, что обеспечение сейсмостойкости грузоподъемного крана для ОИАЭ может быть распространено и на другие случаи обеспечения сейсмостойкости крана (например, если серийный грузоподъемный кран поставляется для последующей эксплуатации в сейсмоактивные районы).

В сейсмологии принято использовать эмпирические зависимости, связывающие число  $N_3$  землетрясений класса  $K_3$ , отнесенных к одному году и площади 10000 км<sup>2</sup> или площади некоторого района

$$\lg N_3 = a_2 K_3 + b_2 \quad (3.1)$$

где  $K_3 = \lg W$  – энергетический класс землетрясения,  $W$  – энергия, излучаемая в очаге землетрясения, Дж, а  $a_2$  и  $b_2$  – региональные константы. Например, для территории Кавказа  $a_2 = 0,56$   $b_2 = 5,7$  [108].

Поскольку до сегодняшнего дня методики, которые носили бы обязательный статус нормативного документа, в Российской Федерации отсутствуют, нами приведены подходы и обоснования, которые могут быть использованы для соответствующих расчетов в подобных случаях.

Сейсмический риск оценивается с учетом сотрясений расчетной интенсивности распространяющихся от всех возможных очагов землетрясений, расположенных вблизи строительной площадки.

Для перехода от сейсмических ускорений грунта  $a_m$  к расчетным сейсмическим нагрузкам, приложенным к массам сооружения, в нормативных документах служит система коэффициентов, позволяющих в какой-то мере учитывать степень ответственности сооружения, распределение его масс и

жесткостей, местные грунтовые условия, а также динамический эффект воздействия, связанный со спектром колебаний грунта. Такой подход широко распространен при расчете традиционных сооружений, для которых накоплен достаточный опыт проектирования и эксплуатации, позволяющий привязаться к принятой в нормах системе коэффициентов, однако, основным средством для предварительных и поверочных расчетов остаются упрощенные методы, рекомендуемые нормативными документами.

Учитывая значительный разброс оценок максимумов сейсмических ускорений грунта и недостаточность единственного параметра для описания уровня воздействия, в качестве альтернативной его меры возможно принятие модифицированной интенсивности Ариаса (кумулятивного квадрата ускорений) [140].

$$I_A = \int_0^t a^2(t) dt \quad (3.2)$$

где  $a(t)$  – зависимость ускорений грунта от времени (акселерограмма). Стандарт  $\sigma$  ускорения связан с  $I_A$  зависимостью

$$\sigma^2 = \frac{I_A}{\bar{t}}; \quad (3.3)$$

где  $\bar{t}$  – продолжительность эффективной фазы землетрясения, с

По статистической обработке данных Лаи (1982) в диапазоне  $15 < R < 100$  км и  $5,6 < M < 7,2$  получено, что среднее значение продолжительности интенсивной фазы землетрясения составляет около 9 с, а его стандарт  $\sigma_t$  – более 6с. Тогда

$$\bar{t} + \sigma(t) \approx 15 \text{ с}; \quad (3.4)$$

При таком подходе сейсмическое воздействие характеризуется не случайным максимумом ускорения грунта при землетрясении, а более устойчивой характеристикой, связанной с энергетическим спектром и выраженной непосредственно через магнитуду землетрясения, расстоянием до очага и продолжительностью воздействия. Эта информация может быть непосредственно использована для прогнозирования вероятного уровня сейсмической реакции

сооружения на основе статистической концепции.

### 3.1 Анализ свободных и вынужденных колебаний металлоконструкций мостового крана, как дискретной системы с разным количеством степеней свободы

Поскольку металлоконструкцию мостового крана с грузом можно представить в виде системы с  $n$  степенями свободы, рассмотрим в качестве примера оценку его свободных и вынужденных колебаний как подобной системы. Согласно работы [11] свободные колебания линейной системы с  $n$  степенями свободы без рассеяния энергии, а также континуальных или комбинированных систем после применения к ним той или иной процедуры дискретизации описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{0\}, \quad (3.5)$$

где  $\{\mathbf{u}\}$  – вектор - столбец перемещений (размерность  $n \times 1$ ),

$[\mathbf{M}]$  и  $[\mathbf{K}]$  – соответственно, матрицы масс и жесткостей ( $n \times n$ ).

Динамическими характеристиками таких систем являются собственные частоты и собственные формы, смысл которых можно объяснить следующим образом. При произвольных начальных условиях

$$\{\mathbf{u}(0)\} = \{\mathbf{u}_0\}, \quad \{\dot{\mathbf{u}}(0)\} = \{\dot{\mathbf{u}}_0\}, \quad (3.6)$$

т.е. если система выведена из положения равновесия произвольным образом, то она будет совершать свободные колебания, в процессе которых каждая из степеней свободы движется по закону отличному от синусоидального. Но существуют такие начальные условия, при которых колебания по всем степеням свободы будут гармоническими, причем с одной и той же частотой. Очевидно, что при этом в любой момент времени между координатами системы сохраняются одни и те же соотношения (говорят, что «не изменяется конфигурация системы»). Число таких конфигураций и соответствующих им частот равно порядку системы, т.е. вектора перемещений  $\{\mathbf{u}(0)\}$ . Для  $j$ -ой конфигурации этот вектор имеет вид:

$$\{\mathbf{u}_j\} = \{\phi_j\} \sin \omega_j t \quad (3.7)$$

где  $\{\phi_j\}$  – вектор амплитуд, который называется  $j$ -ой собственной формой, соответствующая частота  $\omega_j$  – собственной частотой.

Отметим, что при колебаниях системы по  $j$ -ой форме для определения ее положения в пространстве достаточно задать только какую-нибудь одну координату, а остальные могут быть найдены через соотношения между координатами. Это означает, что в процессе таких колебаний система имеет лишь одну степень свободы.

Подставим (3.7) в (3.5) и, поскольку  $\sin \omega_j t$  не равен тождественно нулю, вектор  $\{\phi_j\}$  является решением однородной системы алгебраических уравнений:

$$([\mathbf{K}] - \omega_j^2 [\mathbf{M}])\{\phi_j\} = \{0\}, \quad (3.8)$$

Как известно, это решение не равно тождественно нулю (что означало бы отсутствие перемещений) только при условии равенства нулю детерминанта системы, т.е.

$$\det([\mathbf{K}] - \omega_j^2 [\mathbf{M}]) = 0, \quad (3.9)$$

(здесь  $\det$  обозначает детерминант матрицы в круглых скобках). Из этого равенства находят собственные частоты  $\omega_j$ .

Собственные частоты и собственные формы системы зависят только от распределения ее масс и жесткостей, то есть матриц  $[\mathbf{K}]$  и  $[\mathbf{M}]$ , но не от начальных условий. Поэтому они называются характеристиками самой системы.

Перейдем теперь к рассмотрению вынужденных колебаний линейной дискретной системы металлоконструкции мостового крана. При использовании затухания по гипотезе Фойгта – Кельвина колебания такой системы описываются системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{F(t)\}, \quad (3.10)$$

где  $[\mathbf{C}]$  – матрица диссипации энергии [172], а  $\{F(t)\}$  – вектор нагрузки.

В случае кинематического (сейсмического) возмущения в качестве нагрузки

выступают переносные силы инерции и полученное выражение преобразуется к виду:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = -[\mathbf{M}]\{\mathbf{J}_x\}\ddot{X}(t), \quad (3.11)$$

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 (3.11) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} [\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \\ = -[\mathbf{M}](\{\mathbf{J}_x\}\ddot{X}_0(t) + \{\mathbf{J}_y\}\ddot{Y}_0(t) + \{\mathbf{J}_z\}\ddot{Z}_0(t)). \end{aligned} \quad (3.12)$$

Поскольку система уравнений линейна, ее решение является суммой решений систем, соответствующих независимому возмущению по каждой из компонент.

Приведенный подход достаточно редко сегодня используется на практике, поскольку современные вычислительные пакеты имеют стандартные программы для вычисления собственных частот и форм колебаний реально рассчитываемых конструкций.

### **3.2 Методика расчета металлоконструкций мостовых кранов на сейсмостойкость**

В части расчета сейсмостойкости металлоконструкций грузоподъемных кранов известны работы проф., д.т.н. Н.Н. Панасенко, к.т.н. И.И. Абрамовича,

к.т.н. Н.М. Дементьевой и др. ученых [137, 138]. Проблема обеспечения сейсмостойкости подъемных сооружений является одной из актуальных проблем современного машиностроения. Действительно, эксплуатация действующих АЭС, а также иных объектов повышенной опасности, диктует необходимость совершенствования конструкций грузоподъемных кранов, которые были бы устойчивы к заданным сейсмическим воздействиям. Нормативными документами по безопасности, например, статьей 2.1.6. ранее действовавших Правил [150], предписывалось, что «...проектирование кранов, предназначенных для эксплуатации в сейсмических районах (более 6 баллов согласно [163]), должно осуществляться в сейсмостойком исполнении». Однако, четкие указания о том, как в этом случае считать и проектировать грузоподъемный кран для подобных условий эксплуатации, в настоящее время отсутствуют.

Действующий стандарт [35] носит достаточно общий характер и устанавливает требования одновременно для целого ряда изделий машиностроения. В разделе 1 [35], сказано, что «...настоящий стандарт распространяется также... на подъемные краны и оборудование для них», однако конкретных требований, позволяющих использовать данный стандарт в практических расчетах, не так много.

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.) металлоконструкции грузоподъемного крана в целом.

Воспользоваться рекомендациями [35], к сожалению, можно лишь на первом этапе исследования. Например, исходя из заданной сейсмичности зоны установки крана, по рисунку 1 [35], можно определить расчетное ускорение для грузоподъемного крана, установленного на различных отметках внутри здания.

Далее, можно воспользоваться еще двумя рекомендациями, изложенными в п.4.1 и п.4.2 [35]. Для этого, приведем содержание указанных пунктов стандарта [35] целиком.

«4.1. При предъявлении к изделиям требований по стойкости к воздействию землетрясений (сейсмостойкости) исходят из интенсивности землетрясения и уровня установки изделий на нулевой отметке (далее - уровень установки). Эти требования соответствуют требованиям по стойкости... к синусоидальной вибрации в течение 1 минуты. В качестве нормированных воздействий землетрясений принимают требование 4.2.

Сейсмические воздействия считают приложенными к изделию в местах его крепления, если в пунктах настоящего стандарта нет иных требований.

4.2. Для изделий, устанавливаемых непосредственно на строительных конструкциях (например, стенах, потолках, фундаментах, перекрытиях, колоннах, фермах), требования по максимальным амплитудам ускорений в горизонтальных направлениях и соответствующие частоты (спектр) синусоидальной вибрации определяют по рисунку 1 [35], полученному на основе обобщенного спектра ответа (рисунок 2). Значения максимальных амплитуд ускорений в вертикальном направлении устанавливают равными 0,7, значений для горизонтальных направлений.

Для изделий, устанавливаемых на уровнях установки, промежуточных между указанными на рисунке 1 [35], значения максимальных амплитуд ускорения допускается определять методом линейной интерполяции».

Цитируемый нормативный документ дает основание не только назначать расчетные сейсмические ускорения для различных районов установки грузоподъемных кранов, но и снижать амплитуды расчетных вертикальных ускорений для кранов, устанавливаемых над землей.

Рассмотрим практические аспекты применения данного подхода на примере сейсмического расчета мостового, однобалочного, опорного крана, грузоподъемностью 5 т, установленного внутри здания на высоте 12 м в сейсмически активном районе, характеризуемом уровнем возможного землетрясения, равного 8 баллам по шкале MSK-64 [163]. Такой простой грузоподъемный кран выбран в качестве примера неслучайно, поскольку для однобалочной конструкции можно заранее представить, например, формы колебаний на основных парциальных частотах, картины деформационного состояния под нагрузкой, и, в конечном счете, легко оценить адекватность результатов, получаемых при компьютерном моделировании [90].

Необходимые исходные данные о рассчитываемом грузоподъемном кране приведены в таблице 3.1.

Размеры расчетных сечений элементов металлоконструкции крана, а также расчетные величины моментов инерции, моментов сопротивления, характеристики приводов и т.п. приняты по рабочим чертежам крана и, для краткости изложения, мы их не приводим. В качестве материала, из которого изготовлены расчетные элементы металлической конструкции крана, принята сталь 09Г2С–12 по стандарту [33].

Таблица 3.1 – Основные характеристики мостового, однобалочного, опорного крана, рассматриваемого в качестве примера расчета на сейсмостойкость

|                                                                            |                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Грузоподъемность, т                                                        | 5                                                  |
| Группа классификации крана по ISO 4301/1                                   | A3                                                 |
| Группа классификации (режима) механизмов крана по стандарту ISO 4301/1     | M5 – механизм подъема,<br>M3 – остальные механизмы |
| Пролет крана, м                                                            | 11,0                                               |
| Высота подъема, м                                                          | 12,0                                               |
| База крана по концевой балке, м                                            | 2,0                                                |
| Скорости механизмов, м/с (м/мин):                                          |                                                    |
| подъема (электрической тали)                                               | 0,092 (5,5)                                        |
| передвижения электрической тали                                            | 0,333/1,000 (20/60)                                |
| передвижения крана                                                         | 0,833 (50)                                         |
| Масса:                                                                     |                                                    |
| крана, кг                                                                  | 2500                                               |
| пролетной балки, кг                                                        | 1500                                               |
| концевых балок, кг                                                         | 170х2                                              |
| электрической тали, кг                                                     | 660                                                |
| Характеристика грунта и фундамента, на котором установлено здание с краном | Грунт и фундамент средней прочности                |
| Исходное ускорение грунта, g                                               | 0,1                                                |
| Коэффициент трения при смещении заторможенного крана                       | 0,3                                                |

Целью приведенного ниже исследования является:

- 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.

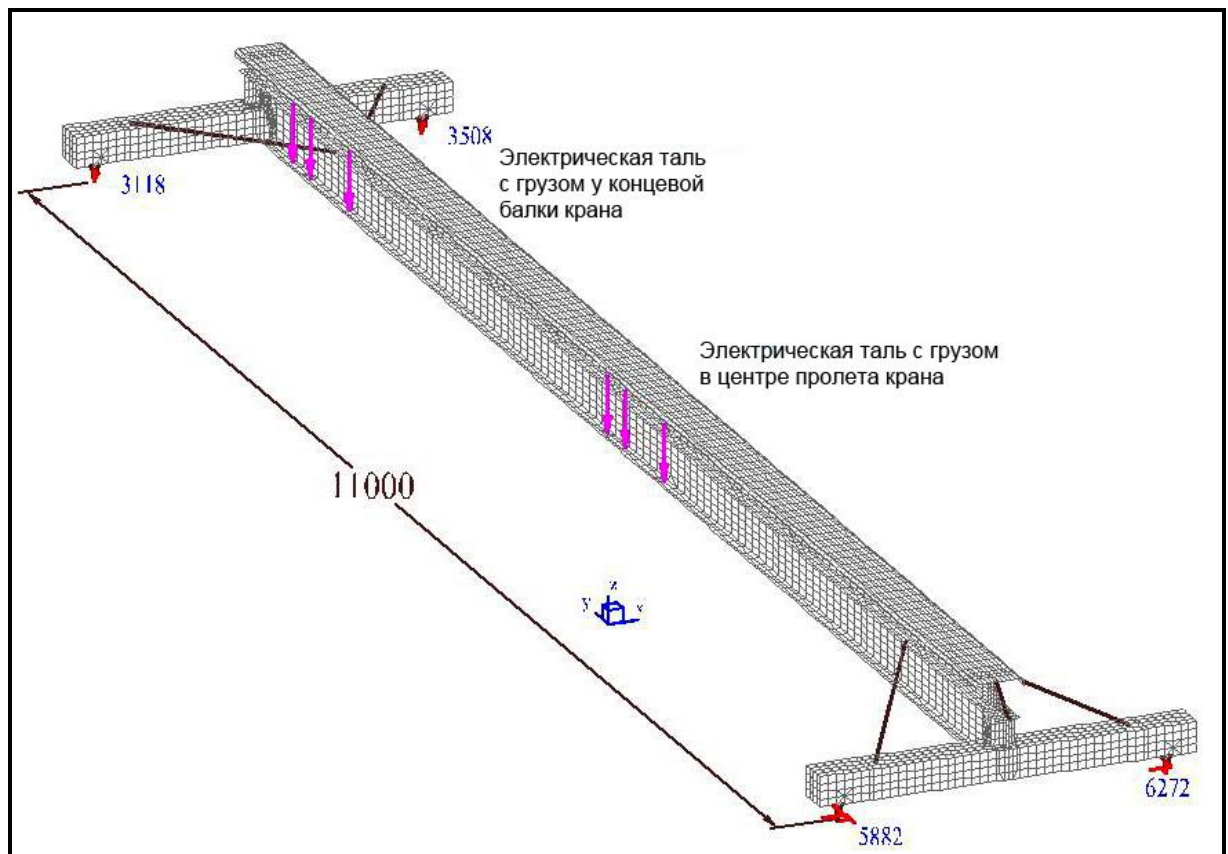
Расчетные характеристики материала, из которого изготовлена металлоконструкция крана, выбираем используя известные рекомендации нормативных документов по строительной механике. Согласно нормативу [164] часть II, глава 23, расчетные сопротивления проката по пределу текучести при растяжении, сжатии и изгибе определяем, как в главе 2 данной работы по формуле (2.25).

Особенности стальной конструкции исследуемого крана обычно учитывают коэффициентом условий работы  $\gamma_c$  [173], понижающим расчетное сопротивление  $R_y$ . Для данного крана, учитывая его неинтенсивную эксплуатацию (группа классификации крана всего лишь А3 по [106]) коэффициенты  $\gamma_c$  приняты равными 1,0 для всех расчетных сочетаний нагрузок. В этой связи, значение расчетного сопротивления  $R_y$  оставляем без корректировки, равным 309,5 МПа.

Исследуемая модель крана мостового, однобалочного, опорного, грузоподъемностью 5 т, представлена на рисунке 3.1. Расчет выполнен на персональном компьютере с использованием программы прочностного расчета методом конечных элементов (МКЭ) COSMOSWorks 2006 S.P.5.0, являющейся приложением системы пространственного моделирования SolidWorks 2006 S.P. 0.0.

Исследование металлоконструкции крана начинаем с определения парциальных частот свободных колебаний металлоконструкции в трех взаимных плоскостях, в предположении, что первые формы свободных колебаний подобны деформациям металлоконструкции под действием инерционных сил, приложенных вертикально или горизонтально. Расчетные частоты вертикальных и горизонтальных колебаний для данной конструкции получились следующие:

$$f_x = 2,2 \text{ Гц}; f_y = 8,0 \text{ Гц}; f_z = 7,6 \text{ Гц}.$$



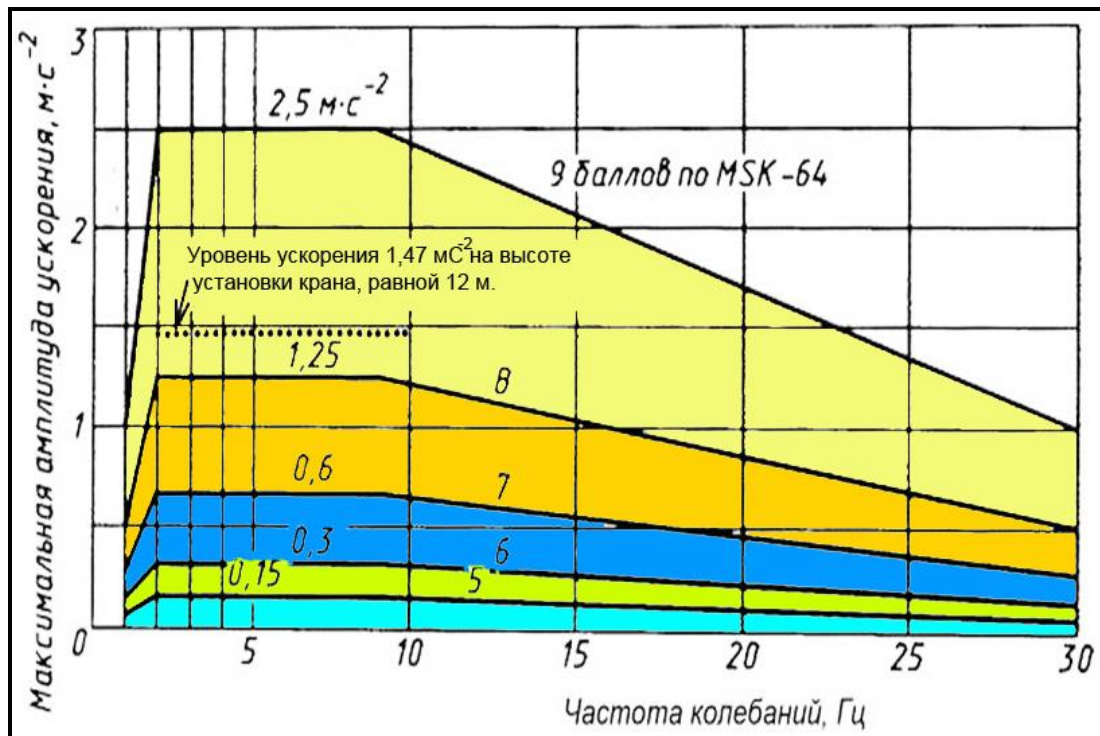
1 – электрическая таль с грузом расположена в центре пролета крана;

2 – электрическая таль с грузом расположена у концевой балки крана

Рисунок 3.1 – Расчетная модель крана для двух случаев различного расположения электрической тали в пролете крана

Используя полученные величины парциальных частот, обратимся к рисунку 3.2, который взят из [35].

Как видно из ломаных кривых спектров, представленных на рисунке 3.2, в частотном диапазоне от 2 до 9 Гц они имеют строго горизонтальные участки, т.е. характеризуются постоянными ускорениями.



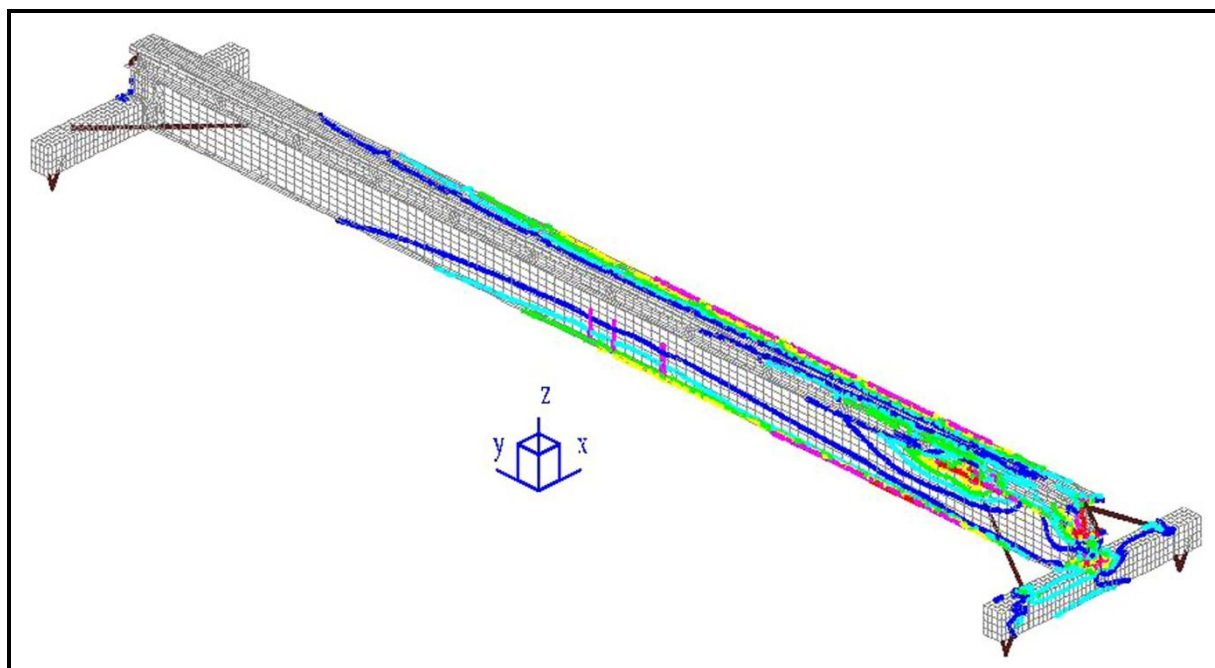
$1,25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  на отметке 10 м. Интерполируя указанное значение, согласно указаниям п.п.4.1 и 4.2. [35], получаем расчетные горизонтальные ускорения (по осям X и Y) для высотной отметки 12 м, равными  $1,47 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  и расчетное вертикальное ускорение (по оси Z), равное  $0,7 \times 1,47 = 1,0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  или  $0,1g$ .

Определив расчетные ускорения, перейдем к назначению расчетных нагрузок. Для этого используем рекомендации стандарта [32] и в дальнейшем учитываем следующие нагрузки:

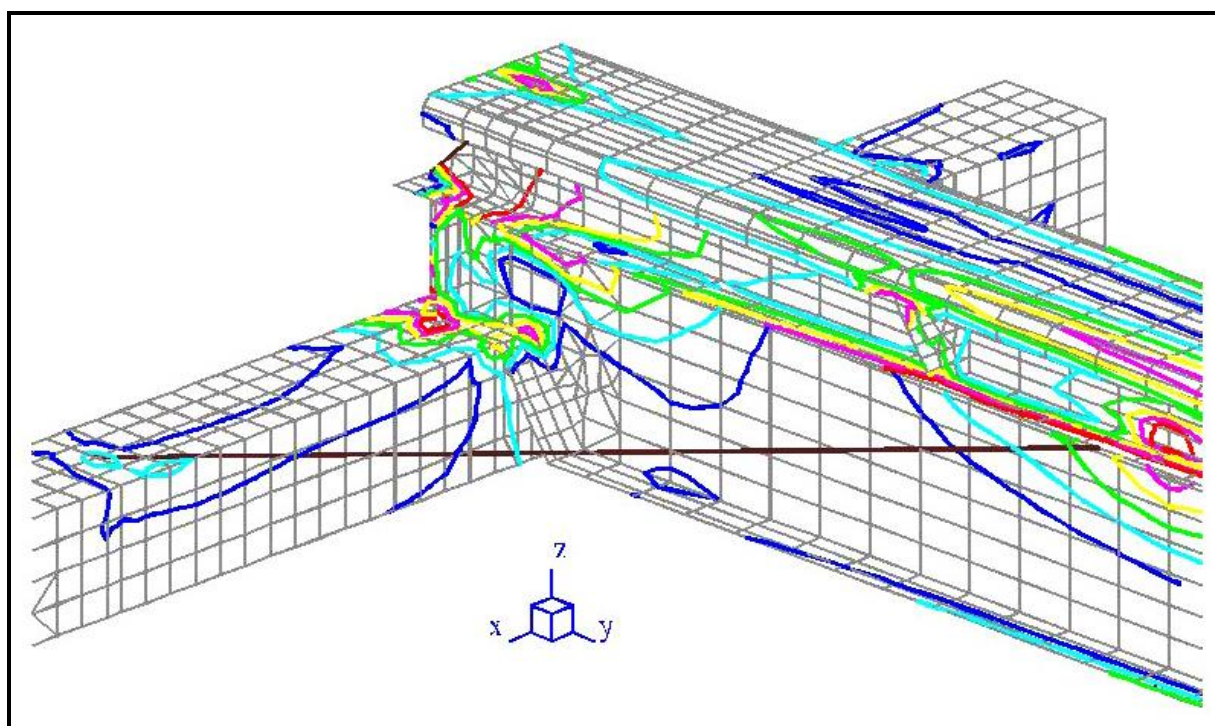
- от силы тяжести металлоконструкции и поднимаемого груза;
- от инерционных сил, действующих на металлоконструкцию крана при сейсмическом ускорении в горизонтальных направлениях;
- от инерционных сил, действующих на металлоконструкцию крана при сейсмическом ускорении в вертикальном направлении.

Все последующие сравнительные оценки выполнялись для двух расчетных сочетаний нагрузок [172, 173]: при положении электрической тали (с грузом и без груза) в середине пролета крана и в крайнем положении у концевой балки. Сила тяжести и равномерно распределенные сейсмические нагрузки, действующие на металлоконструкцию, были приложены во всех узлах расчетной модели.

Анализ результатов оценки напряженно-деформированного состояния крана, приведенного на рисунке 3.3, показал: максимальные значения эквивалентных напряжений в металлоконструкции крана с груженой электрической талью, расположенной в центре пролета, не превышают расчетного сопротивления  $R_y = 309,5 \text{ МПа}$  для стали 09Г2С. В середине пролета главной балки эквивалентные напряжения достигают 210 МПа, а в верхнем поясе средней части концевой балки 290 МПа. Максимальные значения эквивалентных напряжений в металлоконструкции крана с груженой электрической талью, расположенной у концевой балки, также не превышают расчетного сопротивления  $R_y = 309,5 \text{ МПа}$  для стали 09Г2С и достигают в середине пролета главной балки 140 МПа, а в верхнем поясе средней части концевой балки 250 МПа.



а)



б)

а) – общий вид, б) – фрагмент

Цвет изолиний напряжений, МПа: 1 — 70; 2 — 120; 3 — 170; 4 — 220; 5 — 270; 6 — 320

Рисунок 3.3 – Примеры картины напряженного состояния модели металлоконструкции крана при сейсмическом воздействии

Интересно проанализировать и опорные реакции, возникающие в контакте колес крана с рельсами при сейсмическом воздействии. Для случая, когда груженная электрическая таль расположена в центре пролета крана, значения опорных реакций приведены в таблице 3.2, а для электрической тали без груза – в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Значения опорных реакций при сейсмическом воздействии для расчетного случая с груженной электрической талью, расположенной в центре пролета крана

| № опорного узла, рис.3.1 | По оси X, кН | Превышение сил сейсмического воздействия по оси X, кН | По оси Z, кН | Превышение сил сейсмического воздействия по оси Z, кН |
|--------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|
| 3118                     | 9            | нет                                                   | 49           | нет                                                   |
| 3508                     | 0            | нет                                                   | 47           | нет                                                   |
| 5282                     | 13           | нет                                                   | 42           | нет                                                   |
| 6272                     | 0            | нет                                                   | 55           | нет                                                   |

Таблица 3.3 – Значения опорных реакций при сейсмическом воздействии для расчетного случая с ненагруженной электрической талью, расположенной в центре пролета крана

| № опорного узла, рис.3.1 | По оси X, кН | Превышение сил сейсмического воздействия по оси X, кН | По оси Z, кН | Превышение сил сейсмического воздействия по оси Z, кН |
|--------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|
| 3118                     | 9            | 3                                                     | 19           | нет                                                   |
| 3508                     | 0            | нет                                                   | 17           | нет                                                   |
| 5282                     | 13           | 11                                                    | 7            | нет                                                   |
| 6272                     | 0            | нет                                                   | 21           | нет                                                   |

Из данных, приведенных в таблицах 3.2 и 3.3, видно, что в узлах 3118 и 5882 есть превышение значений сил сейсмического воздействия, над силами трения. Это говорит о том, что срыв сцепления колес крана на рельсах возможен, что потребует установки специальных устройств удержания колес на рельсе, помимо существующих тормозов.

Может показаться любопытным, что расчетный срыв сцепления зафиксирован только на двух (опорные узлы 3118 и 5282, рисунок 3.1) из четырех колес крана. Это объясняется тем, что в узлах 3508 и 6272 наложены шарнирно-неподвижные связи, принятые в рассматриваемой расчетной модели крана и воспринимающие нагрузку. На самом деле, конечно, срыв сцепления будет наблюдаться у всех четырех крановых ходовых колес.

Теперь проанализируем результаты оценки сейсмического воздействия для положения электротали рядом с одной из концевых балок.

Расчетные нагрузки на опорные узлы электротали с грузом в крайнем положении у концевой балки приведены в таблице 3.4. Расположение осей X и Z расчетной модели аналогично, приведенным на рисунке 3.2. Действие сил поперек крановых путей – по оси Y, не учитывается, поскольку поперечное перемещение крана зафиксировано жесткими подкрановыми балками.

Таблица 3.4 – Значения опорных реакций при сейсмическом воздействии для расчетного случая с груженой электрической талью, расположенной в крайнем положении пролета у концевой балки крана

| № опорного узла, рис.3.1 | По оси X, кН | Превышение сил сейсмического воздействия по оси X, кН | По оси Z, кН | Превышение сил сейсмического воздействия по оси Z, кН |
|--------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|
| 3118                     | 0            | нет                                                   | 55           | нет                                                   |
| 3508                     | 0            | нет                                                   | 53           | нет                                                   |
| 5882                     | -17          | 16                                                    | 7            | нет                                                   |
| 6272                     | 0            | нет                                                   | 16           | нет                                                   |

Анализ данных таблицы 3.4 показывает, что отрыв колес от рельсовых крановых путей возможен и в этом случае с усилием по оси X, величина которого требует установки специальных устройств удержания колес на рельсе.

Расчетные нагрузки на опорные узлы электротали без груза в крайнем положении у концевой балки приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Значения опорных реакций при сейсмическом воздействии для расчетного случая с груженой электрической талью, расположенной в крайнем положении пролета у концевой балки крана

| № опорного узла | По оси X, кН | Превышение сил сейсмического воздействия по оси X, кН | По оси Z, кН | Превышение сил сейсмического воздействия по оси Z, кН |
|-----------------|--------------|-------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|
| 3118            | 0            | нет                                                   | 9            | нет                                                   |
| 3508            | 0            | нет                                                   | 7            | нет                                                   |
| 5882            | -17          | 16                                                    | 3            | нет                                                   |
| 6272            | 0            | нет                                                   | 12           | нет                                                   |

Действие сил поперек рельсовых крановых путей – по оси Y, также не учитывается, поскольку поперечное перемещение крана зафиксировано жесткими подкрановыми балками.

Анализ данных таблицы 3.5 показывает, что смещение колес (срыв сцепления) вдоль рельсовых крановых путей возможно, но оно не опасно, поскольку кран в этом случае лишь сдвинется на небольшое расстояние, поскольку его ходовые колеса заторможены.

Данное исследование показало, что для принятого уровня сейсмического воздействия, вертикального отрыва (по оси Z) колес анализируемого крана не происходит, хотя для многих опорных кранов опасен именно вертикальный подскок крана, как жесткого целого.

В этих случаях, на концевых балках крана должны устанавливаться

специальные устройства удержания крана от возможного подскока, пример конструкции которых приведен ранее на рисунке 1.3.

### **3.3 Сравнительный анализ результатов оценки сейсмической прочности металлоконструкций ранее изготовленных мостовых кранов**

Проблема обеспечения сейсмостойкости подъемных сооружений является одной из актуальных проблем современного машиностроения. Действительно, эксплуатация действующих АЭС, а также иных объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), выдвигает необходимость совершенствования конструкций грузоподъемных кранов, которые ранее были изготовлены без учета возможных сейсмических воздействий. Это было связано с тем, что при строительстве первых ОИАЭ на них поставлялись краны обычного общепромышленного применения.

В разделе 1 [35], сказано, что «...настоящий стандарт распространяется также... на подъемные краны и оборудование для них», однако конкретных требований, позволяющих использовать данный стандарт в практических расчетах, не так много (что будет показано ниже).

Данный раздел будет посвящен практическому применению оценки сейсмостойкости металлоконструкций мостовых кранов, эксплуатирующихся на одном из ОИАЭ и дает возможность проанализировать сравнительные результаты расчетов сейсмостойкости 16 мостовых кранов различной грузоподъемности и пролетов, выполненные за последние годы по договорам для Ангарского электролизно-химического комбината (АЭХК).

Как отмечено в 3.2 данной работы, в общем случае оценка сейсмического воздействия на грузоподъемный мостовой кран можно условно разделить на четыре этапа.

Выполняя сравнительный анализ различных исходных данных, которые использованы в исследовании, под положительными результатами «оценки «сейсмостойкости» здесь и далее будем понимать исключение падения крана и его частей, падения груза, а также исключение возникновения пластических

деформаций в несущих (расчетных) элементах металлоконструкции крана, которые могут привести ее в неработоспособное состояние.

Определив расчетные ускорения для заданного уровня сейсмического воздействия на площадке установки кранов, как это показано в 3.2 данной работы, перейдем к назначению расчетных нагрузок. Для этого вновь используем рекомендации стандарта [32] и в дальнейшем будем учитывать следующие нагрузки:

- от силы тяжести металлоконструкции и поднимаемого груза;
- от инерционных сил, действующих на металлоконструкцию крана при сейсмическом ускорении в горизонтальных направлениях;
- от инерционных сил, действующих на металлоконструкцию крана при сейсмическом ускорении в вертикальном направлении.

С учетом сказанного, все последующие оценки можно выполнить по одной расчетной схеме, общий вид которой представлен на рисунке 3.4, для двух расчетных сочетаний [172, 173]: при положении грузовой тележки (с грузом и без груза) в середине пролета крана.

Сила тяжести и равномерно распределенные сейсмические нагрузки, действующие на металлоконструкцию, при этом прикладываются во всех узлах расчетной модели.

Изложенный подход был применен, как было сказано выше, к расчету пяти двухбалочных мостовых кранов, характеристики которых приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Исходные данные мест установки мостовых кранов АЭХК и геометрические размеры их главных балок

| Наименование параметра                                              | Размер-ность | Кран 5т, пролет 16,5 м | Кран 10т, пролет 16,5 м | Кран 15т, пролет 16,5 м | Кран 16т, пролет 16,5 м | Кран 10т, пролет 32,0 м |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Завод-изготовитель и заводской номер крана                          |              | Новосибирск, №580      | Новосибирск, №1193      | Москва, №1705           | Узловая, №30938         | Ташкент, №49373         |
| Интенсивность землетрясения                                         | баллы        | 8                      | 8                       | 8                       | 8                       | 8                       |
| Коэффициент трения при смещении заторможенного крана                |              | 0.30                   | 0.30                    | 0.30                    | 0.30                    | 0.30                    |
| Расчетный груз                                                      | кг           | 5000                   | 10000                   | 15000                   | 8000                    | 10000                   |
| Масса крана                                                         | кг           | 11920                  | 12772                   | 23220                   | 17000                   | 22600                   |
| Материал несущих стальных конструкций                               |              | Сталь 09Г2С-12         | Сталь 09Г2С-12          | Ст3                     | Сталь 09Г2              | Ст3кп                   |
| Характеристики поперечного сечения главной балки в середине пролета |              |                        |                         |                         |                         |                         |
| Стенки:                                                             |              |                        |                         |                         |                         |                         |
| высота                                                              | мм           | 736                    | 688                     | 964                     | 957                     | 1418                    |
| толщина левой стенки                                                | мм           | 5.0                    | 5.0                     | 6.0                     | 5.0                     | 6.0                     |
| толщина правой стенки                                               | мм           | 5.0                    | 5.0                     | 6.0                     | 5.0                     | 6.0                     |
| Пояса:                                                              |              |                        |                         |                         |                         |                         |
| ширина                                                              | мм           | 400.0                  | 560.0                   | 450.0                   | 450.0                   | 560.0                   |
| толщина верхнего пояса                                              | мм           | 6.0                    | 6.0                     | 8.0                     | 7.0                     | 8.0                     |
| толщина нижнего пояса                                               | мм           | 6.0                    | 6.0                     | 8.0                     | 6.0                     | 8.0                     |
| Высота установки крана                                              | м            | 16.00                  | 8.08                    | 11.50                   | 8.00                    | 6.75                    |

## Продолжение таблицы 3.6

|                                             |                 |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Кратность полиспаста                        |                 | 2     | 3     | 3     | 3     | 3     |
| Число полиспастов                           |                 | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| Диаметр каната механизма подъема            | мм              | 12.00 | 14.00 | 19.50 | 17.50 | 14.00 |
| Площадь поперечного сечения проволок каната | см <sup>2</sup> | 0.54  | 0.74  | 1.36  | 1.37  | 0.74  |

На рисунке 3.4. показан один из типовых примеров расчетной модели, а на рисунке 3.5 – напряженно-деформированное состояние (НДС) металлоконструкции рассчитываемого мостового двухбалочного крана.

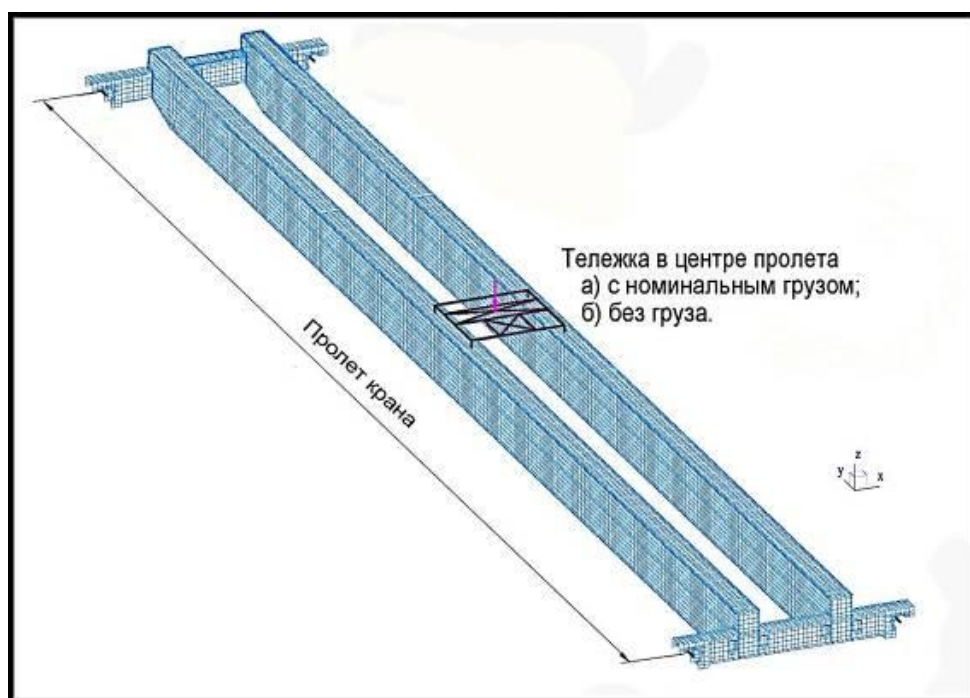


Рисунок 3.4 – Пример расчетной модели двухбалочного мостового крана на сейсмическую прочность. Общий вид

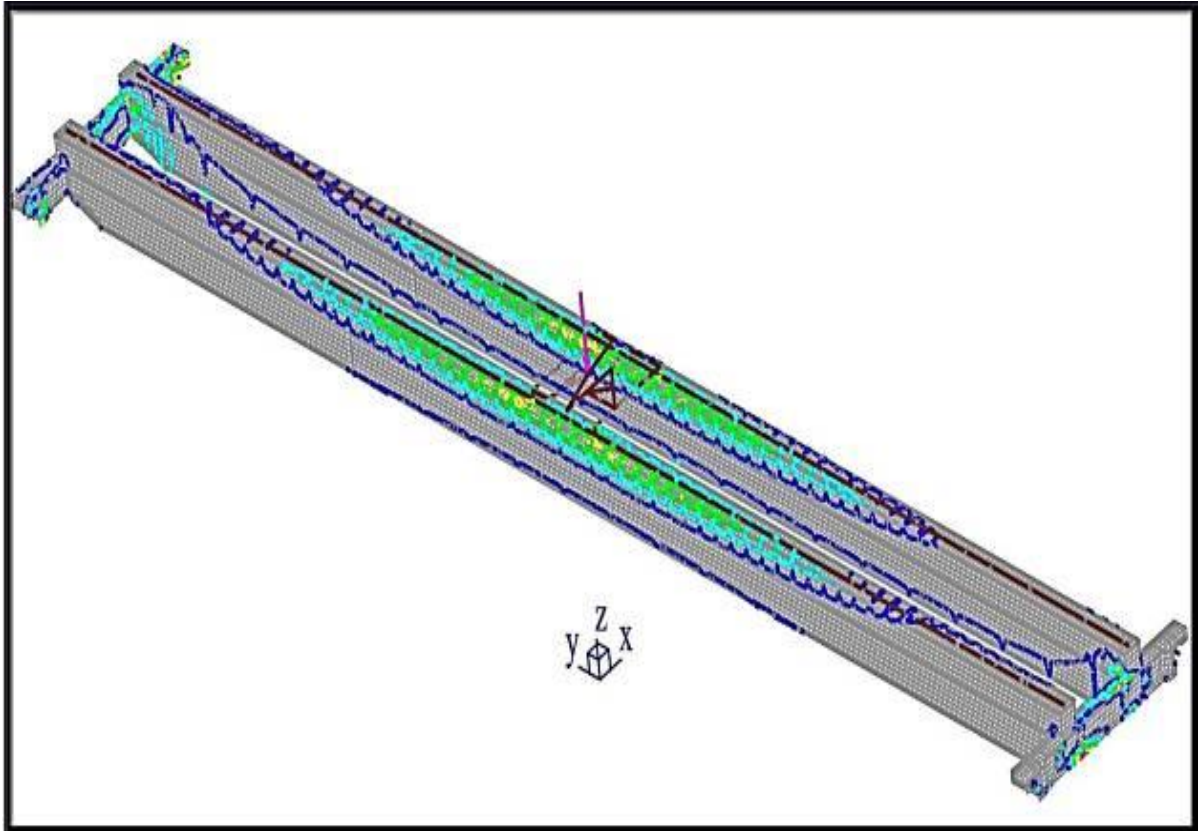


Рисунок 3.5 – Пример картины НДС металлоконструкции мостового двухбалочного крана при сейсмическом воздействии для положения тележки с грузом в центре пролета

Для мостовых двухбалочных кранов других грузоподъемностей и пролетов картины напряженно-деформированного состояния (НДС) в целом идентичны. Отличие лишь в амплитудах напряжений и деформаций.

Результаты оценок сейсмостойкости 16 мостовых двухбалочных кранов представлены в таблицах Б.1 – Б.3 Приложения Б. Для проведения дальнейшего анализа и установления закономерностей изменения параметров сейсмостойкости кранов, часть полученных оценок представлена в виде графиков на рисунках 3.6 – 3.10.

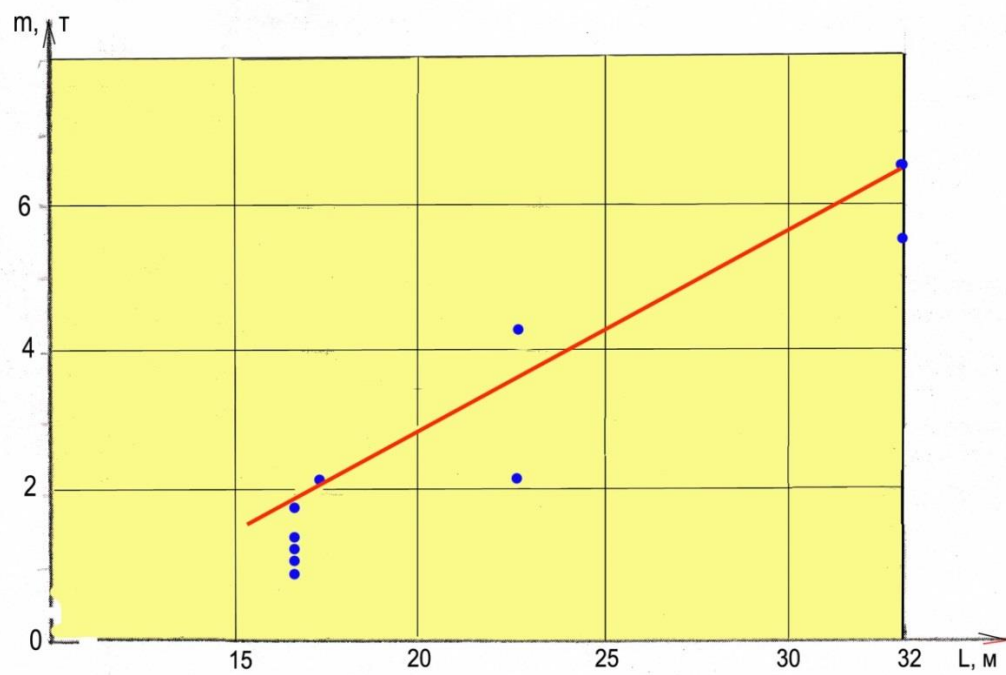


Рисунок 3.6. – Зависимость массы крана от пролета крана

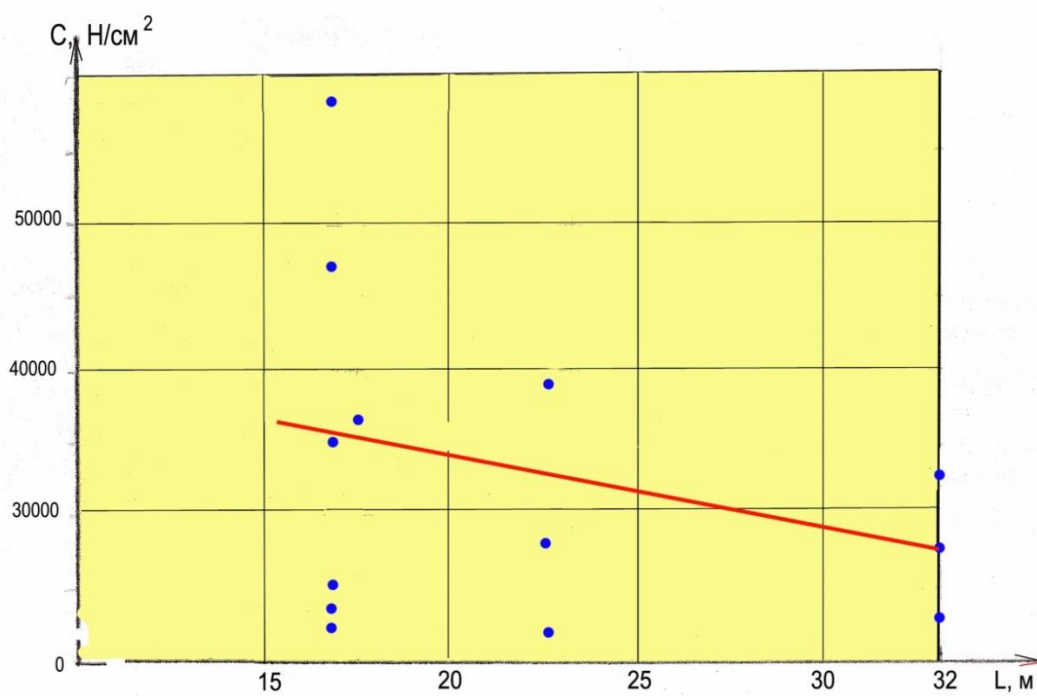


Рисунок 3.7. – Зависимость вертикальной жесткости главных балок от пролета крана

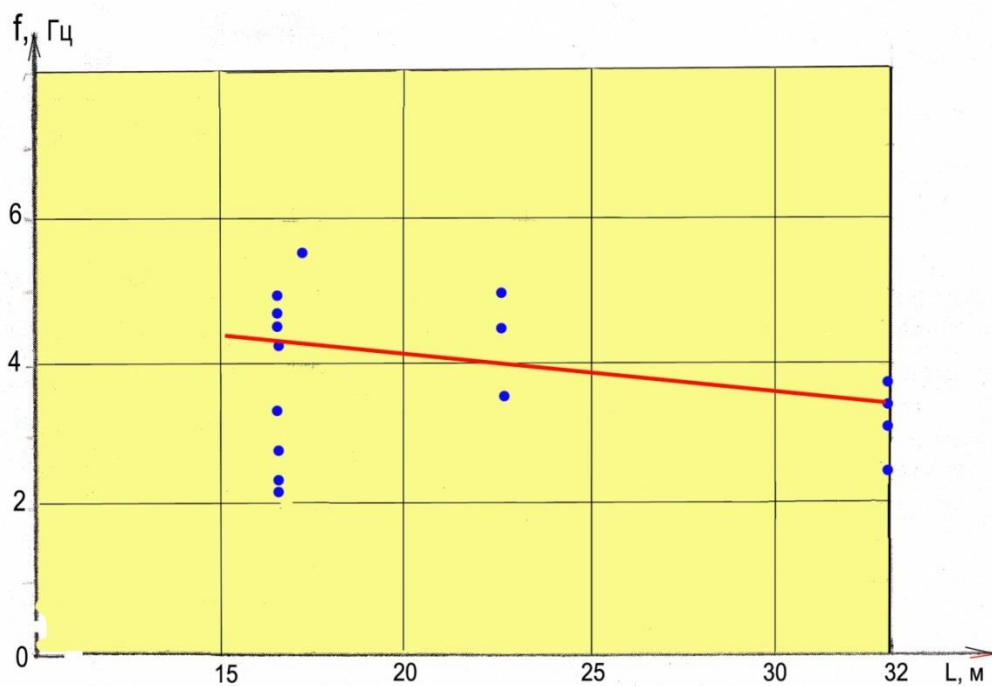


Рисунок 3.8. – Зависимость собственной частоты колебаний металлоконструкции в вертикальной плоскости от пролета крана

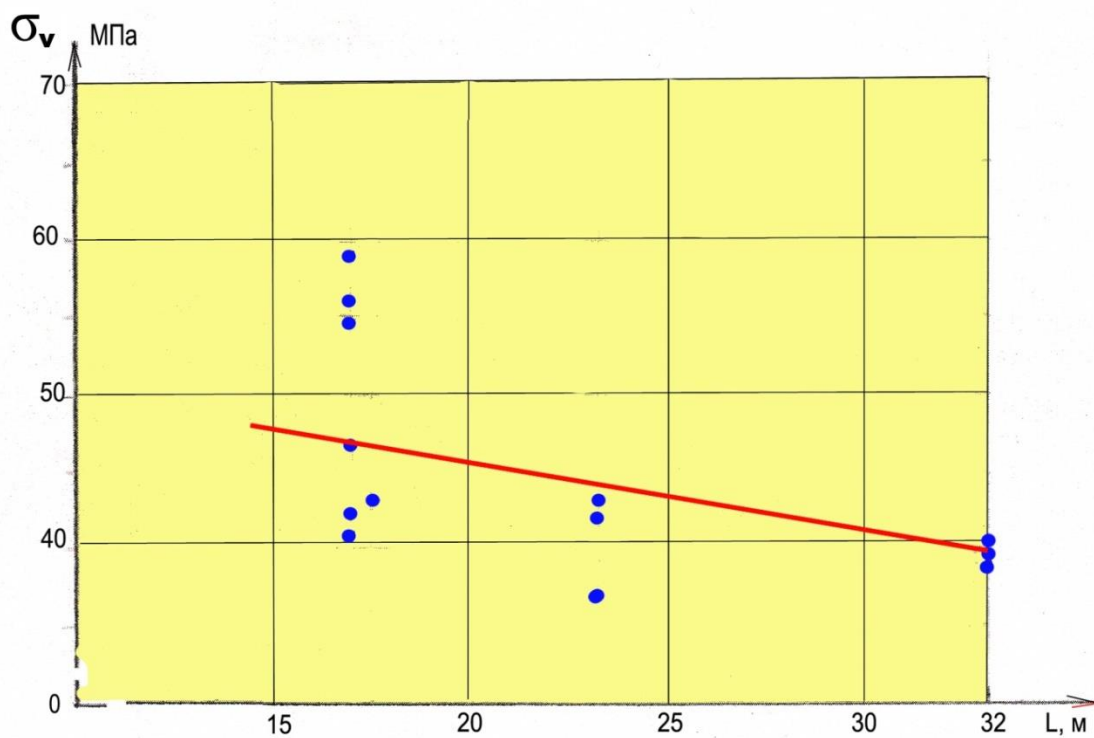


Рисунок 3.9. – Зависимость вертикальной составляющей напряжений в главных балках крана при сейсмическом воздействии от пролета крана

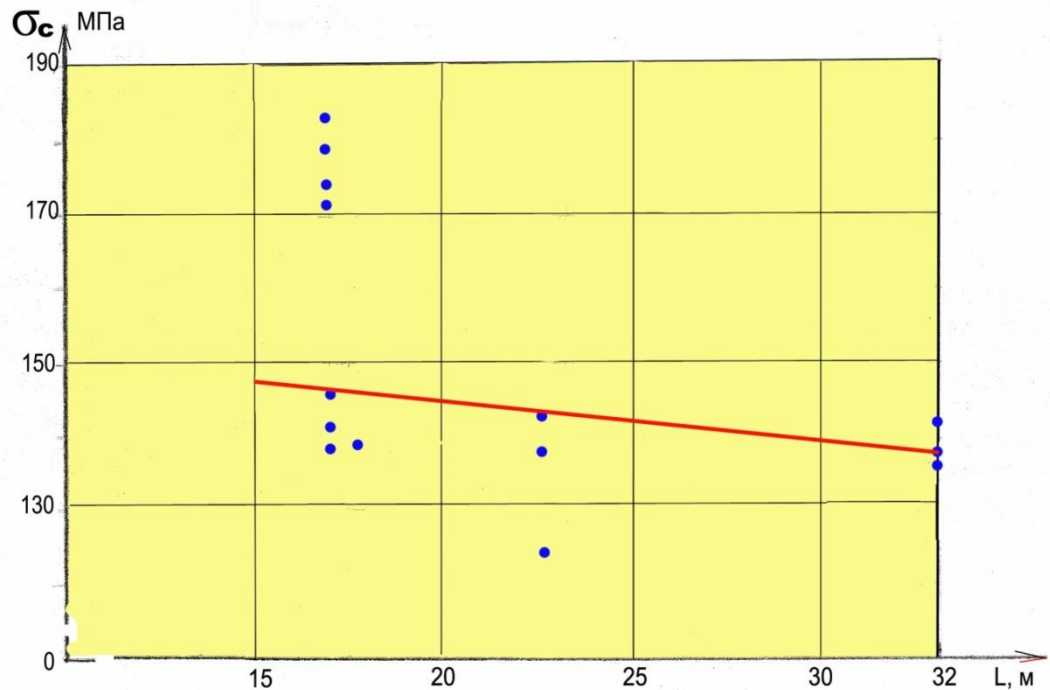


Рисунок 3.10. – Зависимость суммарных напряжений в главных балках крана от пролета крана

Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 3.6 – 3.10 и данных в таблицах Б.1 – Б.3 приложения Б показал:

- Разброс экспериментальных расчетных точек, представленных на рисунках 3.6 – 3.10 связан с особенностями конструктивного исполнения кранов и унификации, принятой на заводах страны. Оценка приведенных данных показала, что отсутствует полная корреляция между кранами разной грузоподъемности и разных заводов-изготовителей (то есть, металлоконструкции крана грузоподъемностью 10 т может иметь меньшую массу, чем металлоконструкция крана грузоподъемностью 5 т одного и того же пролета). В этой связи было принято решение к каждому массиву экспериментальных (расчетных) точек методом наименьших квадратов подобрать линейную аппроксимированную зависимость.

- Масса, как одна из динамических характеристик крана, возрастает с увеличением пролета. Аппроксимация экспериментальных (расчетных) точек,

представленных на рисунке 3.6, зависимостью

$$m = 858L - 158 \quad (3.13)$$

показала, что увеличение массы с возрастанием пролета (коэффициент при  $L$  равен 858) выше, чем снижение жесткости (коэффициент при  $L$  равен -471 формула 3.14), что говорит о более существенном влиянии массы при оценке сейсмостойкости крана.

- 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 для расчетов на сейсмостойкость выбирать постоянное сейсмическое ускорение, соответствующее горизонтальному участку нужного спектра рисунка 3.2 [35, 97]. Аппроксимация экспериментальных (расчетных) точек, представленных на рисунке 3.7, зависимостью

$$C = 42571 - 471L \quad (3.14)$$

показала, что собственная частота колебаний металлоконструкции крана убывает с увеличением пролета крана.

- Аппроксимация экспериментальных (расчетных) точек, представленных на рисунке 3.8, зависимостью

$$f = 5,05 - 0,05L \quad (3.15)$$

показала, что жесткость главных балок действительно снижается с увеличением пролета.

Аппроксимация экспериментальных (расчетных) точек, представленных на рисунке 3.9, зависимостью

$$\sigma_v = 54,7 - 0,46L \quad (3.16)$$

и экспериментальных (расчетных) точек, представленных на рисунке 3.10, зависимостью

$$\sigma_c = 152,7 - 0,49L \quad (3.17)$$

показала, что напряжения в металлоконструкциях при одних и тех же сейсмических воздействиях существенно ниже для кранов больших пролетов. Из-

за более высокой податливости главных балок, мостовые двухбалочные краны больших пролетов (27,5 м и более) лучше воспринимают сейсмические ускорения при одинаковых входных воздействиях и, соответственно, напряжения в них, как правило, меньше (см. рисунки 3.9 – 3.10).

- 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.

- Увеличение нагрузки в канатах механизма подъема крана при сейсмическом воздействии 8 баллов по шкале MSK-64 может быть близко к двукратному. Это необходимо учитывать при выборе канатов для кранов сейсмостойкого исполнения.

### **3.4 Анализ сейсмической прочности конструкции нового крана, разработанного для Смоленской АЭС**

Рассмотрим практические аспекты подхода, изложенного в разделе 3.1. настоящей работы, применительно к разработке и расчету нового мостового, однобалочного, подвесного крана, грузоподъемностью 10 т, предназначенного для одного из ОИАЭ. Работа выполнялась согласно требованиям Технического задания [176].

Расчет крана мостового электрического, специального, однобалочного, подвесного типа КП-10-11-8-36-380-УХЛ4.2-А6, выполнялся на основе конструкторской документации ТКБГ.1350.02.00.00.00.00 при непосредственном участии автора данной работы.

Основные технические данные крана приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Основные технические данные мостового электрического, подвесного крана для Смоленской АЭС [176]

|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Предприятие-изготовитель и его адрес                                             | ООО «Троицкий крановый завод»,<br>142150 МО, Подольский р-н, п. Минзаг,<br>ул. Солнечная, д. 21                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 2. Тип крана                                                                        | Мостовой электрический,<br>однобалочный, специальный, подвесной                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 3. Индекс крана                                                                     | КП-10-11-8-36-380-УХЛ4.2-А6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 4. Заводской номер                                                                  | 140005                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 5. Назначение                                                                       | - перемещение переходной плиты<br>камеры для фильтров, груз 600 кг;<br>- перемещение контейнера для<br>транспортировки крышки, груз 1812 кг;<br>- перемещение контейнера для<br>транспортировки фильтра, груз 3750 кг;<br>- перемещение контейнера с крышкой<br>(перемещаемый груз не более 2500 кг);<br>- перемещение контейнера с<br>фильтрующим элементом (суммарный<br>груз не более 3800 кг). |
| 6. Группа классификации<br>(режима) по ИСО 4301/1:<br>крана                         | A6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| механизмов:                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| подъема                                                                             | M5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| вспомогательного подъема                                                            | -                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| передвижения тали                                                                   | M5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| передвижения крана                                                                  | M5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 7. Тип привода                                                                      | электрический                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 8. Окружающая среда, в которой<br>может эксплуатироваться кран:<br>температура, °С: | От +16 до +26                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 9. Относительная влажность<br>воздуха, %, при температуре +16...+26 °С              | 75%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 10. Взрывоопасность                                                                 | нет                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 11. Пожароопасность                                                                 | нет                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 12. Ограничения по одновременной<br>работе механизмов                               | Да (всех механизмов)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

Продолжение таблицы 3.7

|                                                                          |                           |
|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 13. Род электрического тока, напряжение и число фаз:                     |                           |
| цепь силовая                                                             | переменный, 380 В, 3 фазы |
| цепь рабочего освещения                                                  | -                         |
| цепь ремонтного освещения                                                | -                         |
| 14. Грузоподъемность, т.                                                 | 10,0                      |
| 15. Высота подъема, м                                                    | 36,0                      |
| 16. Пролет крана, м                                                      | 8,0                       |
| 17. База крана, м                                                        | 2,6                       |
| 18. База тельфера, м                                                     | 1,6                       |
| 19. Длина пролетной балки, не более ,м                                   | 11                        |
| 20. Длина консолей, м                                                    | 1,5                       |
| 21. Ускорения (замедления), $\text{м/с}^2$ , не более                    | 0,2                       |
| - в горизонтальной плоскости                                             | 0,1                       |
| - в вертикальной плоскости                                               |                           |
| 22. Скорости механизма, (м/мин)                                          |                           |
| - подъема                                                                | 0,5 м/мин                 |
| - передвижения крана                                                     | 2,0 м/мин                 |
| - передвижения тали                                                      | 2,0 м/мин                 |
| 23. Место управления                                                     |                           |
| - при работе                                                             | с пола, пульт             |
| - при монтаже и испытаниях                                               | с пола, пульт             |
| 24. Способ токоподвода:                                                  |                           |
| к крану                                                                  | гибкий кабель             |
| к тали                                                                   | гибкий кабель             |
| 25. Тип кранового пути                                                   | 45М                       |
| 26. Максимальная допустимая нагрузка колеса крана на рельс, кН, не более | 17,0                      |
| 27. Степень защиты электрооборудования крана                             | IP 54                     |
| 28. Материалы конструкций крана                                          | 09Г2С-12 ГОСТ 19281-89    |
| 29. Масса крана в сборе и его составных частей, кг                       | 5,92                      |
| - Масса пролетной балки                                                  | 1,903                     |
| - Масса балки                                                            | 1,01                      |
| - Масса электротали                                                      | 2,0                       |
| 30. Класс безопасности по НП-001-97                                      | 3Н                        |

Продолжение таблицы 3.7

|                                            |          |
|--------------------------------------------|----------|
| 33. Группа крана по НП 034-11              | Группа Б |
| 34. Категория сейсмостойкости по НП-031-01 | II       |
| 35. Сейсмический район по MSK – 64         | 6 баллов |
| 36. Высотная отметка установки крана, м    | 37,750   |

Величины масс, приведенные в п. 29 таблицы 3.7, являются не теоретическими, а фактическими, полученными в результате поузлового взвешивания элементов конструкции. При этом, полученная общая фактическая масса крана оказалась на 13.5 % выше, чем его теоретические массы, полученные в результате компьютерного расчета. Очевидно, указанное различие может быть объяснено тем, что при подсчете теоретической массы крана не учитывался ряд элементов его электрооборудования (электрических кабелей, концевых выключателей и т.д.). Размеры расчетных сечений элементов металлоконструкции крана, а также расчетные величины моментов инерции, моментов сопротивления, характеристики приводов и т.п. приняты по рабочим чертежам крана и, для краткости изложения, мы их не приводим. В качестве материала, из которого изготовлены расчетные элементы металлической конструкции крана, принята сталь 09Г2С–12 по [33]. Чертеж общего вида данного крана приведен на рисунке 3.11.

Как видно из этого чертежа, механизм подъема состоит из следующих сборочных единиц: грузовой лебедки – 1, ходовых тележек – 2, уравнительного блока – 3, шкафа системы управления – 4 и крюковой подвески – 5. Грузовая лебедка оснащена с обеих сторон двумя мотор-редукторами. При обычной работе грузовой лебедки, работает привод только одного из мотор-редукторов, в то время как от другого мотор-редуктора используется лишь тормоз, который выполняет роль дублирующего тормоза при транспортировке опасных грузов. В случае отказа подключенного электродвигателя грузовой лебедки, конструкция системы управления краном позволяет легко подключить к работе резервный

электродвигатель.

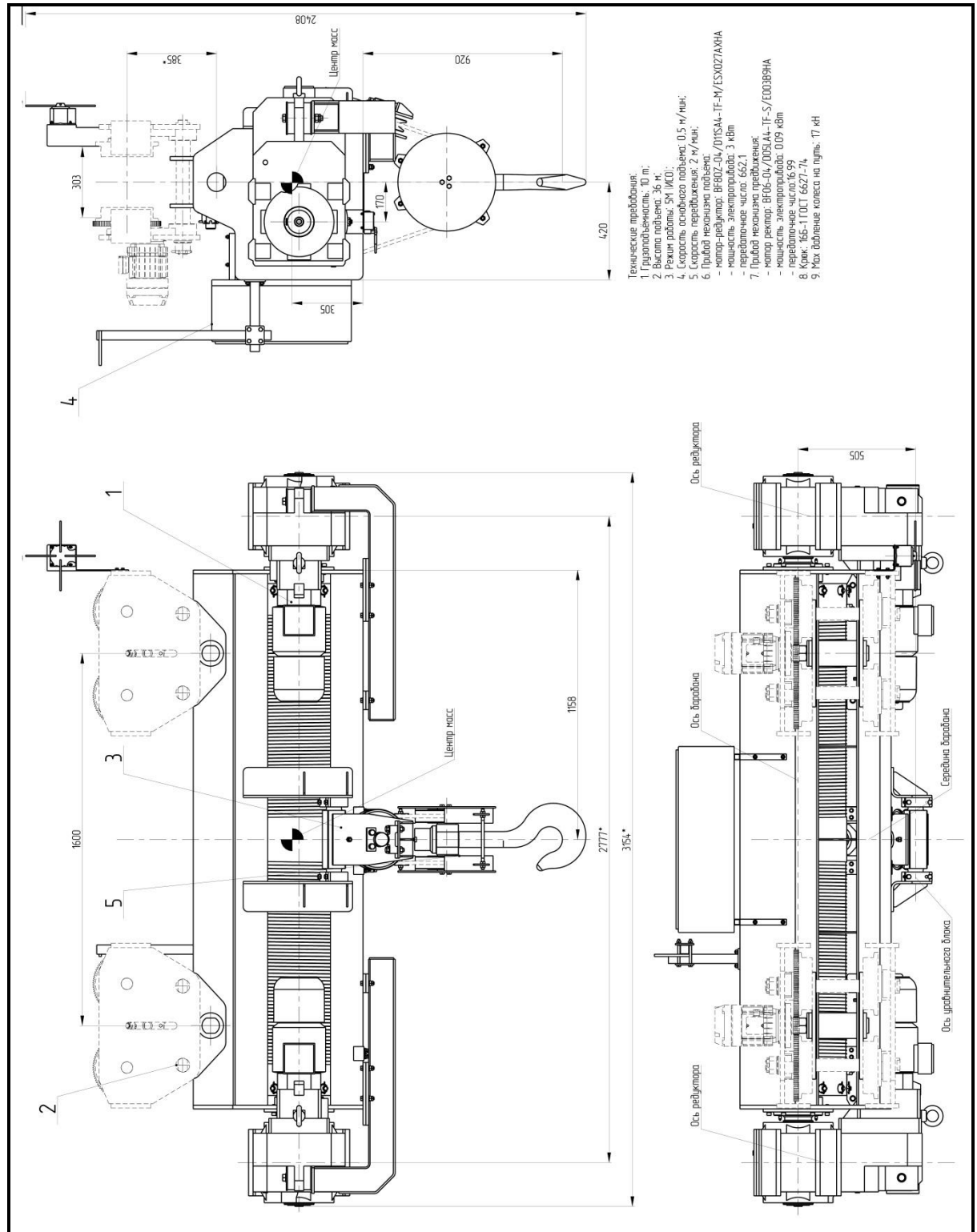


Рисунок 3.11 – Чертеж общего вида механизма подъема крана мостового электрического специального грузоподъемностью 10т для Смоленской АЭС

Методически расчет выполнен согласно положениям, изложенным ранее в работах [88, 144] и разделу 3.2 данной работы.

Коэффициент демпфирования металлоконструкции крана принят равным 0,25 [35]. Расчетная первая частота собственных колебаний металлоконструкции крана получилась равной - 3,56 Гц.

Согласно [35], для крана при высоте установки от 30 – 70 м, максимальная горизонтальная амплитуда ускорений, соответствующая 6 баллам по MSK-64, составляет  $0,75 м \times с^{-2}$ .

Максимальная амплитуда в вертикальном направлении составляют 0,7 от горизонтальной,  $0,525 м \times с^{-2}$ .

Конструкцию крана можно признать средненагруженной. В результате действия сил при нормальных условиях эксплуатации плюс проектное землетрясение (НУЭ+ПЗ) (согласно [133, 134]) получены следующие эквивалентные напряжения:

- в соединениях концевой балки с пролетной -150 МПа;
- в середине пролета - 50-53 МПа (таль с грузом в середине пролета);
- прогиб главной балки  $f$  под действием расчетных сочетаний нагрузок, достигает 7,6 мм, при допускаемой величине прогиба  $[f] = L / 700 = 11,43$  мм (где  $L = 8000$  – пролет крана, мм).

Данный расчет показал, что вертикального отрыва колес крана во время сейсмического расчета не происходит, хотя для подвесных кранов подскок крана, как жесткого целого не столь опасен в силу конструктивных особенностей их подвески: ходовые колеса крана, охватывающие с обеих сторон ездовой двутавр, позволяют при сейсмическом воздействии лишь частично перемещаться механизму подъема вдоль высоты стенки двутавра, не позволяя соскочить с нее целиком.

Расчетные картины напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции крана представлены на рисунках 3.12 – 3.14.

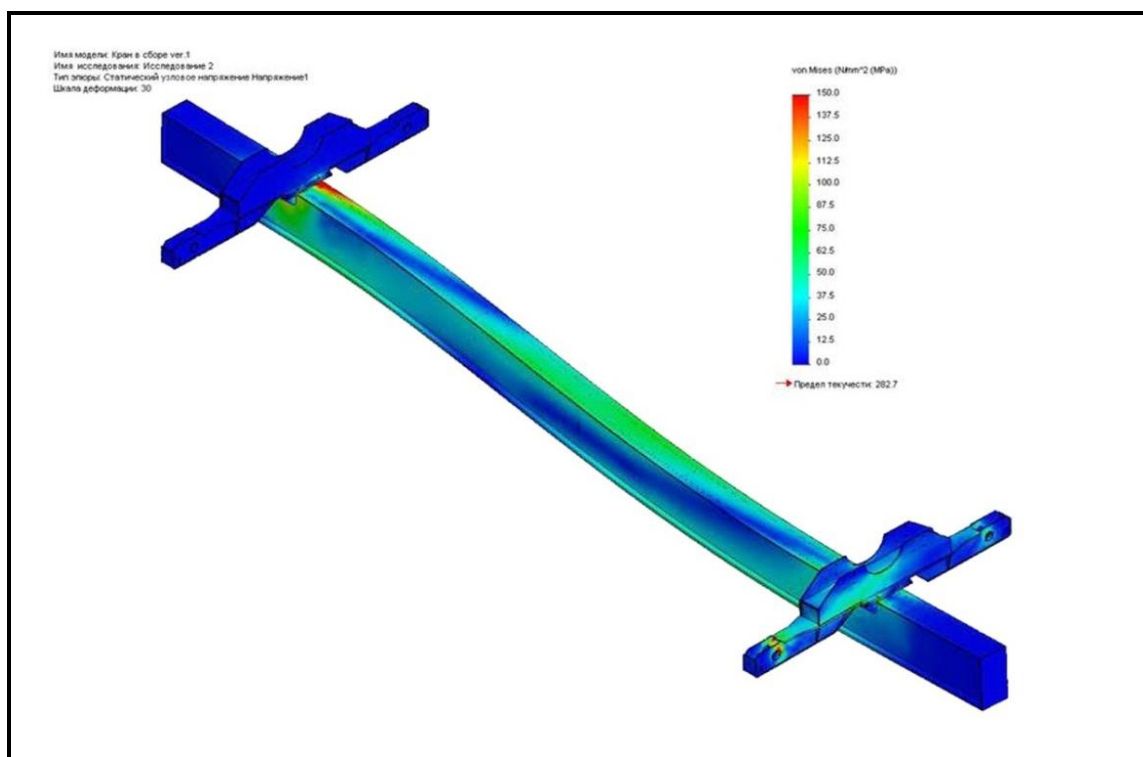


Рисунок 3.12 – НДС металлоконструкции крана однобалочного, подвесного для Смоленской АЭС при сейсмическом воздействии 6 баллов по шкале MSK-64

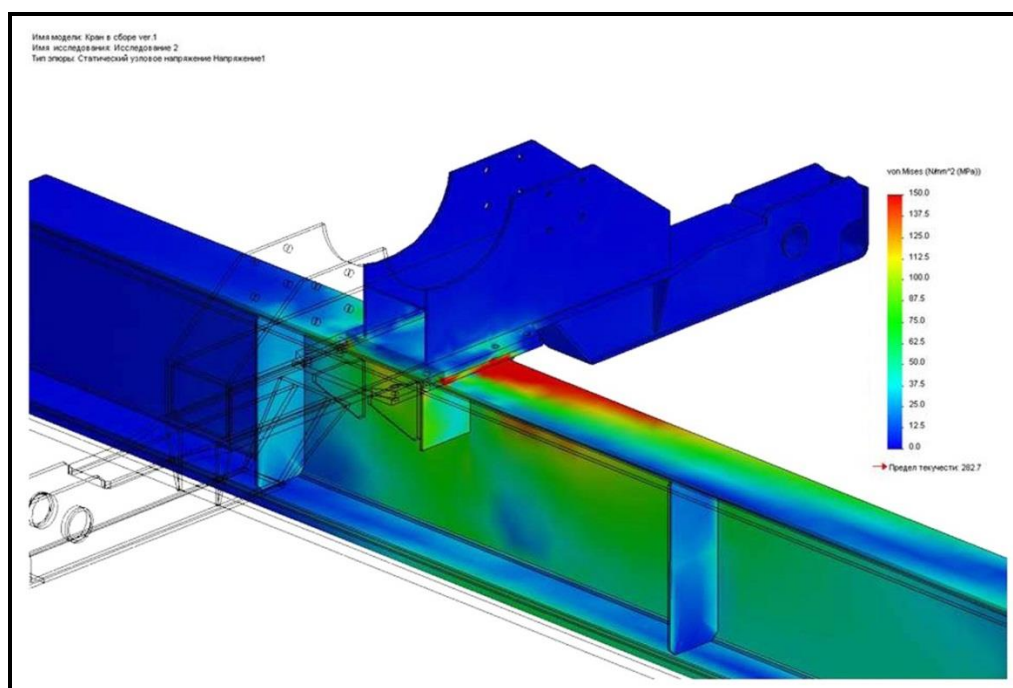


Рисунок 3.13 – НДС металлоконструкции крана однобалочного, подвесного для Смоленской АЭС при сейсмическом воздействии 6 баллов по шкале MSK-64 (фрагмент соединения главной и концевой балок)

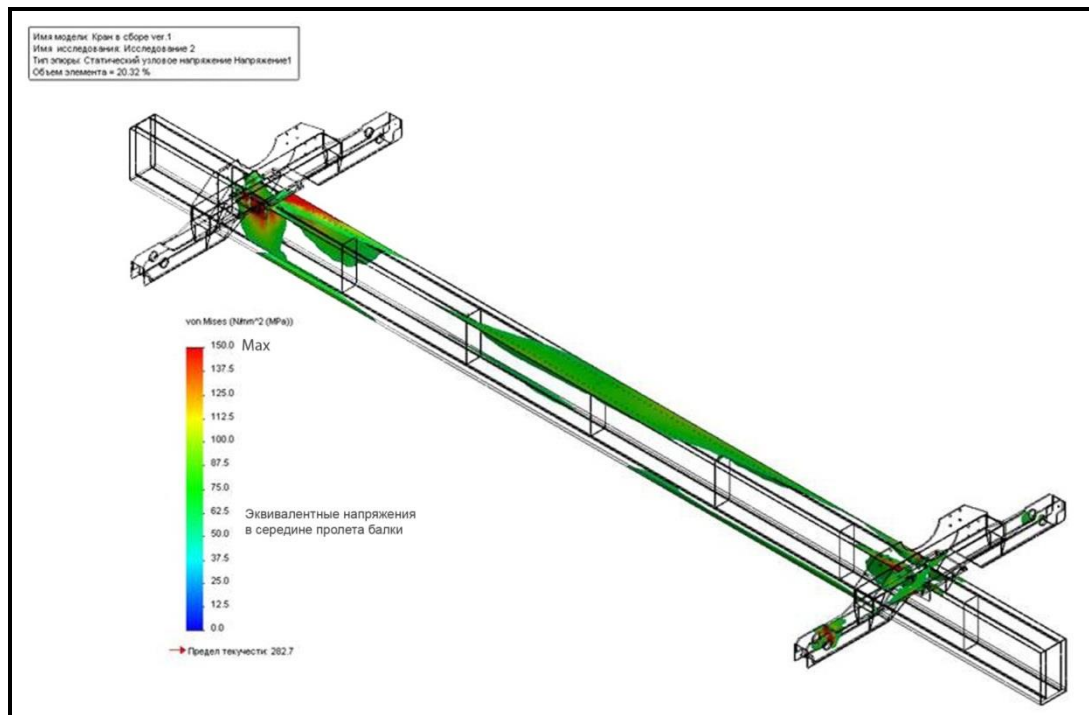


Рисунок 3.14 – Эквивалентные напряжения в главной балке крана однобалочного, специального, подвесного для Смоленской АЭС при сейсмическом воздействии 6 баллов по шкале MSK-64

По результатам проведенных расчетов и разработанной конструкторской документации, данный кран был изготовлен и испытан на ООО «Троицкий крановый завод».

Общий вид механизма подъема изготовленного крана представлен на рисунке 3.15.



Рисунок 3.15 – Общий вид механизма подъема крана мостового, специального, однобалочного, грузоподъемностью 10 т для ОИАЭ. Механизм подъема крана собран, но еще не окрашен

Фрагмент статических испытаний крана представлен на рисунке 3.16, при этом, в середине фото хорошо видны показания дисплея лазерного дальномера, на котором зафиксирован статический прогиб главной балки под увеличенной испытательной нагрузкой, (1,25 x грузоподъемность крана) равной 12,5 т. Величина данной испытательной нагрузки принята в соответствии с требованиями п. 175 [184].



Рисунок 3.16 – Статические испытания крана мостового, специального, однобалочного, грузоподъемностью 10 т для ОИАЭ. Удержание краном поднятого груза 12,5 т

Проведенные статические испытания с грузом 12,5 т, показали, что упругая деформация металлоконструкции крана при воздействии испытательного груза не выше расчетной, что говорит о соответствии изготовленного крана его расчетным параметрам, в частности, полученный статический прогиб по показаниям лазерного дальномера составил:  $(2584 - 2575 = 11 \text{ мм})$  или, по отношению к длине пролета крана (см. строку 16 таблицы 3.7):  $11 \text{ мм} / 8 \text{ м} = 0,001375$  или, преобразуя это в виде простой дроби, как принято в [173], получим примерно  $1/750$  длины пролета крана, что меньше, чем допустимый прогиб для кранов группы классификации А6 [173].

### 3.5 Выводы по разделу 3

3.5.1. Разработан методический подход к оценке сейсмостойкости мостовых грузоподъемных кранов, учитывающий рекомендации нормативных документов по сейсмическим расчетам указанного оборудования.

3.5.2. Проанализированы примеры оценок динамических характеристик и напряженно-деформированного состояния одного однобалочного и 16 двухбалочных мостовых кранов, установленных в зданиях сейсмически активной зоны с уровнем возможного землетрясения, равным 8 баллам по шкале MSK-64, результаты расчета которых представлены в Приложении Б.

3.5.3. Обобщение результатов исследований показало, 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.

3.5.4. Получены экспериментальные (расчетные) зависимости динамических характеристик и уровней напряжений для кранов различных пролетов, которые можно использовать для сравнительных оценок еще на стадии эскизного проекта мостового крана сейсмостойкого исполнения.

3.5.5. Проанализирован конкретный пример определения напряженно-деформированного состояния мостового, специального, однобалочного крана, грузоподъемностью 10 т для Смоленской АЭС перед его запуском в производство и доказано экспериментально его соответствие требованиям технического задания, результатам расчета и конструкторской документации [59].

## **4 ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ РЕЛЬСА В УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ НАГРУЗКАМИ**

### **4.1 Выбор рельса для грузоподъемных кранов**

В работе [74], посвященной оценке безопасной эксплуатации крана на рельсовом пути было предложено оценивать «меру безопасности эксплуатации» величиной возможного риска.

Однако до последнего времени отечественных стандартов на надземный крановый рельсовый путь не разработано. Также отсутствуют однозначные нормативы по выбору типа подкранового рельса в зависимости от интенсивности работы крана и величины нагрузки от кранового колеса, а стандарт по конструкции крепления рельсов к подкрановым балкам всего один [29], хотя вариантов крепления рельса известно достаточно много [172].

Существующие рекомендации изготовителей грузоподъемных кранов по выбору рельсовых путей, приведенные в руководствах по эксплуатации, дублируют пока еще недавно отмененные «Правила...» [150], а ранее изданные нормативы нередко противоречат друг другу.

Например, в справочнике [172] приведены следующие рекомендации выбора рельса в зависимости от величины нагрузки, создаваемой колесом крана (см. таблицу 4.1).

Как видно из текста ряда строк, приведенных в таблице 4.1, для различных нагрузок от колеса крана могут применяться одни и те же рельсы. Рекомендации таблицы 4.1 никак не отражают фактическую интенсивность (группу классификации) крана в технологическом процессе и, разумеется, не дают необходимой информации о нагружении рельсов для определения допустимой вероятности их возможного разрушения (аварии).

Конечно, можно утверждать, что применение рельса Р43 для нагрузки от колеса крана равной 320 кН увеличит вероятность возможного разрушения

рельсов (аварии), по сравнению с эксплуатационной нагрузкой от колеса, равной 200 кН. Однако, прямой зависимости вероятности возникновения возможного разрушения рельса от увеличенной статической нагрузки ожидать не следует, ибо интенсивность эксплуатации кранов, выбранных нами для сравнения, может быть существенно различной.

Следует также отметить, что рекомендации справочника [172] лишь частично соответствуют данным, приведенным в аналогичной таблице [136], которые для некоторых величин нагрузок предоставляют еще большую «свободу» в выборе типов и размеров рельсов. Так, например, при нагрузке от колеса крана в пределах от 100 до 200 кН, согласно [136], могут использоваться рельсы КР70, которые по рекомендациям [172] назначают для существенно большей нагрузки - 320 кН.

Таблица 4.1 – Типы и размеры рельсов для мостовых кранов и их тележек [172]

| Нагрузка от колеса крана, кН, не более                                          | Форма головки рельса |         |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------|
|                                                                                 | Полукруглая          | Плоская |
| 50                                                                              | P18                  | 40      |
| 100                                                                             | P38                  | 50      |
| 160                                                                             | P38                  | 60      |
| 200                                                                             | КР50, P43            | 60      |
| 250                                                                             | КР50, P43            | 70      |
| 320                                                                             | КР70, P43            | 80      |
| 500                                                                             | КР80, P50            | 90      |
| 800                                                                             | КР 120, P65          | 100     |
| 1000                                                                            | КР140                | 120     |
| Примечание. При закругленной головке указан его тип, при плоской – размер в мм. |                      |         |

По аналогии с данными таблицы 4.1, рекомендации таблицы 4.2, также не отражают фактическую интенсивность эксплуатации (группу классификации)

крана по стандарту [106] в технологическом процессе, примененному типу крепления рельсов к основанию (подкрановым балкам), выбору конструкции соединения стыков рельсов в рельсовую нить и, разумеется, не дают необходимой информации о нагружении рельсов для определения допустимой вероятности их возможного разрушения (аварии) [94].

Таблица 4.2 – Типы и размеры рельсов, назначаемые согласно [136]

| Нагрузка от колеса крана, кН | Тип рельса с выпуклой головкой | Плоский рельс.<br>Ширина рельса, мм |
|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| До 50 вкл.                   | P18, P24, P38                  | 40; 45; 50                          |
| Свыше 50 до 100 вкл.         | P38, P43, KP70                 | 50; 55; 60                          |
| Свыше 100 до 200 вкл.        | P38, P43, P50, KP70            | 50; 55; 60; 65; 70                  |
| Свыше 200 до 250 вкл.        | P43, P50, KP70, KP80           | 60; 65; 70                          |
| Свыше 250 до 320 вкл.        | P43, P50, KP80, KP100          | 70; 75; 80                          |
| Свыше 320 до 500 вкл.        | KP80, KP100                    | -                                   |
| Свыше 500 до 800 вкл.        | KP100, KP120                   | -                                   |
| Свыше 800 до 1000 вкл.       | KP120, KP140                   | -                                   |

Поскольку эксплуатация надземных рельсовых путей связана с нагружением подкрановых балок от перемещения кранов с транспортируемым грузом, проанализируем нормативные документы, по которым следует определять нагрузки, создаваемые мостовыми кранами во время их эксплуатации. Для этого обратимся к нормативному документу [159].

Согласно [159], «...нагрузки от мостовых и подвесных кранов, следует определять в зависимости от групп режимов их работы, устанавливаемых [30], от вида привода и от способа подвеса груза.

Нормативные значения вертикальных нагрузок, передаваемых колесами кранов на балки кранового пути, и другие необходимые для расчета данные следует принимать в соответствии с требованиями государственных стандартов на краны, а для нестандартных кранов – в соответствии с данными, указанными в паспортах заводов-изготовителей.»

Здесь нет никаких противоречий, ибо нагрузка, передаваемая колесом крана на рельс, является одним из обязательных параметров, включаемых изготовителем в паспорт крана.

Согласно [159], «Нормативное значение горизонтальной нагрузки, направленной вдоль кранового пути и вызываемой торможением моста электрического крана, следует принимать равным 0,1 полного нормативного значения вертикальной нагрузки на тормозные колеса рассматриваемой стороны крана.

Нормативное значение горизонтальной нагрузки, направленной поперек кранового пути и вызываемой торможением электрической тележки, следует принимать равным:

- для кранов с гибким подвесом груза – 0,05 суммы подъемной силы крана и веса тележки;
- для кранов с жестким подвесом груза – 0,1 суммы подъемной силы крана и веса тележки».

Приведенные выше рекомендации относительно назначения горизонтальных нагрузок, нуждаются в дополнительном обосновании, ибо они назначены без учета фактических (ускорений) скоростей движения крана (грузовой тележки) и длины пролета крана. Например, инерционные нагрузки кранов с малым и большим пролетами могут отличаться иногда в 2 и более раз.

Согласно [159] «Нормативное значение горизонтальной нагрузки, направленной поперек кранового пути и вызываемой перекосами мостовых электрических кранов и непараллельностью крановых путей (боковой силой), для каждого ходового колеса крана следует принимать равным 0,2 полного нормативного значения вертикальной нагрузки на колесо.

Эту нагрузку необходимо учитывать только при расчете прочности и устойчивости балок крановых путей и их креплений к колоннам в зданиях с кранами групп режимов работы А7, А8 по [30].»

Эти рекомендации также никак не связаны с фактическими отклонениями рельсовых нитей от проектного положения и не отражают результатов

исследований по влиянию неровностей путей, выполненных в отрасли краностроения [87].

Несмотря на некоторые различия норматива [159] с нормами, принятыми в краностроении, этот документ следует признать полезным, ибо в нем приведены рекомендации по назначению нагрузок при одновременной эксплуатации на одних рельсовых путях нескольких кранов, установлены нормативы прогибов подкрановых балок для опорных и подвесных мостовых кранов, а также представлена методика расчета нагрузок на тупиковые упоры.

Рассмотрим теперь условие безопасной работы грузоподъемного мостового крана перемещающегося по рельсовому пути.

В случае отсутствия каких-либо дефектов ходовой части крана и рельсового пути, а также возможных эксплуатационных перегрузок, нагрузки от колес крана на рельсы не превышают расчетных, то есть, приведенных в нормах на проектирование. Таким образом, условие безопасности (отсутствие разрушения рельса) можно представить в виде:

$$N \leq [N], \quad (4.1)$$

где  $N$  – результирующая нагрузка от колеса крана на рельс, кН,

$[N]$  – допустимое значение нагрузки, принимаемое согласно нормам проектирования.

Однако, несмотря на то, что выбор кранового рельса в отечественной практике осуществляют по статической нагрузке от колеса крана, условие безопасности (отсутствие разрушения рельса) корректнее представить в виде формулы (2.24) [151].

Особенности работы подкрановых рельсов в условиях нагружения следует дополнительно учесть коэффициентом условий работы [172] –  $\gamma_c$ , понижающим расчетное сопротивление  $R_y$ , и именно тут появляется необходимость в назначении данного коэффициента в зависимости от фактической группы классификации (режима работы) крана, эксплуатируемого на данном рельсовом

пути и фактических запасов, которые были приняты при выборе типа рельса по нагрузке от колеса, согласно [136] или [172].

Анализ работ [52, 173] показывает, что коэффициент условий работы  $\gamma_c$  может варьироваться в довольно широких пределах от 0,70 до 0,90.

Следует отметить, что выбор типа рельса в зависимости только от статической нагрузки, передаваемой колесами крана, принят не везде. Например, в работе [204] методика выбора рельсов для мостовых кранов американской краностроительной компании Whiting Corporation учитывает номинальную скорость движения крана и его паспортную группу классификации (режима работы), что, по мнению автора данной работы, более корректно отражает учет фактического нагружения рельса.

Единственным недостатком инженерного применения рекомендаций Whiting Corporation применительно к отечественной практике является использование в ней не метрической системы мер и типов рельсов. Форма головки и материал крановых рельсов США не имеют отечественных аналогов.

Используя подход, приведенный в данном подразделе, а также методику оценки риска, изложенную в 2.4 и работе [74], можно выполнять практические расчеты по обоснованию безопасности рельсовых путей (отсутствию разрушения рельсов) во время эксплуатации на них грузоподъемных кранов.

#### **4.2 Обзор исследований по воздействию нагрузок на рельс и распространению их по рельсу**

Впервые проблема воздействия подвижных нагрузок на сооружения, с установленными на них рельсовыми путями, возникла в связи со строительством железных дорог и мостов. Исследованием этой проблемы занимались многие известные ученые. Прежде всего, были решены задачи для предельных случаев, когда можно пренебречь массой сооружения в сравнении с массой нагрузки [206], или, наоборот, масса нагрузки мала в сравнении с массой сооружения.

Аналитическое решение задачи о колебаниях балки в том случае, когда массой передвигающегося груза можно пренебречь, предложено в работе [203].

В ряде статей С.П. Тимошенко [178, 179, 180, 181] были основательно рассмотрены эти вопросы (применительно к подвижному составу железных дорог) и установлено, что с большой степенью достоверности можно опираться в исследованиях на следующие положения:

- при отсутствии несовершенств у колеса и рельса кривизна траектории точки касания колеса и рельса не имеет никакого практического значения;
- от рельса на упругих опорах можно перейти к рельсу на сплошном упругом основании.

Последнее, убедительно показано также в работах Н.П. Петрова [141, 142].

И сегодня коллективы отечественных ученых продолжают изучать различные аспекты рассматриваемой проблемы. Отметим публикации М.Х. Ахметзянова [3, 4], П.М. Белоцерковского [9, 194], М.В. Блоха [14], Г.П. Бурчака [17, 18, 19], И.И. Иванченко [63], А.Я. Когана [68, 69], В.Ф. Ковальского [67], А.В. Кузнецова [76, 77, 78, 79], Е.Н. Курбацкого [80, 81, 82], В.Б. Мещерякова [123, 124, 125, 126, 127], Г.Б. Муравского [129, 130, 131, 132] и других ученых.

Фундаментальные монографии: В.К. Гарг и Р.В. Дуккипати [26], К. Джонсон [41], J.J. Kalker [199, 200, 201] содержат ряд оригинальных решений многих вопросов, связанных с динамическим взаимодействием пути и железнодорожного подвижного состава.

Первые исследования ударного воздействия колесной пары с ползуном на рельсовый путь были выполнены в начале прошлого века Н.П. Петровым [141, 142], С.П. Тимошенко [179], а позднее Н.Т. Митюшиным [128], Г.М. Шахунянцем [188], М.Ф. Вериге [24], М.П. Пахомовым [139], Н.Н. Кудрявцевым [75], М.В. Блохом [13] и В.Ф. Яковлевым [193].

Вопросы экспериментального определения сил взаимодействия колеса с ползуном и рельса рассмотрены в статьях П.С. Анисимова [2], Ю. Сато [158, 205], К. Эсвельда [192] и А.К. Шафранского [189].

С 1961 г. во ВНИИЖТе функционирует отделение комплексных испытаний,

в работе которого уделяется большое внимание динамическому взаимодействию пути и подвижного состава. Достаточно полно современное состояние проблем взаимодействия рельсового пути и железнодорожного подвижного состава изложено в монографиях М.Ф. Вериги и А.Я. Когана [22? 23], И.В. Бирюкова [12], А.Я. Когана [68] и Е.А. Шура [190].

В качестве расчетной модели в этих работах обычно используется балка на упругом винклеровском основании.

Результаты исследований, связанные с изучением воздействия нагрузок на строительные конструкции, на которых установлены рельсовые пути грузоподъемных кранов приведены в строительных нормах [148, 161, 162, 171], а также в справочнике [108].

При передвижении мостовых кранов, вследствие наличия стыков, выбоин, наплывов электросварки и других местных неровностей рельсового пути или «неправильности» геометрической формы ходовых колес, возникают динамические нагрузки, имеющие характер удара.

Мостовые краны имеют жесткую безрессорную ходовую часть, а подкрановые рельсы чаще всего устанавливаются на металлических и бетонных подкрановых балках, имеющих значительно большую жесткость, чем, например, железнодорожные рельсовые пути, установленные на деревянных шпалах.

По данным ВНИИПТМАШ [71] наибольшее количество повреждений металлоконструкций мостовых кранов наблюдается в местах крепления букс к концевым балкам. Причин такому явлению, как минимум, две: резкое снижение момента сопротивления сечения концевой балки в месте установки буксы и наличие ударных динамических нагрузок при прохождении неровностей рельсового пути, которые при последующих расчетах и выборе рельса обычно задают в виде динамических коэффициентов. Однако назначение их конкретной величины нуждается в дополнительном обосновании, которое будет приведено ниже.

#### **4.3 Анализ моделей распространения ударных волн вдоль рельсов и подкрановых балок**

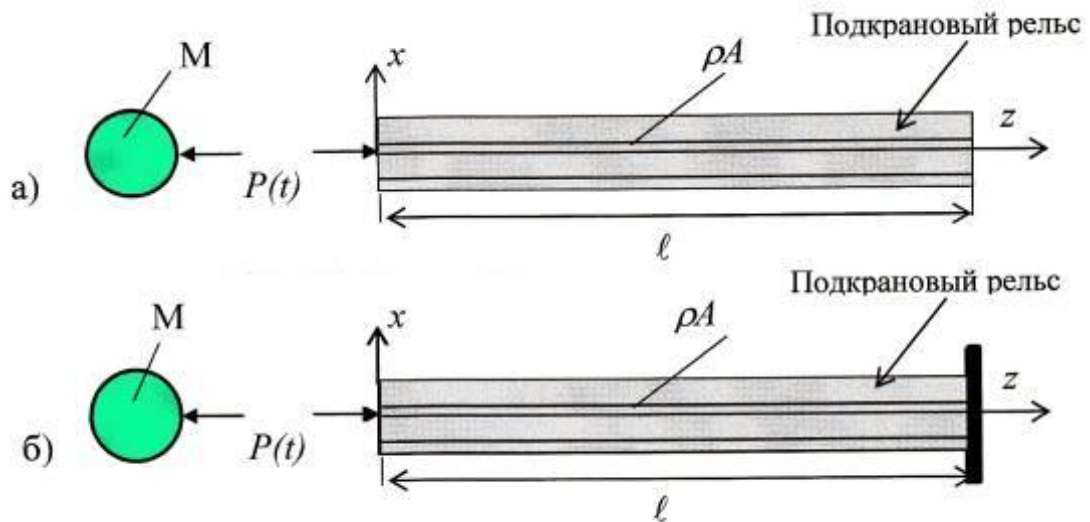
В практических задачах, связанных с оснащением грузоподъемными кранами сейсмоопасных объектов или трюмов морских судов (см. пример на рисунке 1.2), возникает необходимость проанализировать воздействие ударных нагрузок со стороны крана на рельс (или совместно нагружаемую с рельсом подкрановую балку), как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Для грузоподъемных кранов общего назначения нагружение рельса в продольном направлении происходит в результате наезда колесом крана на стык рельсового пути, в котором рельсы установлены не на одном вертикальном или горизонтальном уровне, то есть не соосно. Одновременно, из-за наличия зазора в стыках, происходит и вертикальный удар по рельсу.

Рассмотрим постановку и решение этих задач более подробно.

Известно, что решение задачи о распространении упругих ударных продольных волн в рельсе (или балке), как правило, состоит из нескольких этапов. Прежде всего, требуется определить параметры нагрузки, возникающей при ударе.

Для упрощения качественного анализа поставленной задачи, примем в качестве допущения, что удар массивного тела массой  $M$  происходит симметрично с продольной осью рельса, при этом будем опираться на известную теорию Г. Герца, в соответствии с которой, контактную силу  $P(t)$  при ударном взаимодействии двух тел (Рисунок 4.1)



а) свободный правый торец, б) зашеченный правый торец

Рисунок 4.1 – Расчетные схемы удара по рельсу

можно найти из следующего уравнения [198]:

$$P(y, t) = K_0 [y_1(P, t) - y_2(P, t)]^{3/2}, \quad (4.2)$$

где  $K_0$  – контактная жесткость, Н/м;

$$y_1(P, t) = V_0 t - \frac{1}{M} \int_0^t P(\tau)(t - \tau) d\tau \quad \text{– перемещение ударяющего массивного тела}$$

массой  $M$ , м,

$y_2(P, t)$  – перемещение рельса (балки) в точке соударения, м,

$V_0$  – начальная скорость соударения тел, м/с.

Для получения перемещения  $y_2(P, t)$  необходимо рассмотреть дифференциальное уравнение продольного движения рельса (балки). При этом следует выбрать динамическую модель, описывающую распространение волн. Для чего необходимо сопоставить известную «классическую» и выбранные нами «уточненные» модели.

В коротких рельсах (балках), когда расстояние до ближайшей опоры невелико, обязательно возникает необходимость учета отраженных волн. Исходя из этого, будем рассматривать последующие аналитические решения с учетом возможного эффекта отраженных волн. Для получения решений, адекватных

реальным процессам, также необходим учет диссипативных сил, влияющих на затухание динамических процессов в упругих телах.

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

$$\rho A \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 y_2}{\partial z^2} = 0, \quad (4.3)$$

где  $\rho$  – плотность материала рельса, кг/м<sup>3</sup>,

$E$  – модуль упругости материала рельса, Мпа,

$A$  – площадь поперечного сечения подкранового рельса, м<sup>2</sup>,

$z$  – продольная координата поперечного сечения, м,

$y_2(P, t)$  – перемещение рельса (балки) в точке соударения, м.

Граничные условия запишем следующим образом:

$$\text{при } z = 0 \quad EA \frac{\partial y}{\partial z}(0, t) = P(t) \text{ – одинаково для схем а) и б).} \quad (4.4)$$

Поскольку при ударе для схемы б) перемещение сечения конца рельса ( $z = \ell$ ) из-за наличия заделки будет равно нулю, второе граничное условие для обеих схем запишем в следующем виде:

$$\text{при } z = \ell \text{ для схемы а) } EA \frac{\partial y}{\partial z}(\ell, t) = 0, \text{ для схемы б) } y(\ell, t) = 0. \quad (4.5)$$

Приняв для рассматриваемого случая  $\ell = \infty$ , воспользуемся интегральным преобразованием Лапласа для решения уравнения (4.3), получаем такое выражение для перемещения рельса на его левом торце:

$$y_2(0, t) = \frac{1}{\rho A c} \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad (4.6)$$

где  $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  – скорость распространения продольных волн в материале рельса, м/с.

В результате подстановки выражения (4.6) в (4.2) получаем следующее нелинейное интегральное уравнение распространения продольного удара по подкрановому рельсу:

$$\left(\frac{P(t)}{K_0}\right)^{2/3} = V_0 t - \frac{1}{M} \int_0^t d\tau \int_0^t P(\tau) d\tau - \frac{1}{\rho A c_0} \int_0^t P(\tau) d\tau. \quad (4.7)$$

Уравнение (4.7) может быть решено одним из численных методов, например, методом Эйлера.

Как было отмечено выше, классическая постановка задачи удара и ее решение не учитывает дисперсию распространения продольных волн. Из литературы для подобного случая известно лишь одно точное решение, полученное для продольного стержня, выполненного в виде цилиндра, полученное Похгаммером-Кри на основе уравнений теории упругости [191].

Далее, рассмотрим приближенное математическое описание поставленной задачи распространения удара по подкрановому рельсу, с учетом инерции радиальных движений при продольном растяжении-сжатии рельса, которое можно построить на основе использования теории Лява [101]. Дифференциальное уравнение в этом случае будет иметь вид:

$$\rho A \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 y_2}{\partial z^2} - \rho A \nu^2 r_0^2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial z^2 \partial t^2} = 0, \quad (4.8)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона для материала рельса,

$r_0$  – полярный радиус инерции поперечного сечения рельса, м.

Отметим, что в приведенном уравнении (4.8), записанном на основе теории Лява, несовершенством является то, что значения фазовой и групповой скоростей коротких волн стремятся к нулю, в то время как решение Похгаммера-Кри дает для коротких волн конечные, отличные от нуля значения. Этот недостаток можно компенсировать, используя для описания процесса удара теорию Бишопа [195], в этом случае, дифференциальное уравнение, будет иметь вид:

$$\rho A \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 y_2}{\partial z^2} - \rho A \nu^2 r_0^2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial z^2 \partial t^2} - G A \nu^2 r_0^2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial z^4} = 0, \quad (4.9)$$

где  $G$  – модуль сдвига для материала рельса, МПа.

Для записи выражений продольных перемещений торцевого сечения рельса (балки)  $y_2(P, t)$ , воспользуемся результатами, полученными В.И. Исаевым в

работе [64], тогда, опуская промежуточные выкладки, из уравнений (4.8) и (4.9) можно получить следующие решения:

По теории Лява

$$y_2(0,t) = \frac{1}{\rho A v r_0} \int_0^t dt \int_0^t P(\tau) J_0\left(\frac{c}{v r_0}(t-\tau)\right) d\tau, \quad (4.10)$$

где  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка.

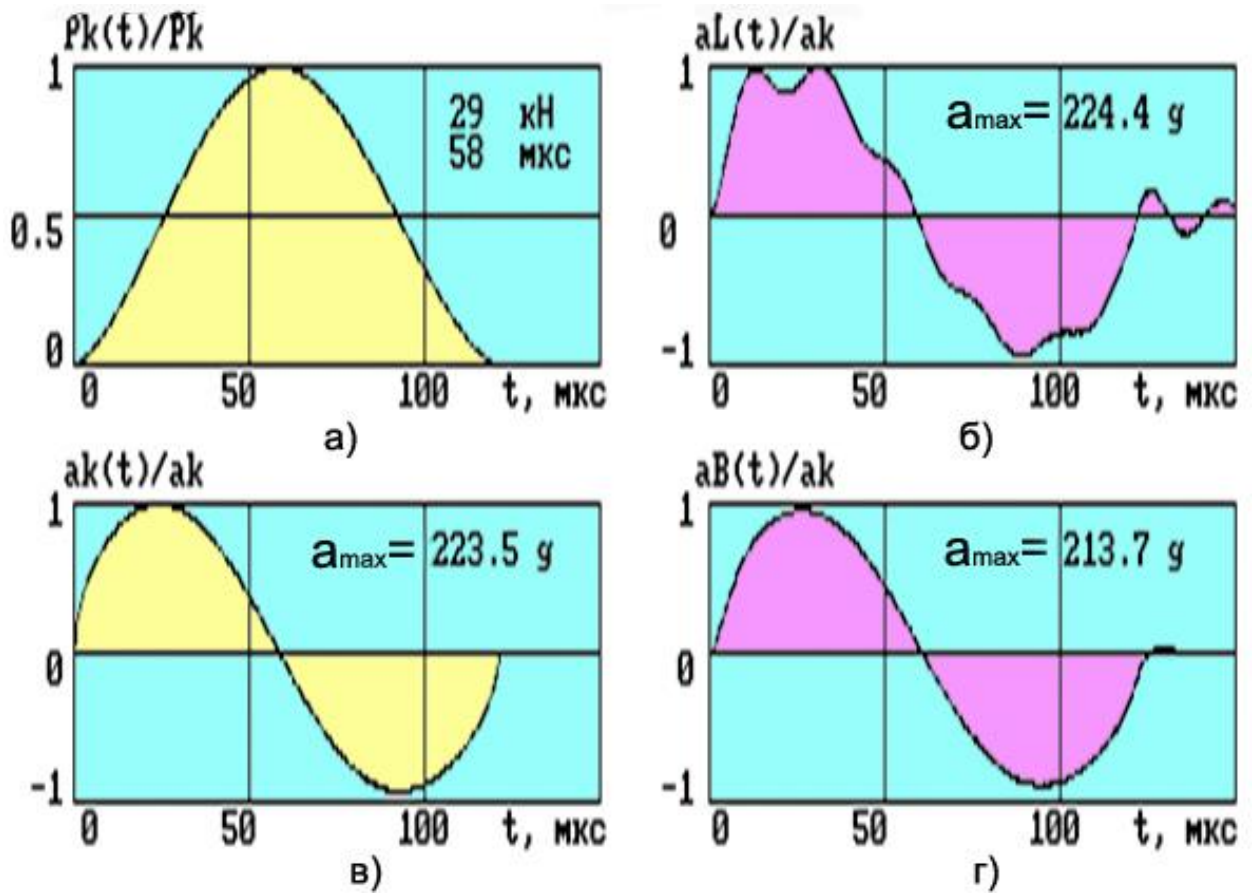
По теории Бишопа

$$y_2(0,t) = \frac{1}{\rho A v r_0} \int_0^t dt \int_0^t P(\tau) J_0\left(\frac{c}{v r_0} \sqrt{1 - \frac{c_1^2}{c^2}}(t-\tau)\right) \exp\left(-\frac{c_1}{v r_0}(t-\tau)\right) d\tau, \quad (4.11)$$

где  $c_1$  – скорость распространения волн сдвига, м/с.

С учетом сказанного, появляется возможность практического использования уравнения (4.7) для всех рассмотренных нами моделей поведения рельса (балки) путем замены последнего слагаемого выражениями: (4.10) – в случае использования модели Лява и (4.11) – в случае применения модели Бишопа.

Для получения сравнительных числовых результатов решения задачи удара с использованием различных математических моделей, на языке BASIC программа была составлена STOSS-1 и затем реализована на персональном компьютере. Пример результатов проведенных расчетов для модели в виде рельса Р65 показаны на рисунке 4.2 и в таблице 4.3, и опубликованы автором в работе [44].



а) График изменения относительной ударной нагрузки во времени.

Сравнительные графики изменения относительного ускорения в рельсе во времени б) Решение по Ляву, в) Классическое решение, г) Решение по Бишопу

Рис. 4.2 – Пример результатов расчета относительных величин контактных сил и ускорений при моделировании продольного удара по рельсу Р-65

Таблица 4.3 – Максимальные значения контактных сил и ускорений при моделировании продольного удара по рельсу Р-65 бесконечной длины

| Тип рельса                                   | Классическое решение |                                   | Решение по Бишопу |                                   | Решение по Ляву |                                   | Отношения   |             |
|----------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|-------------|-------------|
|                                              | $P_k$ , кН           | $a_k \times g$ , м/с <sup>2</sup> | $P_b$ , кН        | $a_b \times g$ , м/с <sup>2</sup> | $P_L$ , кН      | $a_L \times g$ , м/с <sup>2</sup> | $P_b / P_k$ | $a_b / a_k$ |
| Скорость удара ударяющего тела $V_0 = 1$ м/с |                      |                                   |                   |                                   |                 |                                   |             |             |
| Р-65                                         | 29                   | 223.5                             | 29.43             | 213.7                             | 29.24           | 224.4                             | 1.014       | 0.956       |
| Скорость удара ударяющего тела $V_0 = 3$ м/с |                      |                                   |                   |                                   |                 |                                   |             |             |
| Р-65                                         | 41                   | 454.79                            | 41.2              | 424.5                             | 41.1            | 460.7                             | 1.0048      | 0.933       |

Масса ударяющего тела  $M$  была принята равной 1 кг, шаг счета по времени был выбран 0.2 мкс. Этот выбор шага по времени обусловлен желанием, получить приемлемую точность расчетов. Дело заключается в том, что, например, входящая в решение по Бишопу функция Бесселя вычислялась через ее полиномиальное представление; при этом шаг счета существенно влияет на результат.

Для классического решения, как показали результаты проведенных расчетов, можно назначать шаг по времени на порядок больше и это не повлияет на качество (форму кривой, коэффициенты динамики) конечного результата.

Следует отметить, что поскольку качественные решения во времени по оценке контактных сил при ударе по различным теориям практически совпали, для дальнейших исследований автором данной работы предложено использовать лишь классическую модель.

Учитывая, что все подкрановые рельсы имеют конечную длину, теперь необходимо рассмотреть постановку и решение задачи о распространении продольных ударных волн в рельсе (балке) конечной длины. При этом, в дальнейших выкладках, будут подразумеваться расчетные схемы, подобные представленным на рисунке 4.1, в которых рельс теперь имеет конечную длину  $\ell$ .

Выполнив преобразование Лапласа, уравнение (4.3) можно представить в виде:

$$\tilde{y}_2(z, s) = B_1 \exp(\lambda z) + B_2 \exp(-\lambda z), \quad (4.12)$$

где  $s$  – параметр преобразования Лапласа,

$$\lambda = \frac{s}{c}, \quad c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ – скорость распространения продольных волн в материале}$$

рельса, м/с,

$B_1$  и  $B_2$  – константы.

Используя для граничных условий выражения (4.4) и (4.5), получим следующие решения в области изображений.

Для случая шарнирно закрепленного правого торца балки –

$$\tilde{y}_2(z, s) = \frac{\tilde{P}(s)}{EA\lambda} \frac{(\exp(\lambda z - \lambda \ell) + \exp(-\lambda z + \lambda \ell))}{\exp(\lambda \ell) - \exp(-\lambda \ell)} \quad (4.13)$$

и защемленного правого торца балки –

$$\tilde{y}_2(z, s) = \frac{\tilde{P}(s)}{EA\lambda} \frac{(\exp(\lambda z - \lambda \ell) - \exp(-\lambda z + \lambda \ell))}{\exp(\lambda \ell) + \exp(-\lambda \ell)}. \quad (4.14)$$

Остановимся детальнее на перемещении торцевого сечения, испытывающего удар, в случае шарнирно закрепленного правого торца балки:

$$\tilde{y}_2(0, s) = \frac{\tilde{P}(s)}{EA\lambda} \frac{\exp(-2\lambda \ell) + 1}{1 - \exp(-2\lambda \ell)}. \quad (4.15)$$

Представим выражение (4.15) в виде ряда по степеням функции  $\exp(-2\lambda \ell)$ :

$$\tilde{y}(0, s) = -\frac{P(s)}{\rho A c s} \left( 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \exp(-2ks \frac{\ell}{c}) \right). \quad (4.16)$$

Используя справочную таблицу преобразований работы [72], перейдем вновь к оригиналу. Тогда, после преобразований, получим следующий вид решения исходного уравнения:

$$y(0, t) = -\frac{1}{\rho A c} \left[ \int_0^t P(\tau) d\tau + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \int_{t_k}^t P(\tau) d\tau \right]. \quad (4.17)$$

Выполнив аналогичные преобразования для случая защемленного правого

торца балки, получаем решение в виде:

$$\tilde{y}(0, s) = -\frac{P(s)}{\rho A c s} \left( 1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \exp(-2ks \frac{\ell}{c}) \right), \quad (4.18)$$

оригинал которого можно записать следующим образом:

$$y(0, t) = -\frac{1}{\rho A c} \left[ \int_0^t P(\tau) d\tau + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \int_{t_k}^t P(\tau) d\tau \right]. \quad (4.19)$$

В выражениях (4.17) и (4.19)  $t_k$  означает время прихода очередной отраженной волны в начало рельса:

$$t_k = \frac{2k\ell}{c}. \quad (4.20)$$

Еще одной особенностью, которую следует учесть при рассмотрении задачи распространения упругих волн в рельсе (балке) является учет диссипации (внутреннего трения) в материале. Это можно сделать, например, используя известную теорию Е.С. Сорокина [167].

В этом случае, исходное дифференциальное уравнение (4.3) следует представить в комплексной форме:

$$\rho A \frac{\partial^2 y^*}{\partial t^2} - (u + iv) EA \frac{\partial^2 y^*}{\partial z^2} = 0, \quad (4.21)$$

где  $i$  – мнимая единица, а параметры  $u$  и  $v$  представлены следующими выражениями:

$$u = \frac{4 - \gamma^2}{4 + \gamma^2}, \quad v = \frac{4\gamma}{4 + \gamma^2}, \quad (4.22)$$

определяемыми через  $\gamma$  – коэффициент внутреннего трения, связанный с декрементом колебаний  $\delta$  достаточно простым соотношением:  $\delta = \pi\gamma$ . Более подробно о коэффициенте внутреннего трения будет сказано ниже.

Решение уравнения (4.21) в комплексной форме можно записать в следующем виде:

$$y^* = \sum_{k=1}^{\infty} D_k Y_k(z) \exp[i(\lambda_k \omega^* t + \alpha_k)], \quad (4.23)$$

где

$$\omega^* = (1 + i \frac{\gamma}{2}) \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}}},$$

или в вещественной форме:

$$y = \sum_{k=1}^{\infty} D_k Y_k(z) \exp(-\frac{\gamma}{2} p_k t) \cos(p_k t + \alpha_k), \quad (4.24)$$

где  $D_k$  и  $\alpha_k$  – константы, определяемые из начальных условий,  $\gamma$  – коэффициент внутреннего трения, а  $p_k$  – круговая частота свободных затухающих колебаний рассматриваемого рельса (балки):

$$p_k = \frac{\lambda_k c}{\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{4}}}. \quad (4.25)$$

Входящие в выражение (4.25) параметры  $\lambda_k$ , являются корнями характеристического уравнения. В частном случае, когда концы стержня свободны, выражение для  $\lambda_k$  можно представить виде:  $\lambda_k = \frac{k\pi}{\ell}$ .

Коэффициент внутреннего трения  $\gamma$  зависит от физических свойств материала и от уровня напряжений. В области малых напряжений он постепенно растет по мере роста напряжений, затем принимает практически постоянное значение [167]. На этом основании можно окончательно записать закон затухающих колебаний в следующем виде:

$$y = \sum_{k=1}^{\infty} D_k Y_k(z) \exp(-\frac{\gamma}{2} \frac{k\pi}{\ell} ct) \cos(\frac{k\pi}{\ell} ct + \alpha_k). \quad (4.26)$$

Нетрудно заметить, что учет диссипативных сил по теории Е.С. Сорокина приводит к появлению в аналитическом выражении закона колебаний экспоненциального множителя, дающего эффект затухания. В монографии [167] рассмотрены различные динамические задачи, в том числе поперечные изгибные колебания балок, а также колебания балок при действии мгновенных импульсов.

Как отмечено Е.С. Сорокиным [167, стр.122], учет внутреннего трения приводит к решениям для поперечных сил и изгибающих моментов в балках в виде сходящихся рядов.

Что касается максимального значения контактной силы при ударе, то по результатам проведенных с участием автора исследований [44], можно сделать вывод, что оно практически не зависит от учета отраженных волн и от введения экспоненциальных множителей, влияющих на затухание процесса во времени, поэтому при решении задач проектирования, где требуется назначить лишь максимальные проектные нагрузки на металлоконструкции, можно использовать наиболее простые расчетные модели, рассмотренные выше.

#### **4.4 Экспериментальное исследование удара по рельсу в лабораторных условиях**

Основными задачами экспериментальных исследований ударных вертикальных и горизонтальных нагрузок на рельс являются:

- изучение характеристик ударного процесса при определенных условиях прохождения стыков рельсов;
- определение основных параметров крана и рельсового пути, участвующих в динамическом процессе движения крана;
- выбор измерительных средств с учетом их частотных характеристик и параметров ударного процесса, о чем будет более подробно сказано в следующих разделах настоящей работы.

##### **4.4.1 Продольный эксцентричный удар по рельсу на упругом основании применительно к рельсовому пути железнодорожных кранов**

Серия лабораторных экспериментов по определению ускорений в рельсовом пути была проведена в лаборатории мостовых конструкций Института пути, строительства и сооружений (ИПСС) МИИТа. Для этого создан

полномасштабный фрагмент железнодорожного рельсового пути. Основанием служит бетонный пол, застеленный слоем щебенки. Путь сформирован из рельсов типа Р-65 по ГОСТ 8161-75 на железобетонных шпалах. В качестве соединительных элементов были использованы типовые стандартные элементы, в том числе:

- накладки двухголовые к рельсам типов Р65 и Р75 по ГОСТ 8193-73;
- болты для рельсовых стыков рельсового пути по ГОСТ 11530-93;
- гайки для болтов рельсовых стыков рельсового пути по ГОСТ 11532-93;
- подкладки раздельного скрепления железнодорожных рельсов типов Р50, Р65 и Р75 по ГОСТ 16277-93;
- шайбы пружинные путевые по ГОСТ 19115-91.

Продольные удары по торцу рельса наносились массивным грузом, укрепленным на штативе. Схема стенда для проведения эксперимента представлена на рисунке 4.3. Для измерения ускорений использовались пьезоэлектрические акселерометры высокой чувствительности типа КВ 12. На общей длине фрагмента пути, равной 5 м, датчики располагались в сечениях рельса, отстоящих от торца (по которому наносился продольный удар) на следующих расстояниях: №1 – 1.42 м, №2 – 4.42 м. Результаты обрабатывались с помощью стандартного пакета обработки сигналов (ПОС), разработанного научно-производственным предприятием «МЕРА».

На рисунке 4.4 приведены результаты измерений и частотные спектры процесса. Цифрами 1 и 2 отмечены показания датчиков №1 и №2, цифрами 3 и 4 – частотные спектры.

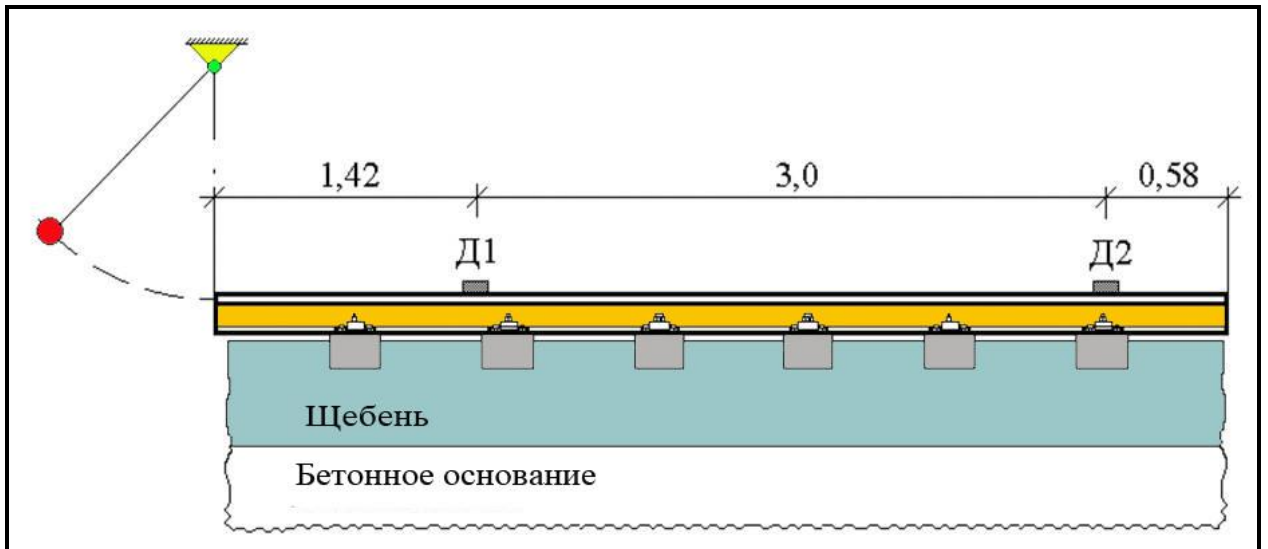


Рисунок 4.3 – Схема стенда для исследования явления продольного удара сосредоточенной массы по рельсу

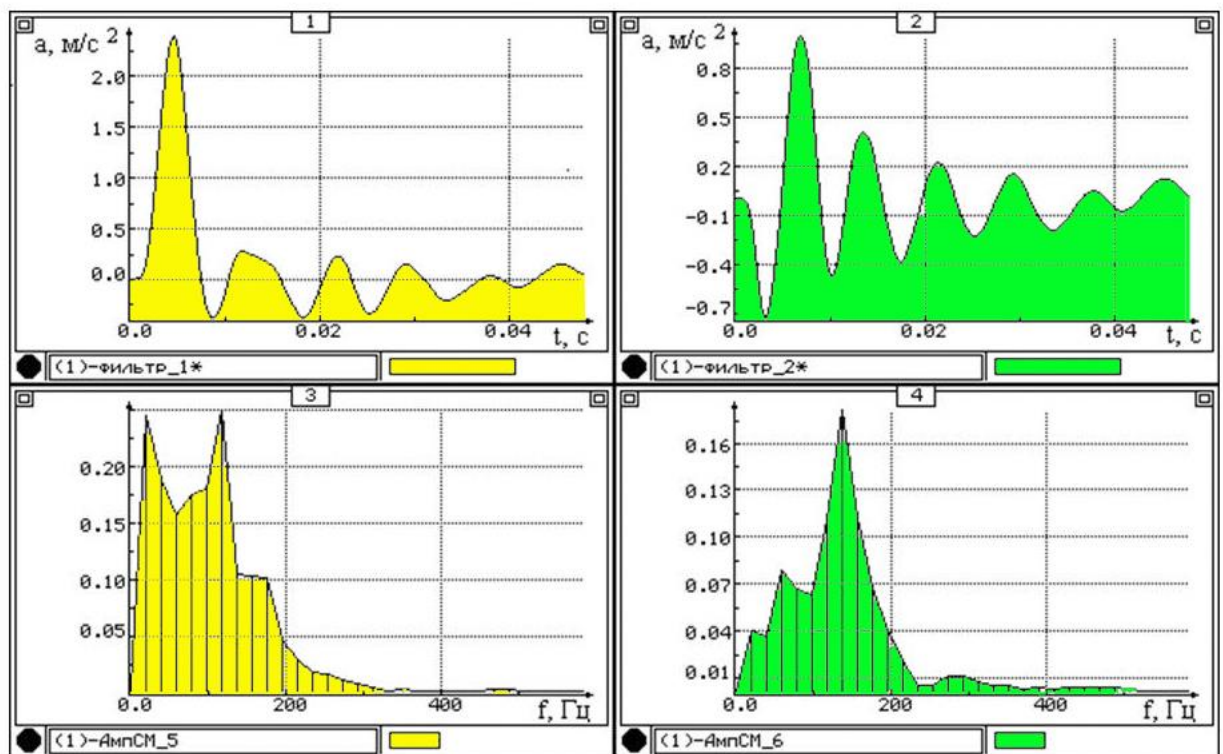


Рисунок 4.4 – Ускорения в рельсе и спектры частот при нанесении по нему продольного удара

Как видно из приведенных результатов эксперимента, низкочастотный

процесс передачи волны нагрузки по длине рельса достаточно быстро затухает. Сравнивая спектры нагружения, представленные на рисунке 4.3 – 3 и 4.3 – 4, можно сделать вывод, даже 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 из-за наличия трения подошвы рельса о шпалы, являются серьезным фильтром в передаче низкочастотных составляющих нагрузки и эффект продольного удара будет несущественен на расстоянии нескольких метров от стыка рельса. Высокочастотные составляющие спектров, находящиеся на частотах 160...180 Гц, для реальных механических систем, в силу их достаточно высокой инерционности, как правило, неопасны.

#### 4.4.2 Поперечный удар по рельсу (балке) на упругом основании применительно к рельсовому пути железнодорожных кранов

Экспериментальные поперечные удары по рельсу производились при сбросе колесной пары с высоты 60 мм (Рисунок 4.5). Методика эксперимента и обработки результатов такая же, как и в случае продольного удара.

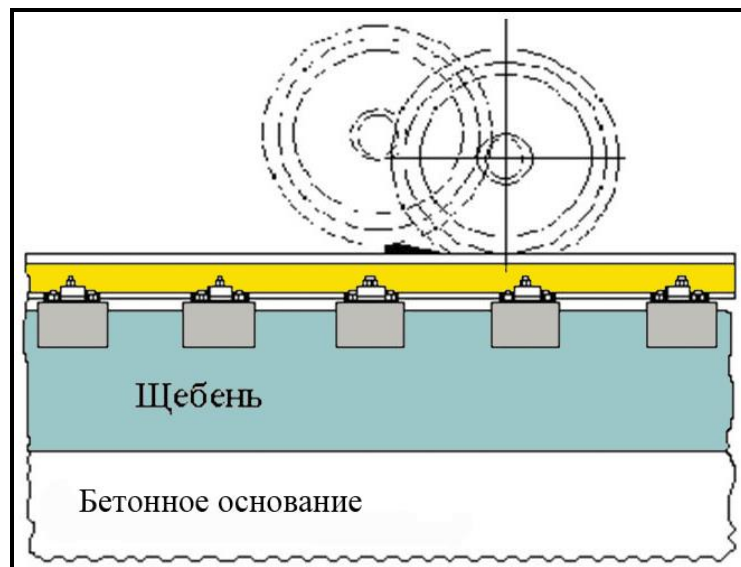


Рисунок 4.5 – Схема стенда для исследования явления поперечного удара по рельсу при сбросе колесной пары

Анализ приведенных результатов эксперимента (Рисунок 4.6), показывает, что пиковые значения амплитуд спектров ускорений каждого из двух датчиков лежат примерно в одинаковом диапазоне высоких частот (70...100 Гц). Это можно объяснить тем, что датчики ускорения были установлены симметрично к месту падения колесной пары, при этом максимальные амплитуды спектров ускорений на каждом из датчиков отличаются примерно в 2 раза.

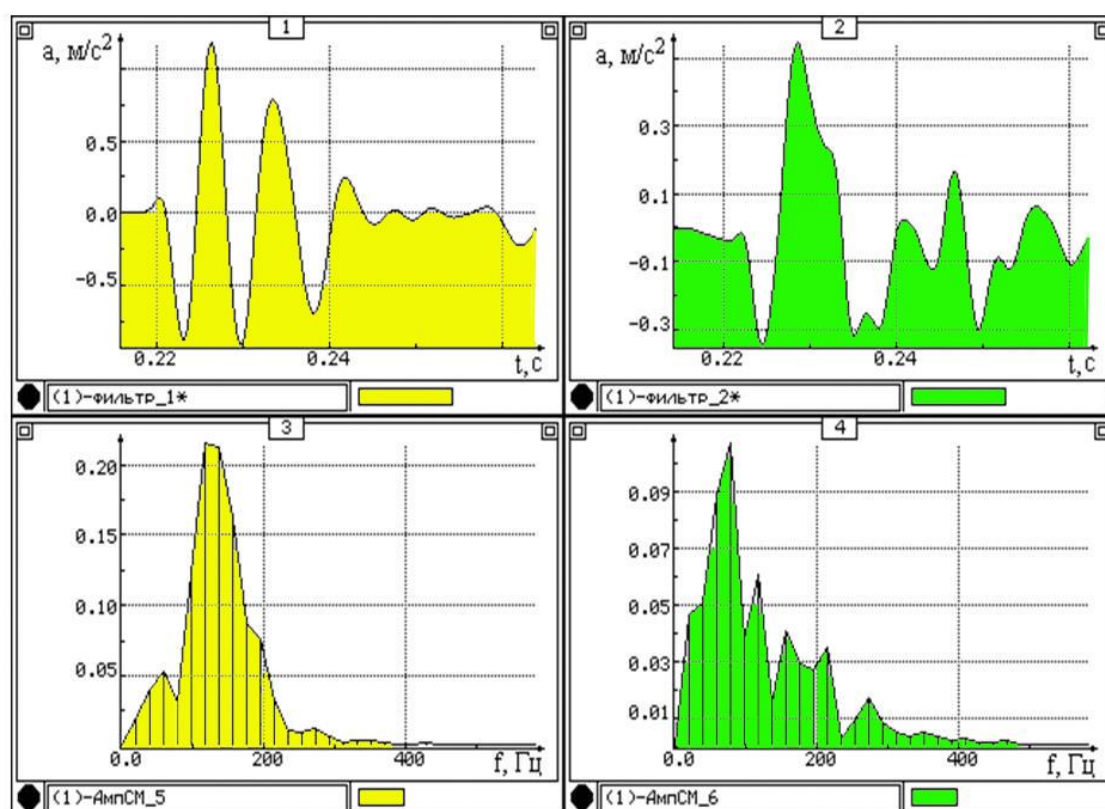


Рисунок 4.6 – Ускорения в рельсе и спектры частот при поперечном ударе при сбросе колесной пары

Из анализа результатов эксперимента (см. графики на рисунке 4.6) также видно, что низкочастотные составляющие спектров, как правило, невелики и составляют не более 20% максимальных значений полученных спектров.

#### 4.4.3 Поперечный удар по рельсу ходового колеса с дефектом на дорожке качения

На сети железных дорог страны обращается значительное число единиц подвижного состава, имеющих дефекты и повреждения на колесных парах. Инструкции ограничивают выпуск на трассу подвижного состава при наличии предельно допустимых размеров дефектов. Проблема расчета ударного взаимодействия колесных пар с рельсовым путем не потеряла своей актуальности.

На рисунке 4.7. а) представлено колесо с ползуном, на рисунке 4.7 б) – колесо с наварами. Эти дефекты образуются на поверхности катания колес при неудачном торможении, причем они оба, как правило, возникают одновременно.

Подобные повреждения встречаются и в ходовых колесах грузоподъемных кранов, когда их обслуживание и ремонт в эксплуатации оставляют «желать лучшего» (Рисунок 4.8).

В случае наvara происходит два удара: колесо как бы «натывается» на возвышение, затем с него «соскакивает». При первом ударе (для случая наvara) и при малых скоростях движения (для случая наличия ползуна) начальная скорость удара пропорциональна скорости движения. В работах *Y. Satoh* [205] отмечено, что и при наличии ползуна и при втором ударе (для случая наvara) может возникнуть ситуация, при которой колесо как бы не передает нагрузку на рельс. Это происходит на следующей предельной скорости движения  $\tilde{V}$  [205]:

$$\tilde{V} = \sqrt{gR(1 + \mu M / m)}, \quad (4.27)$$

где  $m$  – масса колеса,

$R$  – радиус колеса,

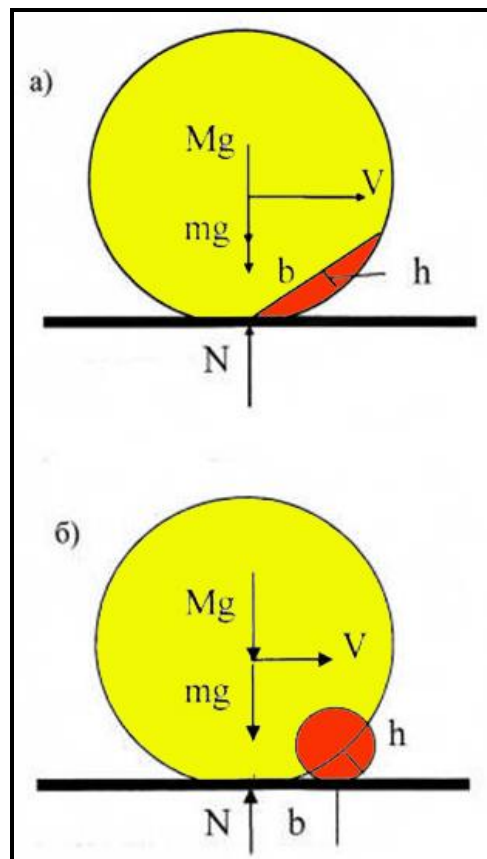
$g$  – ускорение свободного падения,

$M$  – масса полезного груза, приходящегося на одно колесо,

$\mu$  – динамический коэффициент, учитывающий вибрацию движущегося экипажа.

*Примечание:* обозначения принятые в (4.27) также соответствуют

обозначениям на приведенном ниже рисунке 4.7.



а) «ползун»; б) «навар»

Рисунок 4.7 – Колесо с повреждениями



Рисунок 4.8 – Колесо крана с изношенной ребордой, восстановленной сваркой и не отремонтированной дорожкой качения

Начальная скорость удара при наличии ползуна определяется по следующим формулам, полученным *Y. Satoh* и приведенным в его работе [205]:

$$\text{при } V \leq \tilde{V} \quad V_0 = \frac{0,75bV}{R}, \quad (4.28)$$

$$\text{при } V > \tilde{V} \quad V_0 = \frac{0,375b\tilde{V}}{RV} \sqrt{3V^2 + \tilde{V}^2}, \quad (4.29)$$

где  $b = 2\sqrt{2Rh - h^2}$  – хорда ползуна,  $h$  – глубина ползуна.

Расчеты по формулам (4.28) и (4.29) *Y. Satoh* позволили получить для задаваемых размеров высоты  $h$  и протяженности ползуна  $b$  зависимости начальной скорости удара от различных скоростей движения (Рисунок 4.9) [205].

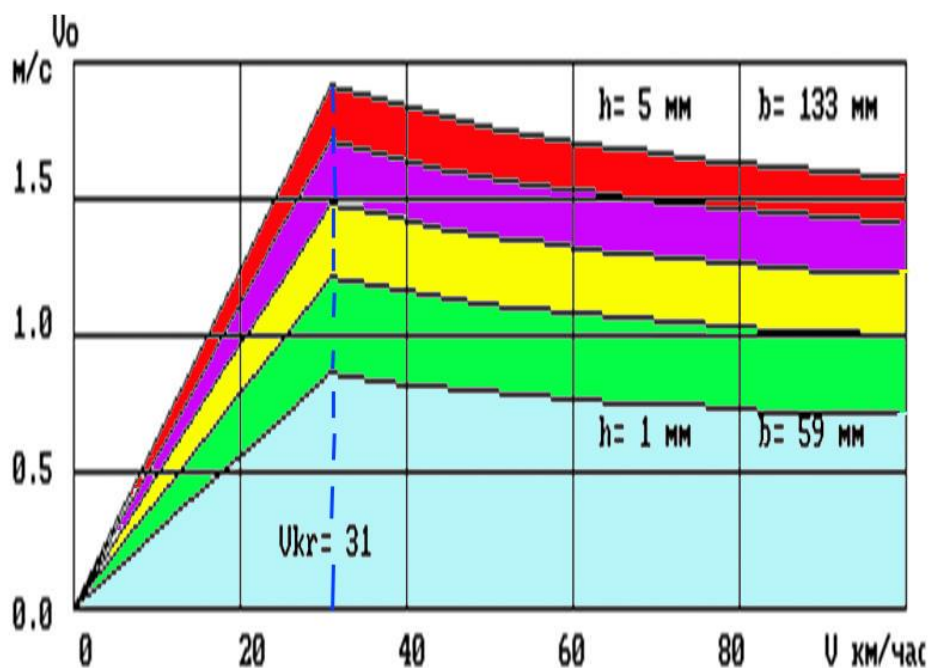


Рисунок 4.9 – Расчетные величины начальной скорости удара в зависимости от скорости движения и размеров ползуна, полученные по (4.28) и (4.29)

Анализ приведенного выше рисунка 4.7 показывает, что при наличии наvara роль хорды играет отрезок общей касательной к окружностям колеса и наvara

(при представлении этого дефекта в виде модели). Отсюда можно получить следующие зависимости:

$$b = \sqrt{2Rh - 3h^2}, \quad R_1 = \sqrt{R^2 + 2Rh - 3h^2}, \quad (4.30)$$

где  $h$  – максимальная высота наvara,

$R$  – первоначальный радиус дорожки качения колеса,

$R_1$  – увеличенный радиус колеса (за счет наvara), с которого колесо будет соскакивать при выполнении второго удара. Это произойдет через промежуток времени  $\Delta t = 2b / V$ .

Начальная скорость первого удара пропорциональна общей линейной скорости движения центра колеса:

$$V_0 = bV / R. \quad (4.31)$$

Что касается второго удара, то на него распространяется понятие предельной скорости, и в случае  $V \geq V$  можно использовать такое выражение [205]:

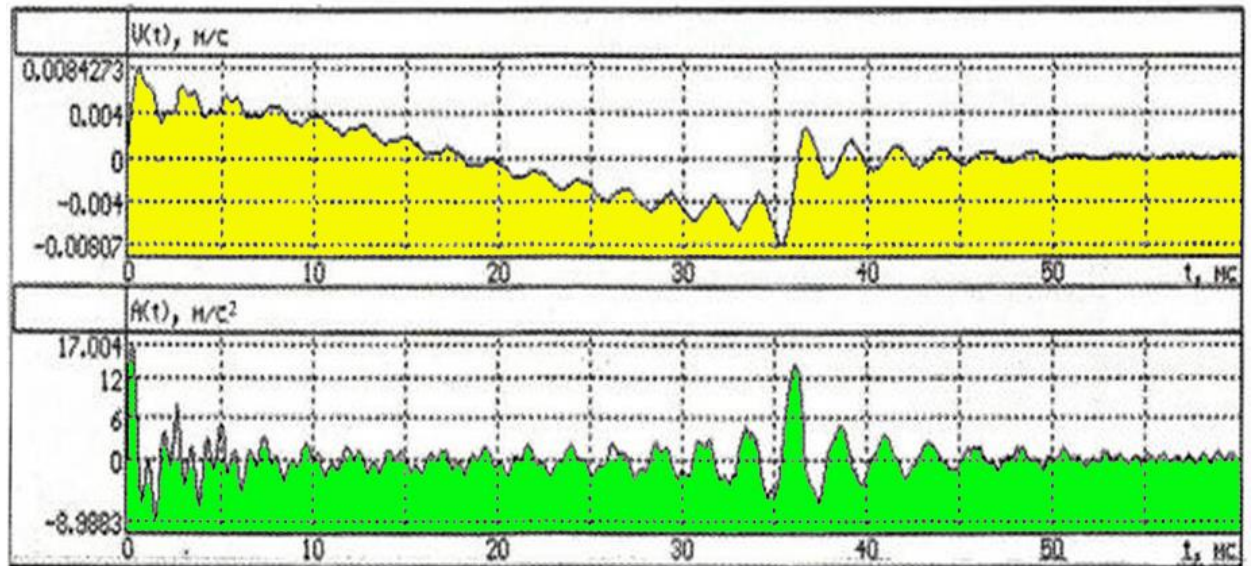
$$V_0 = \frac{b}{2R} \frac{\tilde{V}}{V} \sqrt{\tilde{V}^2 + 3V^2}. \quad (4.32)$$

Используя зависимости, приведенные в 4.3 данной работы, рассмотрим в качестве прикладной задачи определение скорости и ускорения удара по рельсовому пути при рассмотрении движения по нему колесной пары с дефектом в виде ползуна. Размеры дефекта для рассматриваемого случая примем в соответствии с размерами дефекта, который нами изучен при проведении натурного эксперимента нагружения рельса в ноябре 1998 г. в депо «Сокол» Московского метрополитена.

Ниже графически представлены результаты расчета этих кинематических параметров удара (Рисунок 4.10), проведенного с использованием комплекса «ИМРАСТ», в зависимости от времени  $t$ .

Анализ графиков рисунка 4.10 показывает, что на них можно выделить два характерных пика изменения ускорения: первый пик для  $t \approx 1...2$  мс, а второй – для  $t \approx 36...38$  мс, которые можно интерпретировать как начало и окончание прохождения по рельсу поврежденной дорожкой качения ходового колеса, при

этом амплитуда первого пика ускорения несколько выше, что можно интерпретировать «более плавным» переходом от поврежденного к неповрежденному участку дорожки качения при перемещении колеса по рельсу.



$V(t)$  – скорость удара, м/с;  $A(t)$  – ускорение удара, м/с<sup>2</sup>

Рисунок 4.10 – Изменение во времени кинематических параметров в точке удара

#### 4.4.4 Определение коэффициента внутреннего трения конструкции рельсового пути по данным эксперимента

Одной из важнейших динамических характеристик механической системы, в том числе и рельса, является коэффициент внутреннего трения  $\gamma$ , поскольку внутреннее трение уменьшает напряжения и перемещения, возникающие при действии периодических и ударных нагрузок. Существует много способов определения коэффициента внутреннего трения или эквивалентных ему других подобных характеристик [168].

Для экспериментального определения коэффициента внутреннего трения нами был использован компактный измерительный комплекс: аналого-цифровой преобразователь, вмонтированный в персональный компьютер, и пакет программ

для обработки получаемых сигналов.

Над исследуемой опорой на виброизолированном объекте (конструкции с установленным рельсом), прикреплялся датчик ускорений, и объект приводился в движение с помощью генератора колебаний или путем бросания груза массой  $M$  на конструкцию, при этом, записывались вынужденные колебания конструкции.

К записанному временному сигналу применялось дискретное преобразование Фурье и, с помощью фильтра низких частот, на спектральной кривой выделялась область, соответствующая первой собственной частоте. По известному значению первой частоты определялась динамическая жесткость опоры. Таким образом, исходная механическая система заменялась эквивалентной (с точки зрения механики) системой с одной степенью свободы.

Амплитудно-частотная характеристика такой системы (осциллятора) в безразмерных параметрах представлена на рисунке 4.11. Мерой демпфирования такой системы может служить параметр  $Q_d$ , называемый добротностью. Добротность при этом численно равна количеству колебаний, за которое их амплитуда уменьшится в « $e$ » раз.

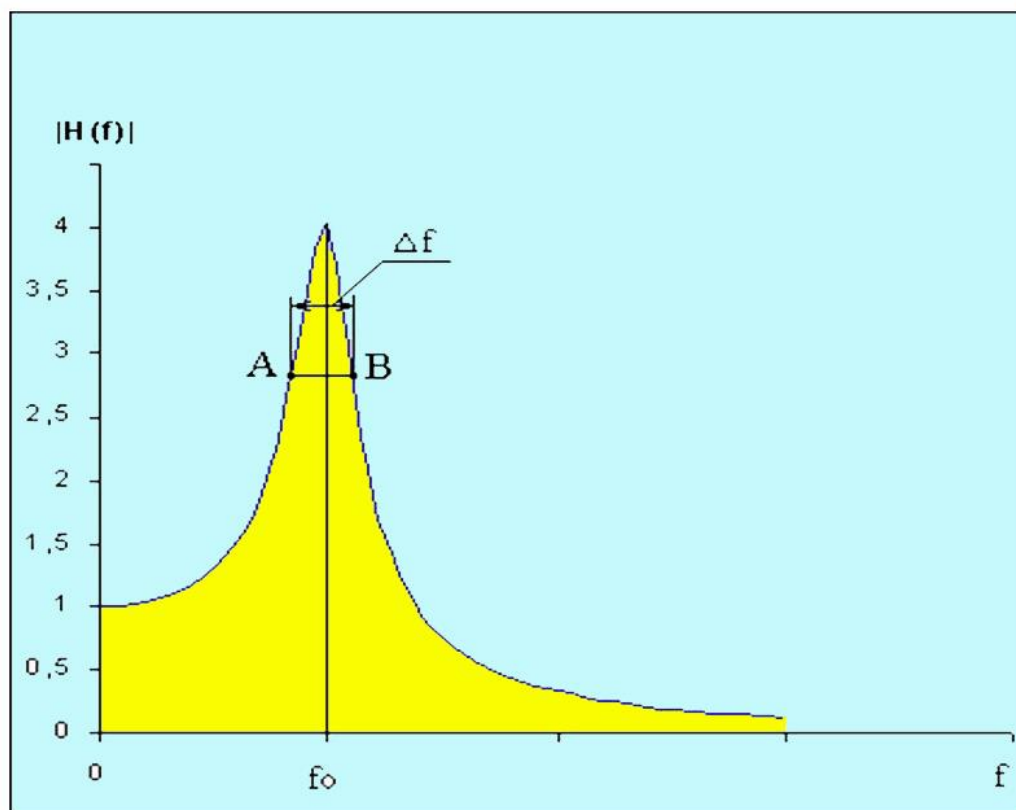
Приближенное значение добротности при проведении испытаний можно получить измерением ширины резонансной кривой на уровне, на котором энергия уменьшается в два раза. На рисунке 4.11 показаны точки А и В – это точки, в которых модуль амплитудно-частотной характеристики  $|H(f)| = 0,707|H(f_0)|$ . Если эта ширина равна  $\Delta f$ , тогда:

$$Q_d = \frac{f_0}{\Delta f}. \quad (4.33)$$

Чем больше коэффициент добротности, тем меньше демпфирование. Для совершенно недемпфированных систем  $Q_d = \infty$ , для систем с критическим демпфированием  $Q_d = 1/2$ . Например, для спектров, изображенных на рисунке 4.6, значения добротности, соответственно равны 2,16 и 1,6.

При этом, коэффициент внутреннего трения, для использования в практических расчетах, принимается обратным добротности, то есть:

$$\gamma = \frac{1}{Q_d}. \quad (4.34)$$



$f_0$  – резонансная частота

Рисунок 4.11 – Эквивалентная резонансная кривая амплитудно-частотной характеристики для определения параметра демпфирования рельса

#### 4.4.5 Измерение ускорений при ударном нагружении рельсового пути Московского метрополитена

Несмотря на то, что задача оценки нагружения рельсового пути метрополитена не имеет прямого отношения к исследованиям в области рельсовых путей грузоподъемных кранов, при медленных скоростях передвижения вагона метрополитена, ударные воздействия могут быть близки по физике явления к аналогичным ударным воздействиям на крановый рельсовый

путь, поскольку рельсовый путь метрополитена установлен на полушпалах, непосредственно вмонтированных в бетонное основание. Такая конструкция рельсового пути очень близка по характеристикам жесткости рельсовому пути, используемому для передвижения мостовых кранов при сооружении крановых рельсовых путей на подкрановых балках из железобетона.

В этой связи, было решено принять участие в экспериментах по исследованиям ударного нагружения рельсового пути, которые проводились в депо «Сокол» Московского метрополитена.

Во время данных экспериментов были проведены натурные измерения ускорений рельса при прохождении моторного вагона, имевшего одну колесную пару с предельно-допустимым ползуном, глубиной 4,5 мм, который при движении создавал ударное нагружение рельса. Для записи ускорений использовался комплекс аппаратуры, состоящий из персонального компьютера со встроенным аналого-цифровым преобразователем (АЦП).

В качестве датчиков использовались пьезоакселерометры со встроенными предусилителями. Информация с датчиков поступала на АЦП и сохранялась в памяти персонального компьютера в виде числовых файлов.

Датчики устанавливались на внутреннем скосе подошвы рельса в четырех сечениях с шагом 0,5 метра. Запись показаний датчиков велась на протяжении 5 с при шаге по времени 0,001 с. Скорость движения вагона была выбрана лишь немного выше максимальной скорости передвижения современных мостовых кранов 8,9 км/ч (то есть, 148,3 м/мин).

Замеры выполнялись в течение 4 рейсов движения вагона. При тарировке датчиков использовался стандартный вибростол марки Robotron 11 032. Тарировка измерительного тракта и аппаратуры проводилась непосредственно перед измерениями. В таблице 4.4. приведены основные характеристики объекта испытаний.

Таблица 4.4 – Основные характеристики рельсового пути при проведении эксперимента на Московском метрополитене

| Наименование        | Буквенное обозначение | Размерность | Числовое значение |
|---------------------|-----------------------|-------------|-------------------|
| Тип рельса          | P43                   | -           | -                 |
| Масса колеса        | $M$                   | кг          | 600               |
| Радиус колеса       | $R$                   | мм          | 400               |
| Глубина ползуна     | $H$                   | мм          | 4.5               |
| Хорда ползуна       | $B$                   | мм          | 120               |
| Нагрузка на колесо  | $G$                   | кг          | 7000              |
| Жесткость основания | $U$                   | МПа         | 230               |

На рисунке 4.12 в качестве примера приведены графики ускорений, записанные при выполнении рейса № 4, а на рисунке 4.13 – пересчитанные графики ускорений для двух точек рельса, соответственно отстоящих от места удара на 0,2 и 0,3 м.

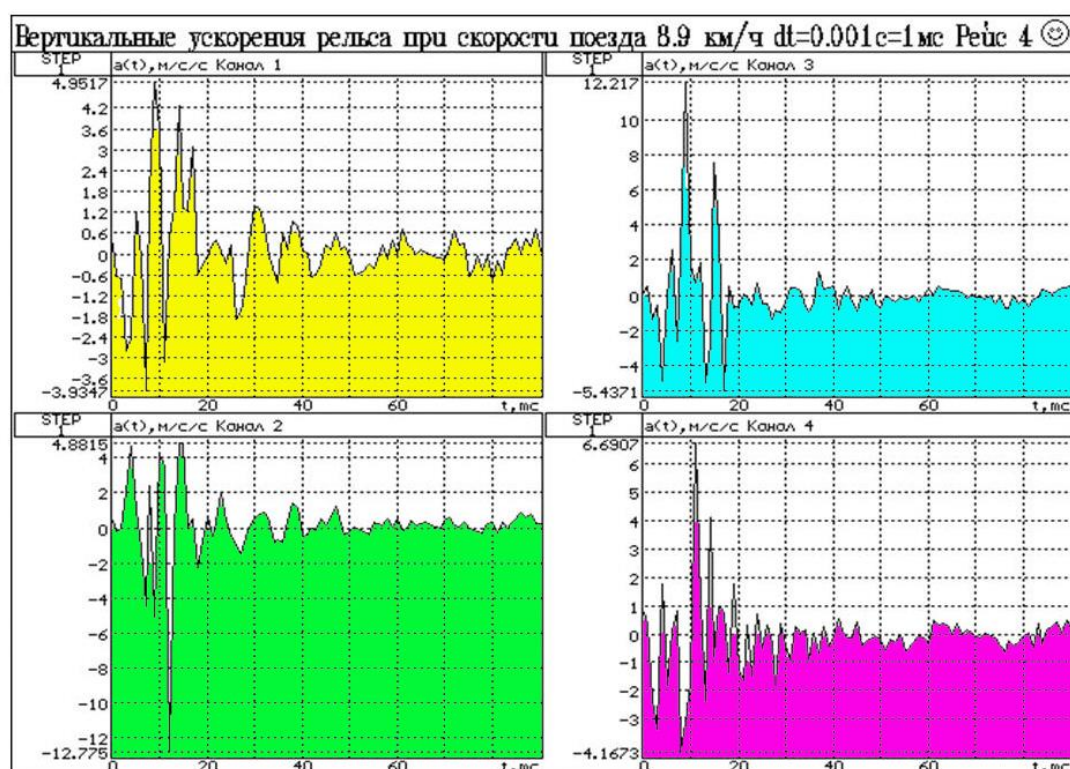


Рисунок 4.12 – Акселерограммы, полученные в ходе эксперимента в депо «Сокол» Московского метрополитена

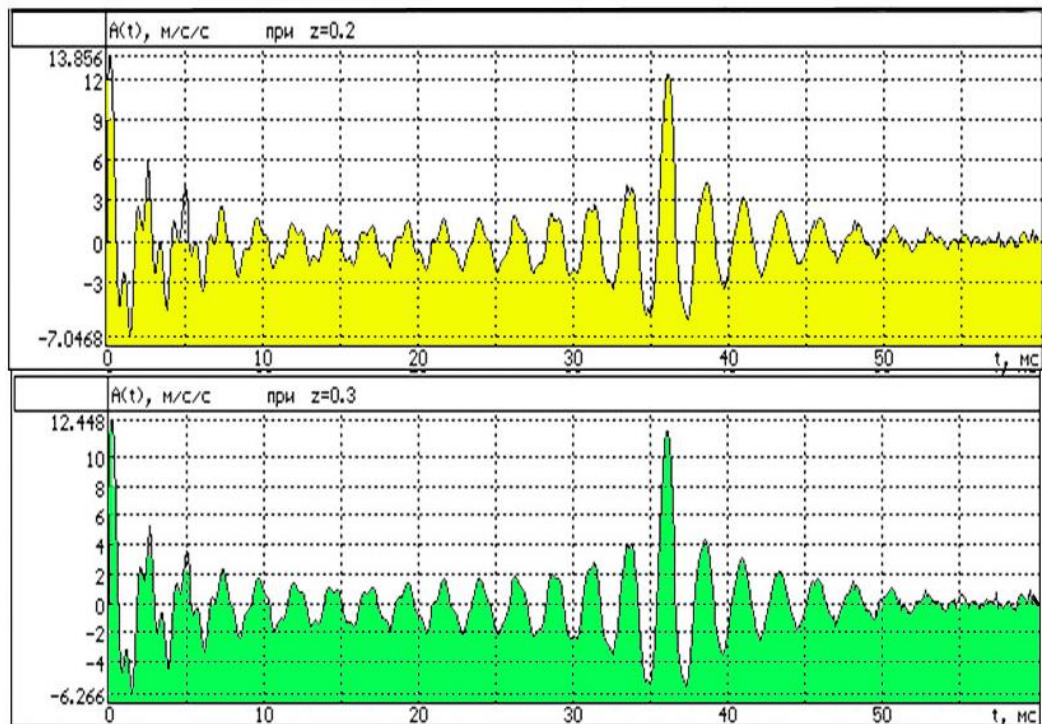


Рисунок 4.13 – Расчетные изменения ускорения удара в двух точках рельса в зависимости от времени (здесь  $z$  – продольная координата поперечного сечения рельса, м)

Сравнение графиков на рисунке 4.12 показывает, что их форма практически идентична во времени и отличие состоит лишь в уменьшении амплитуды ускорения, зафиксированной вторым датчиком. Это можно объяснить небольшим расстоянием между двумя датчиками и невысоким демпфированием возмущающего сигнала самим рельсом в вертикальной плоскости.

В целом же приведенные графики на рисунках 4.12 и 4.13 по максимальным амплитудам позволяют оценить коэффициенты динамичности на скорости несколько превышающей максимальную скорость движения грузоподъемных кранов и приближенно установить, что указанный коэффициент можно в подобных случаях принимать равным 1,2 [43].

Следует отметить, что данный вывод хорошо согласуется с нормативами, принятыми при проектировании крановых рельсовых путей [159].

#### **4.5 Обоснование нагрузок от кранов на надземный рельсовый путь и строительные конструкции**

Как было отмечено выше, до последнего времени в Российской Федерации не существовало государственного стандарта на надземные рельсовые крановые пути. С учетом изложенных выше обзоров проведенных исследований, а также действующих нормативных документов в подотрасли краностроения, обозначим основные положения, которые могут быть положены в основу определения нагрузок от грузоподъемных кранов при разработке проекта указанного стандарта.

Нагрузки от грузоподъемных кранов на надземный рельсовый путь и строительные конструкции обоснуем с учетом данных, приведенных в паспортах грузоподъемных кранов, результатов экспериментов, проведенных при выполнении данной работы, а также в зависимости от их групп классификации (режимов работы), устанавливаемых [106], от вида привода и от способа подвеса груза с учетом указаний [159].

При этом в данном разделе работы для обоснования величин проектных нагрузок, под «строительными конструкциями» будем понимать две подкрановые балки, на которых уложен один надземный рельсовый путь мостового крана, или все конструкции, к которым подвешены рельсовые нити подвесного крана (например, две балки – при однопролетном, три балки – при двухпролетном подвесном кране и т.п.), или все конструкции, к которым прикреплен монорельсовый путь.

Нормативное значение горизонтальной нагрузки, направленной вдоль надземного рельсового пути и вызываемой торможением крана, будем принимать равным 0,1 [173] полного нормативного значения вертикальной нагрузки на колеса рассматриваемой стороны крана, а горизонтальной нагрузки, направленной поперек надземного рельсового пути и вызываемой торможением грузовой тележки крана, в соответствии с ранее принятыми рекомендациями в краностроении [173] и рекомендациями [159]:

- для кранов с гибким подвесом груза – 0,05 суммы грузоподъемности крана и веса тележки;

- для кранов с жестким подвесом груза – 0,1 суммы грузоподъемности крана и веса тележки.

Эту нагрузку будем учитывать при проверке расчетов поперечных рам зданий и балок надземных рельсовых путей, принимая при этом, что нагрузка передается на одну сторону (балку) рельсового кранового пути, распределяется поровну между всеми опирающимися на нее колесами крана и может быть направлена как внутрь, так и наружу рассматриваемого пролета.

Нормативное значение горизонтальной нагрузки, направленной поперек надземного рельсового пути и вызываемой перекосами ходовых колес и металлоконструкций мостовых электрических кранов, а также неровностями надземного рельсового пути, для каждого ходового колеса крана примем равным 0,2 полного значения вертикальной нагрузки на колесо, указанного в паспорте крана, согласно результатам исследований [173].

Указанную нагрузку будем учитывать только при расчете прочности и устойчивости балок крановых рельсовых путей и их креплений к колоннам в зданиях с кранами групп классификации (режимов работы) А7 и А8 по [122], принимая при этом, что нагрузка передается на балку надземного рельсового пути от всех колес одной стороны крана и может быть направлена как внутрь, так и наружу рассматриваемого пролета здания.

Все горизонтальные нагрузки от торможения, перекосов и неровностей надземного рельсового пути будем считать приложенными в месте контакта ходовых колес крана с рельсом.

Коэффициент надежности по нагрузке для нагрузок от кранов будем принимать по аналогии с рекомендациями [173] равным  $\gamma_f = 1,2$  для всех групп классификации (режимов работы).

Для учета местного динамического воздействия сосредоточенной вертикальной нагрузки от одного колеса крана, полное паспортное значение этой

нагрузки будем умножать при расчете прочности строительных конструкций надземного рельсового пути на дополнительный коэффициент, равный 1,2; назначаемый согласно результатам проведенных экспериментов при выполнении данной диссертационной работы, что не противоречит рекомендациям [159].

При расчете прочности и устойчивости балок надземного рельсового пути и их креплений к несущим строительным конструкциям расчетные значения вертикальных нагрузок от кранов будем также умножать на коэффициент динамичности, равный 1,2; независимо от шага колонн, а при расчете конструкций на выносливость, проверке прогибов подкрановых балок надземного рельсового пути и смещений колонн, в том числе, при учете местного действия сосредоточенной вертикальной нагрузки от одного колеса крана, коэффициент динамичности учитывать не будем.

Вертикальные нагрузки при расчете прочности и устойчивости подкрановых балок или других строительных конструкций надземного рельсового пути будем учитывать не более чем от двух наиболее неблагоприятных по воздействию мостовых или подвесных кранов, а вертикальные нагрузки при расчете прочности и устойчивости рам, колонн, фундаментов, а также оснований в зданиях с мостовыми кранами в нескольких пролетах (в каждом пролете на одном ярусе) будем принимать на каждом пути не более чем от двух наиболее неблагоприятных по воздействию кранов. Если же необходимо учесть совмещения в одном створе кранов разных пролетов, то не более чем от четырех наиболее неблагоприятных по воздействию кранов.

Вертикальные и горизонтальные нагрузки при расчете прочности и устойчивости рам, колонн, стропильных и подстропильных конструкций, фундаментов, а также оснований зданий будем учитывать в соответствии с указаниями [159].

При определении вертикальных и горизонтальных прогибов подкрановых балок надземного рельсового пути, нагрузку будем учитывать от одного наиболее неблагоприятного по воздействию крана, а при работе на одних строительных конструкциях двух кранов - нагрузки от них будем умножать на коэффициент

сочетаний:

$\Psi_l = 0,85$  – для групп классификаций (режимов работы) кранов А1–А6;

$\Psi_l = 0,95$  – для групп классификаций (режимов работы) кранов А7, А8.

При работе на одних строительных конструкциях четырех кранов нагрузки от них необходимо умножать на коэффициент сочетаний:

$\Psi_l = 0,7$  – для групп классификаций (режимов работы) кранов А1–А6;

$\Psi_l = 0,8$  – для групп классификаций (режимов работы) кранов А7, А8.

При учете в расчете одного крана вертикальные и горизонтальные нагрузки от него будем принимать без снижения.

Нормативное значение горизонтальной нагрузки  $F$ , кН, направленной вдоль надземного рельсового пути и вызываемой наездом крана на тупиковый упор, будем определять с учетом указаний [159] по формуле:

$$F = \frac{mv^2}{f}, \quad (4.35)$$

где  $v$  – скорость передвижения крана в момент удара, принимаемая равной половине номинальной, м/с,

$f$  – наибольшая возможная осадка буфера, принимаемая равной 0,1 м для кранов с гибким подвесом груза грузоподъемностью не более 50 т групп режимов работы А1-А7 по [106] и 0,2 м – в остальных случаях,

$m$  – приведенная масса крана, определяемая по формуле:

$$m = \frac{m_b}{2} + (m_c + km_q) \frac{l - l_1}{l}, \quad (4.36)$$

где  $m_b$  – масса моста крана, т,

$m_c$  – масса тележки, т,

$m_q$  – грузоподъемность крана, т,

$k$  – коэффициент;  $k = 0$  – для кранов с гибким подвесом;  $k = 1$  – для кранов с жестким подвесом груза,

$l$  – пролет крана, м,

$l_1$  – приближение грузовой тележки крана, м.

Расчетное значение рассматриваемой нагрузки с учетом коэффициента надежности по нагрузке  $\gamma_f$ , будем принимать не более предельных значений, указанных в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Предельные значения расчетных нагрузок, принимаемые для различных типов грузоподъемных кранов

| Типы мостовых кранов                                                                                                    | Предельные значения нагрузок $F$ , кН |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Подвесные (ручные и электрические) и мостовые опорные ручные                                                            | 10                                    |
| Электрические мостовые опорные общего назначения групп режимов работы А1-А3 по ИСО 4301                                 | 50                                    |
| Электрические мостовые опорные общего назначения и специальные групп режимов работы А4–А7 по ИСО 4301, а также литейные | 150                                   |
| Специальные электрические мостовые группы режима работы А8 по ИСО 4301 с гибким подвесом груза                          | 250                                   |
| Специальные электрические мостовые группы режима работы А8 по ИСО 4301 с жестким подвесом груза                         | 500                                   |

Изложенные выше обоснования были использованы автором при подготовке проекта ГОСТ Р по надземным рельсовым крановым путям. Итоговая таблица 4.6 выбора рельса по нагрузке из проекта указанного ГОСТ Р приведена ниже.

Таблица 4.6 – 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                                          |

Данный проект ГОСТ Р, после обсуждения специалистами и устранения замечаний, должен быть утвержден Ростехрегулированием и опубликован в ближайшее время.

## 4.6 Выводы по разделу 4

4.6.1. На основе выполненного обзора отечественных и зарубежных публикаций даны рекомендации по выбору типов рельсов для рельсового кранового пути, а также рекомендаций нормативного документа [159], обеспечивающих повышение показателей безопасности эксплуатации грузоподъемных кранов.

4.6.2. На основе анализа различных моделей распространения ударных волн в рельсах и подкрановых балках установлена универсальность применения классической модели.

4.6.3. В результате проведенных лабораторных и натурных испытаний влияния воздействия ударной нагрузки на рельс получены необходимые коэффициенты динамичности воздействия от дефектных ходовых колес.

4.6.4. Подтверждена оценка величины коэффициента демпфирования

конструкции рельсового пути, приведенная в [35].

4.6.5. Предложены изменения и дополнения к методике выбора рельсов грузоподъемного мостового крана на рельсовом пути, которые вошли в проект 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.

## 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).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбрехт, В.Г. Бесстыковой путь / В.Г. Альбрехт, Н.П. Виногоров и др. / Под ред. Альбрехта В.Г. и Когана А.Я. – М. – Транспорт. – 2000. – 408 с.
2. Анисимов, П.С. Взаимодействие колеса с ползуном и рельса [Текст] / П.С. Анисимов // Вестник ВНИИЖТ. – 1963. – №1. – С. 42-47.
3. Ахметзянов, М.Х. Развитие поляризационно-оптических методов и их применение для анализа напряженного состояния элементов транспортной техники [Текст] / М.Х. Ахметзянов // Тезисы доклада на научно-техн. конф. “Проблемы железнодорожного транспорта и транспортного строительства Сибири”. – Новосибирск. – СГУПС. – 1997. – С. 166-167.
4. Ахметзянов, М.Х. Исследование напряженного состояния вагонного колеса и рельса [Текст] / М.Х. Ахметзянов, В.М. Тихомиров, А.П. Шабанов // Экспериментальные и расчетные методы строительной механики. Сб. науч. тр. – Новосибирск. – СГАПС. – 1997. – С. 11-18.
5. Балашов, В.П. Испытания мостового крана 12,5 т, пролетом 23 м / В.П. Балашов, Б.М. Розеншейн, И.М. Щербакова // В кн.: Новые конструкции и типизация кранового оборудования. – М. – 1962. – С. 44 - 64.
6. Барштейн, М.Ф. Исследование поперечных сил, возникающих при движении мостового крана / М.Ф. Барштейн, А.Н. Зубков. // В кн.: Динамика сооружений. – М. – 1968. – С. 4 - 31.
7. Баурова, Н.И. Методы неразрушающего контроля при диагностировании металлоконструкций [Текст] / Н.И. Баурова // Механизация строительства. – 2009. – № 12. – С. 21-23.
8. Баурова, Н.И. Визуализация методов оценки технического состояния машин и строительных конструкций [Текст] / Н.И. Баурова, В.А. Зорин // Механизация строительства. – 2011. – № 5. – С. 15-16.
9. Белоцерковский, П.М. Высокочастотные вертикальные колебания рельса под действием подвижной гармонической силы [Текст] / П.М. Белоцерковский // Известия РАН. Механика твердого тела. – М. – 1995. – №3. – С. 197 - 206.
10. Березин, В.Н. Состояние подкрановых рельсов / В.Н. Березин, А.С. Липатов //

- В кн.: Повышение прочности и долговечности крановых ходовых колес. – М. – 1981. – С. 10 - 12.
11. Бирбраер, А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – СПб. – Наука. – 1998. – 255 с.
  12. Бирюков, И.В. Механическая часть тягового подвижного состава / И.В. Бирюков, А.Н. Савоськин, Г.П. Бурчак // Уч. для студ. вузов жел.дор. тр-та.– М. – Транспорт. – 1992. – 440 с.
  13. Блох, М.В. Поперечный удар по рельсу [Текст] / М.В. Блох. // Вестник ВНИИЖТа. – 1968. – № 9. – С. 16 - 20.
  14. Блох, М.В. Удар в системах с распределенными параметрами / М.В. Блох // Исследования по теории сооружений. – М. – Стройиздат. – 1965. – С. 35 - 66.
  15. Болотин, В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В.В. Болотин. – М. – Машиностроение. – 1984. – 312 с.
  16. Брауде, В.И. Надежность подъемно-транспортных машин / В.И. Брауде, Л.Н. Семенов. – Л. – Машиностроение. – 1986. – 186 с.
  17. Бурчак, Г.П. Определение инерционных и диссипативных характеристик пути из опыта на вынужденные колебания [Текст] / Г.П. Бурчак, М.В. Вольнов // Механика наземного транспорта. – Киев. – Наукова думка. – 1977. – С. 75 - 79.
  18. Бурчак, Г.П. Колебания балки на упругом основании с переменным по длине коэффициентом постели от подвижной нагрузки [Текст] / Г.П. Бурчак, А.В. Бузаев // Вопросы механики в применении к железнодорожному транспорту и строительству. Межвуз. сб. вып. 643. – М. – МИИТ. – 1979. – С. 42 - 50.
  19. Бурчак, Г.П. Определение параметров дискретной модели пути на основе идентификации ее частотной характеристики прогиба с решением для бесконечной балки [Текст] / Г.П. Бурчак // Исследование динамики транспортных и строительных конструкций. Межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 720. – М. – МИИТ. – 1983. – С. 10 - 18.
  20. Васильев, Н.В. Магнитопорошковый контроль / Н.В. Васильев, Г.А. Бигус, Н.А. Быстрова, В.В. Котельников // Учебное пособие для предварительной подготовки по неразрушающему контролю. – М. – Сертинк. – 2007. – 92 с.

21. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. – Высш. шк. – 1998. – 576 с.
22. Вериго, М.Ф. К вопросу о процессах взаимодействия необрессоренных масс и пути / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – М. – Вестник ВНИИЖТа. – 1969. – №6. – С. 56 - 58.
23. Вериго, М.Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – М. – Транспорт. – 1986. – 559 с.
24. Вериго, М.Ф. Исследование работы пути с рельсами, пораженными дефектами [Текст] / М.Ф. Вериго, М.В. Алексеев // Тр. НИИЖТ. – Вып. 96. – 1970. – С. 189 - 198.
25. Вершинский, А.В. Расчет крановых металлоконструкций методом конечных элементов [Текст] / А.В. Вершинский, А.А. Берадзе // Расчет и конструирование подъемно-транспортных средств. – Тула. – ТулПИ. – 1988. – С. 5 - 12.
26. Гарг, В.К. Динамика подвижного состава / В.К. Гарг, Р.В. Дуккипати / Пер. с англ. / Под ред. Н.А. Панькина. – М. – Транспорт. – 1988. – 391 с.
27. Горицкий, В.М. Диагностика металлов / В.М. Горицкий. – М. – Металлургиздат. – 2004. – 408 с.
28. Горынин, А.Д. Методика анализа риска отказа металлоконструкции пролетного строения мостового крана на базе имитационного моделирования процесса эксплуатации [Текст] / А.Д. Горынин, В.Ю. Анцев, А.С. Толоконников // Механизация строительства. – М. – 2015. – № 8. – С. 9 - 10.
29. ГОСТ 24741-81. Узел крепления крановых рельсов к стальным подкрановым балкам. Технические условия / Госстандарт. – М. – 1981. – 6 с.
30. ГОСТ 25546-82. Краны грузоподъемные. Режимы работы / Госстандарт. – М. – 1993. – 5 с.
31. ГОСТ 30546.1-98. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск. – 1999. – 20 с.
32. ГОСТ 28609-90. Краны грузоподъемные. Основные положения расчета /

- Госстандарт. – М. – 1989. – 5 с.
33. ГОСТ 19281-89. Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия / Госстандарт. – М. – 1989. – 14 с.
  34. ГОСТ 27584-88. Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия / Госстандарт. – М. – 1988. – 16 с.
  35. ГОСТ 30546.1-98. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск. – 1998. – 14 с.
  36. ГОСТ Р 51901.13-2005 (IEC 61025:1990) Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей / Стандартиформ. – М. – 2005. – 17 с.
  37. ГОСТ 3569-74. Колеса крановые. – Группа Г86 / Изменение №2 ИУС Госстандарта России. – №5. – 1981. – С. 1 - 2.
  38. ГОСТ 8161-75. Рельсы железнодорожные типа Р65. Конструкция и размеры / Издательство стандартов. – М. – 1975. – 5 с.
  39. ГОСТ 6627-74. Крюки однорogie. Заготовки / Издательство стандартов. – М. – 1993. – 8 с.
  40. Гражданкин, А.И. Основные показатели риска аварии в терминах теории вероятностей [Текст] / А.И. Гражданкин, Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин // Безопасность труда в промышленности. – М. – 2002. – №7. – С. 35 - 39.
  41. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. – Мир. – 1989. – 510 с.
  42. Дмитриук, Г.Н. Надежность механических систем / Г.Н. Дмитриук, И.Б. Пястик. – М. – Машиностроение. – 1966. – 183 с.
  43. Емельянова, Г.А. Экспериментальное исследование ускорений в рельсовом пути при продольных и поперечных ударах [Текст] / Г.А. Емельянова, А.В. Кузнецов, А.Ю. Титов // Вестник МИИТа. – М. – МИИТ. – 2000. – №3. – С. 72 - 76.
  44. Емельянова, Г.А. Экспериментально-теоретическое исследование динамики

- балки на упругом основании: автореф. диссертации на соискание ученой степени к.т.н.:05.23.17 / Г.А. Емельянова. – М. – МИИТ. – 2001. – 24 с.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Емельянова, Г.А. Об оценке погрешности установки ходовых колес мостовых кранов [Текст] / Г.А. Емельянова // Ремонт восстановление модернизация. – М. – 2009. – №4. – С. 28 - 32.
49. 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.
50. 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.
51. Емельянова, Г.А. О погрешности установки крановых ходовых колес [Текст] / Г.А. Емельянова // Сборник МАНЭБ. – В. Новгород. – 2011. – С. 213 - 222.
52. 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.

53. 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.
54. 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.
55. Емельянова, Г.А. «Вписаться» в отклонения [Текст] / Г.А. Емельянова // Технадзор. – Екатеринбург. – 2013. – № 12. – С. 64 - 66.
56. 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.
57. 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.
58. 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.
59. 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.
60. 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.

61. Зарецкий, А.А. Расчетные методы подтверждения безопасности грузоподъемных кранов по международным стандартам / А.А. Зарецкий // Учебно-справочное пособие. – Екатеринбург. – 2009. – 283 с.
62. Зеленев, И.Б. О технических требованиях к конструкции и особенностях диагностирования крановых рельсовых путей / И.Б. Зеленев, А.С. Липатов // Учебный курс подготовки по промышленной безопасности. Свидетельство об официальной регистрации базы данных № 2006620131.
63. Иванченко, И.И. К расчету стержневой системы методом жестких конечных элементов на неустановившиеся воздействия [Текст] / И.И. Иванченко // Исследование динамики транспортных и строительных конструкций / Межвузовский сб. науч. тр. – Вып. 776. – М. – МИИТ. – 1986. – С. 43 - 52.
64. Исаев, В.И. Продольный удар по стержням Лява и Бишопа [Текст] / В.И. Исаев // Доклады Академии наук Украины. – 1992. – №11. – С. 15 - 18.
65. Казак, С.А. Перекосы мостового крана / С.А. Казак, В.С. Головин, В.А. Голошейкин // В кн.: Грузоподъемные краны. – Свердловск. – 1976. – С. 53 - 57.
66. Кобзев, Р.А. Строительная механика и металлоконструкции подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин / Р.А. Кобзев, А.В. Вершинский, А.П. Кобзев. – Саратов. – СГТУ. – 2004. – 219 с.
67. Ковальский, В.Ф. Экспериментальная оценка режимов работы приводов железнодорожно-строительной машины-автомата ПМА-1 [Текст] / В.Ф. Ковальский, В.А. Дубровин, Д.В. Васильев // Механизация строительства. – 2007. – № 11. – С. 8 - 13.
68. Коган, А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А.Я. Коган. – М. – Транспорт. – 1997. – 326 с.
69. Коган, А.Я. Расчет воздействия на путь колесной пары с ползуном [Текст] / А.Я. Коган, А.А. Верхотин // Исследования возможности повышения скоростей движения поездов. Сб. науч. тр. / Под. ред. В.М. Богданова. – М. – ВНИИЖТ. – 1984. – С. 31 - 37.
70. Коновалов, Л.В. Нагруженность, усталость, надежность деталей металлургических машин / Л.В. Коновалов. – М. – Машиностроение. – 1981. –

280 с.

71. Концевой, Е.М. Ремонт крановых металлоконструкций / Е.М. Концевой, Б.М. Розеншейн. – М. – Машиностроение. – 1979. – 206 с.
72. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – Издание 4-е. – М. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. –1977. – 832 с.
73. Короткий, А.А. Количественная оценка безопасности системы «кран – подкрановый путь» [Текст] / А.А. Короткий, А.С. Липатов, и др. // Безопасность труда в промышленности. – 1996. – № 10. – С. 27 - 31.
74. Короткий, А.А. Оценка безопасной эксплуатации системы «кран – рельсовый путь» параметрами риска [Текст] / А.А. Короткий, Д.Н. Симонов, В.С. Котельников, А.С. Липатов // Безопасность труда в промышленности. – 1997. – №3. – С. 25 - 30.
75. Кудрявцев, Н.Н. Динамика движения колеса с ползуном [Текст] / Н.Н. Кудрявцев // Вестник ВНИИЖТ. – 1960. – №2. – С. 30 - 34.
76. Кузнецов, А.В. Динамическое взаимодействие колеса и рельса [Текст] / А.В. Кузнецов, В.Б. Мещеряков // Тезисы доклада на научно-техн. конф. «Проблемы железнодорожного транспорта и транспортного строительства Сибири». – Новосибирск. – СГУПС. – 1997. – С. 105 - 106.
77. Кузнецов, А.В. Динамика балки на упругом основании при поперечном ударе массивного тела [Текст] / А.В. Кузнецов // Вестник МИИТа. – вып. 2. – М. – МИИТ – 1999. – С. 120 - 126.
78. Кузнецов, А.В. К определению жесткости рельса на кручение [Текст] / А.В. Кузнецов // Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ).–1999. – 6 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 16.11.99. № 6265 – ж.д. 99.
79. Кузнецов, А.В. К определению начальной скорости удара колеса с ползуном по рельсу [Текст] / А.В. Кузнецов // Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ). – 1999. – 6 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 16.11.99. № 6266 – ж.д. 99.
80. Курбацкий, Е.Н. Воздействие подвижного состава на продольные балки железнодорожных мостов [Текст] / Е.Н. Курбацкий // Вопросы механики на

- транспорте и в строительстве. – Труды МИИТа. – Вып. 476. – 1976. – С. 57 - 63.
81. Курбацкий, Е.Н. Экспериментальное определение виброзащитных свойств верхнего строения пути в натурных 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.
82. 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, Е.Ю. Титов // Вестник МИИТа. – М. – МИИТ. – 2004. – №11. – С.72 - 76.
83. Липатов, А.С. Методика расчета траектории движения мостового крана [Текст] / А.С. Липатов // Сб. научных трудов ВНИИПТМАШ. – М. – 1978. – № 3. – С. 3 - 16.
84. Липатов, А.С. К вопросу о методике расчета крановых ходовых колес [Текст] / А.С. Липатов // Сб. научных трудов ВНИИПТМАШ «Исследование крановых металлоконструкций». – 1979. – №1. – С.9 - 20.
85. Липатов, А.С. Методы повышения безопасности грузоподъемных кранов при ненормируемых условиях эксплуатации: автореф. на соискание ученой степени д.т.н.:05.05.04 / А.С. Липатов. – Южно-Российский гос. техн. Университет. – Новочеркасск. – 2006. – 34 с.
86. 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.
87. 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.
88. Липатов, А.С. Обоснование безопасности эксплуатации кранов [Текст] / А.С. Липатов, Н.Н. Андриенко, В.Л. Корень // Подъемные сооружения. Специальная техника. – Одесса. – 2010. – №11. – С. 21 - 25.
89. Липатов, А.С. Об истории развития отечественных методик по экспертизе и техническому диагностированию грузоподъемных кранов [Текст] / А.С.

- Липатов // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – №2. – С. 7 - 10.
90. 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.
91. Липатов, А.С. Об оценке сейсмостойкости мостовых кранов [Текст] / А.С. Липатов, Г.А. Емельянова // Механизация строительства. – М. – 2013. – № 6. – С. 8 - 12.
92. 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.
93. 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.
94. 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.
95. 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.
96. 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.
97. 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.

98. 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.
99. 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.
100. Лысюк, В.С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблема износа колес и рельсов / В.С. Лысюк. – М. – Транспорт. – 1997. – 188 с.
101. Ляв, А. Математическая теория упругости / А. Ляв. – М. – Л. – ОНТИ НКТП СССР. – 1935. – 674 с.
102. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский и др.; Под общей ред. А.С. Зубченко. – М. – Машиностроение. – 2001. – 672 с.
103. Машины грузоподъемные. Контроль капиллярный. Основные положения. РД РОСЭК. – 004-97. – М. – РосЭК. – 1998. – 14 с.
104. Машины грузоподъемные. Конструкции металлические. Толщинометрия ультразвуковая. Основные положения. РД РОСЭК. – 006-97. – М. – РосЭК. – 1998. – 16 с.
105. Машины грузоподъемные. Контроль вихретоковый. Основные положения. РД РОСЭК. – 004-97. – М. – РосЭК. – 1998. – 12 с.
106. Международный стандарт ИСО 4301/1 Краны грузоподъемные. Классификация. – М. – Издательство стандартов. – 1986. – 8 с.
107. Международный стандарт ИСО 4306/1-85 Краны грузоподъемные. Термины и определения. – М. – Издательство стандартов. – 1987. – 81 с.
108. Металлические конструкции. В 3 т. Т.1. Общая часть. (Справочник проектировщика). ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова. – М. – Изд-во АСВ. – 1998. – 576 с.
109. Методика по оценке технического состояния, остаточного ресурса, срока

- службы, возможности и условий дальнейшей эксплуатации грузоподъемных устройств, установленных на кораблях и судах ВМФ, плавучих кранов. – М. – 2007 – 127 с.
- 110.Методики проведения обследования и технического диагностирования автомобильных кранов, эксплуатируемых в войсковой части 31600, с целью продления срока их эксплуатации. – М. – ООО «ЭКМО». – 2009. – 47 с.
- 111.Методики по техническому диагностированию грузоподъемного оборудования железнодорожных кранов ЕДК с целью установления возможности продления срока их службы и условий дальнейшей эксплуатации. РД 10-112. – РЖД. – М. – ОАО «Промышленная безопасность». – 2012. – 66 с.
- 112.Методические указания по проведению обследования металлоконструкций кранов с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. Издание 3-е, переработанное и дополненное. – М. – ВНИИПТМАШ. – 1984. – 43 с.
- 113.Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 1. Общие положения. РД 10-112-1. – М. – РосЭК. – 1996. – 14 с.
- 114.Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 2. Краны стреловые самоходные общего назначения. РД 10-112-2. – М. – ВНИИСтройдормаш. – 1997. – 12 с.
- 115.Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 3. Башенные, стреловые несамоходные и мачтовые краны, краны-лесопогрузчики. РД 10-112-3-97. – М. – СКТБ башенного краностроения. – 1997. – 45 с.
- 116.Методические указания по проведению обследования порталных кранов с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. РД 10-112-4-98. – М. – СПб. – 1998. – 83 с.
- 117.Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 5. Краны мостовые и козловые. РД 10-112-5-97. – М. – ВНИИПТМАШ. – 1997. – 36 с.

118. Методические указания по обследованию специальных металлургических кранов. РД 10-112-6-03. – Екатеринбург. – 2003. – 111 с.
119. Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 8. Краны монтажные специальные. РД 10-112-8-97. – М. – ВКТИмонтажстроймеханизация. – 1997. – 26 с.
120. Методические указания по обследованию подъемников (вышек) с истекшим сроком службы. РД 10-112-9-99. – М. – ВКТИмонтажстроймеханизация. – 1999. – 72 с.
121. Методические указания. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении обследования и технического диагностирования (экспертизе промышленной безопасности). РД ИКЦ "Кран" – 007 – 97/02. – М. – 1997. – 67 с.
122. Методические указания по обследованию кранов с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. Издание 4-е, переработанное и дополненное. – М. – ВНИИПТМАШ. – 1991. – 43 с.
123. 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.
124. 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.
125. 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.
126. 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.

127. Мещеряков, В.Б. Статика, динамика и устойчивость тонкостенных стержней с учетом деформаций сдвига / В.Б. Мещеряков. – М. – Изд-во АСВ. – 2014. – 264 с.
128. Митюшин, Н.Т. Влияние выбоин на динамические напряжения в рельсах [Текст] / Н.Т. Митюшин // Труды МИИТ. – 1932. – вып. 22. – С. 35 - 51.
129. Муравский, Г.Б. Действие подвижной нагрузки на балку бесконечной длины, лежащую на упругом основании [Текст] / Г.Б. Муравский // Тр. МИИТ. – 1961. – вып. 134. – С. 54 - 84.
130. Муравский, Г.Б. Динамическое действие подвижной нагрузки на балку бесконечной длины, лежащую на упругом основании // Диссертация на соискание ученой степени канд. тех. наук. – М. – 1961.
131. Муравский, Г.Б. К расчету балки бесконечной длины, лежащей на упругом основании, на действие мгновенного сосредоточенного импульса [Текст] / Г.Б. Муравский // Известия АН СССР, ОТН. Механика и машиностроение. – 1962. – №6.
132. Муравский, Г.Б. Колебания бесконечной балки Тимошенко на упругом основании [Текст] / Г.Б. Муравский // Строительная механика и расчет сооружений. – МИИТ. – 1979. – № 6. – С. 56 - 61.
133. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. – М. – Госатомнадзор России. – 2001. – 38 с.
134. НП 043-11. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии. – М. – ФБУ «НТЦ ЯРБ». – 2013. – 28 с.
135. ОСТ 24.190.03-83. Надежность изделий подъемно-транспортного машиностроения. Расчет показателей надежности. – М. – Минтяжмаш. – 1983. – 17 с.
136. ОСТ 24.090.44-82. Колеса крановые. Выбор и расчет. – М. – ВНИИПТМАШ. – 1982. – Вып. 16. – 40 с.
137. Панасенко, Н.Н. Нормы расчета на сейсмостойкость подъемно-транспортного оборудования атомных станций / Н.Н. Панасенко, И.И. Абрамович, Н.М.

- Дементьева, В.И. Гостяев, А.С. Липатов и др. // РД 24.035.04-89. Часть 1. – М. – 1990. – 64 с.
- 138.Панасенко, Н.Н. Грузоподъемные краны промышленного назначения для районов с повышенным уровнем сейсмичности [Текст] / Н.Н. Панасенко, И.И. Абрамович // Подъемно-транспортное дело. – 1997. – №4. – С. 18 - 26.
- 139.Пахомов, М.П. Воздействие колеса с ползуном на рельс [Текст] / М.П. Пахомов // Вестник ВНИИЖТа. – 1959. – № 5. – С. 22 - 27.
- 140.Петров, А.А. Вероятностная оценка нормируемых параметров сейсмической реакции сооружений [Текст] / А.А. Петров // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – №1.
- 141.Петров, Н.П. Влияние поступательной скорости на напряжения в рельсе / Н.П. Петров // Записки РТО. – кн. 2-я. – С.-Петербург. – 1903. – 89 с.
- 142.Петров, Н.П. Напряжения в рельсах от вертикальных давлений катящихся колес. Влияние скорости и неправильного вида колес / Н.П. Петров. – С.-Петербург. – 1907. – 120 с.
- 143.Пинес, А.Ю. Основы оценки надежности / А.Ю. Пинес. // в кн.: Расчеты крановых механизмов и их деталей. – Издание 4-е переработанное и дополненное. В 2 т., Т1. – М. – ВНИИПТМАШ. – 1993. – С. 43 - 56.
- 144.Подъемно-транспортная техника: словарь-справочник: в 2 т. Т.2 / Л.Н. Горбунова, К.Д. Никитин и др.; ред. К.Д. Никитин, Л.Н. Горбунова. – Красноярск. – ИПК СФУ. – 2008. – 598 с.
- 145.Попов, Б.Е. Магнитная диагностика и остаточный ресурс подъемных сооружений [Текст] / Б.Е. Попов, В.С. Котельников, В.В. Зарудный и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – №2. – С. 44 - 50.
- 146.Попов, Б.Е. Диагностика мостовых кранов в литейных цехах [Текст] / Б.Е. Попов, В.С. Котельников, Е.А. Левин, А.С. Липатов // Безопасность труда в промышленности. – № 4. – 2005. – С. 18 - 24.
- 147.Попов, В.А. Исследования и практика применения магнитной структуроскопии [Текст] / В.А. Попов // Подъемные сооружения. Специальная техника. – Одесса. – №9. – 2004. – С. 12 - 15.

148. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). – М. – ЦИТП. – 1989.
149. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. ПБ 10-14-92. – М. – НПО ОБТ. – 1993. – 239 с.
150. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. ПБ 10-382-00. – М. – ПИО ОБТ. – 2000. – 268 с.
151. Расчеты крановых механизмов и их деталей / В 2-х томах, Т.2. – Издание 4-ое, переработанное и дополненное. – М. – 1993. – 163 с.
152. РД 10-138-97 (с Изм. №1 – РДИ 10-349(138)-00, утвержденном постановлением Госгортехнадзора России № 12 от 30.03.2000 г.) Комплексное обследование крановых путей грузоподъемных машин. Часть I. Общие положения. Методические указания.
153. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов / утв. Пост. Госгортехнадзора России № 30 от 10.07.2001 г.
154. РТМ 24.090.23-76. Краны грузоподъемные. Нормы надежности мостовых, козловых и порталных кранов. / М. – НИИинформтяжмаш. – 1976. – 6 с.
155. Разработка рекомендаций по проектированию металлоконструкций кранов в северном исполнении // научный отчет. М. – ВНИИПТМАШ. – 1973 г.
156. Руководящий документ по оценке остаточного ресурса порталных кранов. РД 24-112-4Р. – М. – СПб. – ОАО «РосЭК». – 2004. – 66 с.
157. Руководящий документ по оценке остаточного ресурса кранов мостового типа. РД 24-112-5Р. – М. – ВНИИПТМАШ. – 2002. – 23 с.
158. Сато, Ю. Динамическое воздействие колеса с ползуном на деформацию пути [Текст] / Ю. Сато // Ежемесячный бюллетень международной ассоциации железнодорожных конгрессов [Вестник ВНИИЖТа]. – 1966. – №1. – С. 55 - 60.
159. Свод правил СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная версия.
160. Сероштан, В.И. Диагностирование грузоподъемных машин / В.И. Сероштан, Ю.С. Огарь, А.И. Головин и др. / Под ред. В.И. Сероштана и Ю.С. Огаря. – М. –

- Машиностроение. –1992. – 192 с.
- 161.СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий.
- 162.СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции / Госстрой России. – М. – ЦПП. – 2007. – 192 с.
- 163.СНиП II-7-81 Строительство в сейсмических районах – М. – Госстрой. – 1981. – 93 с.
- 164.СНиП II – 23 – 81\*. Стальные конструкции / Госстрой России. – М. – ГУП ЦПП. – 2000. – 200 с.
- 165.Соколов, С.А. Методические указания по определению остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов. Краны мостового типа / С.А. Соколов. СТП-01.00-99 (согласованы письмом Госгортехнадзора РФ №12-43/862 от 15.10.02).
- 166.Соловьев, А.Е. О состоянии промышленной безопасности на промышленных предприятиях, расположенных на территории Свердловской области и принимаемых мерах по ее обеспечению [Текст] / А.Е. Соловьев // Сб. докладов и сообщений III Уральского Конгресса подъемно-транспортного оборудования. – Екатеринбург. – 2010. – С. 20 - 30.
- 167.Сорокин, Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин. М. – Госстройиздат. – 1960. – 120 с.
- 168.Сорокин, Е.С. Методы экспериментального определения внутреннего трения в твердых материалах [Текст] / Е.С. Сорокин // Вопросы прикладной механики. – Труды МИИТа. – вып. 193. – М. – 1964.
- 169.Сорокин, П.А. Способ диагностики трещинообразования в металлоконструкциях / П.А. Сорокин, Г.В. Селиверстов, Р.А. Испирян, А.С. Воробьев. Патент RU 2384813. – 4 с.
- 170.Сопротивление материалов / Под ред. Н.А. Костенко. – Изд. 2-е. испр.и дополн. – М. – Высшая школа. – 2004. – 432 с.
- 171.СП 16.13330.2011 «СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции».
- 172.Справочник по кранам: в 2т., Т1 / В.И. Брауде, М.М. Гохберг, А.А. Ковин и др.; Под общей редакцией М.М. Гохберга. – Л. – Машиностроение. – 1988. –

536 с.

- 173.СТО 24.09-5821-93. Краны грузоподъемные промышленного назначения. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций. М., ВНИИПТМАШ, 1993. – 136 с.
- 174.Стрелецкий, Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений / Н.С. Стрелецкий. – М. – Стройиздат. – 1947. – 96 с.
- 175.Техническая эксплуатация стальных конструкций производственных зданий. ОРД 00 000 89. – М. – 1989. – 56 с.
- 176.Техническое задание на проектирование сейсмостойкого крана – ТКБГ1350.02.00.00.00.00 ТЗ.
- 177.Технический регламент Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» – ТР ТС 010/2011. Утвержден решением комиссии Таможенного союза от 18 октября 2011 г. № 823. – 66 с.
- 178.Тимошенко, С.П. К вопросу о вибрациях рельсов / С.П. Тимошенко // Изв. электротехн. ин-та, т. XIII. – 1905. – 17 с.
- 179.Тимошенко, С.П. К вопросу о действии удара на балку / С.П. Тимошенко // Изв. С.-Петербургского политех. ин-та. Т. 17. – Вып. 2. – 1912.
- 180.Тимошенко, С.П. О динамических напряжениях в рельсах / С.П. Тимошенко // Вестник инженеров. – 1915. – т. 1. – № 4. – С.143 - 152.
- 181.Тимошенко, С.П. К вопросу о прочности рельс / С.П. Тимошенко Отд. оттиск, Петроград. – Ин-т инж. Путей сообщения. – тип. А.Э. Коллинса. – 1915. – 42 с.
- 182.Указания по экспертному обследованию подъемных сооружений с истекшим сроком безопасной эксплуатации. – НЦТД-ПС01-07. – Нижний Новгород. – 2007. – 63 с.
- 183.Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» / Собрание законодательства Российской Федерации. – 1997. – № 30. – ст. 3588.
- 184.Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» / Бюллетень нормативных актов

- федеральных органов исполнительной власти. – N 8. – 24 февраля 2014 г.
185. ФЕМ 9.755. Обеспечение безопасной эксплуатации моторизованных подъемных механизмов (S.W.P.) / Европейская Федерация по грузовым операциям. Раздел 9. Комплексное подъемное оборудование/06 – 1993. – 7 с.
  186. Хенли, Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото / Пер. с англ. – М. – Машиностроение. – 1984. – 528 с.
  187. Чичерин, С.С. Повышение безопасности мостовых кранов на основе анализа и оценки риска эксплуатации конструктивных элементов металлоконструкций: автореф. на соискание ученой степени к.т.н.:05.05.04 / С.С. Чичерин. – Южно-Российский гос. техн. Университет. – Новочеркасск. – 2002. – 24 с.
  188. Шахунянц, Г.М. Устройство железнодорожного пути / Г.М. Шахунянц. – М. – Трансжелдориздат. – 1944. – Том 3. – 238 с.
  189. Шафрановский, А.К. Измерение и непрерывная регистрация сил взаимодействия колесных пар локомотивов с рельсами / А.К. Шафрановский // Труды ВНИИЖТа. – 1969. – Вып. 389. – 120 с.
  190. Шур, Е.А. Повреждения рельсов / Е.А. Шур. – М. – Интекст. – 2012. – 191 с.
  191. Эйбрамсон, Х. Распространение волн напряжений в стержнях и балках / Х. Эйбрамсон, Дж. Плас, Э.А. Риппергер // Проблемы механики. – Вып. 3. – М. – 1961. – С. 24 - 90.
  192. Эсвельд, К. Воздействие на путь повышенных осевых нагрузок / К. Эсвельд и др. // Железные дороги мира. – 1991. – №3. – С. 53 - 56.
  193. Яковлев, В.Ф. О параметрах расчетной схемы сил взаимодействия в контакте колеса и рельса / В.Ф. Яковлев // Труды ЛИИЖТа. – 1964. – Вып. 22. – С. 42 - 48.
  194. Belotserkovskiy P. M. On the oscillations of infinite periodic beams subjected to a moving concentrated force. // Journal of Sound and Vibration. – 1996. – №193 (3). – p. 705 - 712.
  195. Bishop R.E. Longitudinal waves in beams // The Aeronautical Quarterly. – 1952. – №3. – p. 280 - 293.

196. Cranes-Measurement of wheel alignment. International Standard ISO 11630:1997(E). Printed in Switzerland. ICS 53.020.20 / Lipatov A., Forsander L. – 10 p.
197. 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>
198. Hertz H. Uber die Berührung fester elastischer Körper (On the contact of the elastic solids). -J. reine und angewandte Mathematik. – 1882. – B.92. – S. 156 - 171.
199. Kalker J.J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction. – Doctoral dissertation, Technical University Delft (Nad. Drukkerij Bedrijf NV-Leiden). – 1967.
200. Kalker J. Three-dimensional elastic bodies in rolling contact. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, XXVI – 314 p.
201. Kalker J.J. Simplified theory of rolling contact. – Delft Progress Report, Ser. C. – 1973. – 1. – p. 1 - 10.
202. Klaus Feyrer: Drahtseile: Bemessung, Betrieb, Sicherheit / Klaus Feyrer. -2., überarb. und erw. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York, Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Singapur; Tokio: Springer, 2000. ISBN 3-540-67829-8.
203. Kriloff A. Uber die erzwungenen Schwingungen von gleichförmigen elastischen Stäben. Mathematische Annalen, 1905, Bd. 61 SS. 211-234.
204. Overhead Crane Handbook/Whiting Corporation, Harvey, Illinois, 1985. – 346 p.
205. Satoh Y. Dynamic effect of a flat wheel on track deformation / Translated from “Tetsudo Senro” / Bulletin of Permanent Way Society of Japan. – Vol. 12. – No. 7. – July. – 1964.
- 206.** Willis R. Report of the Commissioners appointed to inquire into the application of Iron to Railway Structures. – London. – 1849. – 435 p.

**Приложение А**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ**  
напряженно-деформированного состояния металлоконструкций  
изделия 40В6М

Измерение проводилось структуроскопом магнитным типа КРМ-Ц-К2М заводской № 448 изготовленным ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр» по ТУ 4276-55267428-01.

По результатам калибровки структуроскопа, последний признан годным и допущен к применению по назначению по 08.2006 года.

Рабочие условия проводимых измерений: относительная влажность 75 %, температура окружающего воздуха +12 °С.

Измерение в каждом месте проводилось два раза: вдоль направления расположения элементов металлоконструкций изделия и поперек направления расположения элементов.

Таблица А.1 – Результаты измерений коэрцитивной силы материала в металлоконструкциях изделия 40В6М

| №<br>р/р                                                                                             | Место проведения контроля                                | Значения коэрцитивной силы<br>материала контролируемого<br>изделия, А/см |                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                                                      |                                                          | вдоль<br>расположения<br>элементов                                       | поперек<br>расположения<br>элементов |
| Аутригеры изделия (40В6М.05) материал сталь 10ХСНД<br>вертикальные листы S=8 мм, нижний пояс S=20 мм |                                                          |                                                                          |                                      |
|                                                                                                      | Левый аутригер                                           |                                                                          |                                      |
|                                                                                                      | 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<br>(вблизи сварного шва) | 5,22                                                                     | 3,85                                 |

## Продолжение таблицы А.1

|    |                                                       |      |      |
|----|-------------------------------------------------------|------|------|
| 4  | место изгиба конструкции                              | 6,42 | 4,66 |
| 5  | место приварки гидроопоры 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 изгиба конструкции                              | 6,62 | 4,91 |
| 10 | место приварки гидроопоры аутригера                   | 5,56 | 4,80 |
|    | Нижний пояс                                           |      |      |
| 11 | место приварки косого шва                             | 2,85 | 4,29 |
| 12 | место приварки гидроопоры аутригера                   | 2,90 | 4,12 |
|    | <b>Правый аутригер</b>                                |      |      |
|    | Лицевая сторона                                       |      |      |
| 1  | L=200 мм от начала конструкции                        | 3,62 | 3,14 |
| 2  | L=950 мм от начала конструкции                        | 3,84 | 3,70 |
| 3  | L=1660 мм от начала конструкции (вблизи сварного шва) | 4,29 | 3,44 |
| 4  | место изгиба конструкции                              | 4,96 | 3,44 |
| 5  | место приварки гидроопоры аутригера                   | 5,35 | 3,50 |
|    | Обратная сторона                                      |      |      |
| 6  | L=200 мм от начала конструкции                        | 5,16 | 3,85 |
| 7  | L=950 мм от начала конструкции                        | 3,55 | 3,76 |

Продолжение таблицы А.1

|                                                                                                   |                                                          |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------|------|
| 8                                                                                                 | L=1660 мм от начала конструкции<br>(вблизи сварного шва) | 5,32 | 3,71 |
| 9                                                                                                 | место изгиба конструкции                                 | 6,31 | 4,56 |
| 10                                                                                                | место приварки гидропоры<br>аутригера                    | 3,88 | 4,08 |
|                                                                                                   | Нижний пояс                                              |      |      |
| 11                                                                                                | место приварки косого шва                                | 4,32 | 2,68 |
| 12                                                                                                | место приварки гидропоры<br>аутригера                    | 2,50 | 3,25 |
| <b>Устройство рычагов подкоса (40В6М.19) материал сталь 10ХСНД<br/>вертикальные листы S=12 мм</b> |                                                          |      |      |
|                                                                                                   | <b>Левая часть рычагов</b>                               |      |      |
|                                                                                                   | наружная стенка нижнего звена<br>подкоса                 |      |      |
| 1                                                                                                 | место перемены сечения                                   | 7,97 | 3,28 |
| 2                                                                                                 | место перегиба                                           | 6,97 | 5,20 |
| 3                                                                                                 | узел крепления гидроцилиндра                             | 5,24 | 4,12 |
| 4                                                                                                 | нижний изгиб подкоса                                     | 7,02 | 6,61 |
| 5                                                                                                 | между косынками усиления                                 | 4,44 | 6,97 |
| 6                                                                                                 | узел крепления шарнира                                   | 5,81 | 5,21 |
|                                                                                                   | наружная стенка верхнего звена<br>подкоса                |      |      |
| 7                                                                                                 | у кронштейна (~ 100 мм)                                  | 5,26 | 4,05 |
| 8                                                                                                 | у 1-го стыкового шва (~ 150 мм)                          | 4,17 | 5,86 |
| 9                                                                                                 | у 2-го стыкового шва (~ 100 мм)                          | 3,68 | 4,12 |
| 10                                                                                                | Шарнирное соединение                                     | 5,36 | 4,05 |
|                                                                                                   | верхний пояс левого подкоса                              |      |      |
| 11                                                                                                | узел крепления                                           | 2,88 | 2,34 |

## Продолжение таблицы А.1

|                                                                        |                                        |      |      |
|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------|------|
| 12                                                                     | перед гидроцилиндром                   | 2,38 | 2,22 |
| 13                                                                     | за гидроцилиндром                      | 3,20 | 2,07 |
| 14                                                                     | перед усиливающей накладкой            | 2,38 | 2,62 |
|                                                                        | <b>Правая часть рычагов</b>            |      |      |
|                                                                        | наружная стенка нижнего звена подкоса  |      |      |
| 1                                                                      | место перемены сечения                 | 7,72 | 3,42 |
| 2                                                                      | место перегиба                         | 6,61 | 6,19 |
| 3                                                                      | узел крепления гидроцилиндра           | 5,56 | 4,93 |
| 4                                                                      | нижний изгиб подкоса                   | 5,96 | 4,86 |
| 5                                                                      | между косынками усиления               | 4,21 | 7,20 |
| 6                                                                      | узел крепления шарнира                 | 5,86 | 5,15 |
|                                                                        | наружная стенка верхнего звена подкоса |      |      |
| 7                                                                      | у кронштейна (~ 100 мм)                | 6,25 | 3,39 |
| 8                                                                      | у 1-го стыкового шва (~ 150 мм)        | 6,16 | 3,84 |
| 9                                                                      | у 2-го стыкового шва (~ 100 мм)        | 3,85 | 3,02 |
| 10                                                                     | шарнирное соединение                   | 3,44 | 2,01 |
|                                                                        | верхний пояс правого подкоса           |      |      |
| 11                                                                     | узел крепления                         | 2,96 | 2,44 |
| 12                                                                     | перед гидроцилиндром                   | 2,81 | 3,43 |
| 13                                                                     | за гидроцилиндром                      | 3,18 | 2,17 |
| 14                                                                     | перед усиливающей накладкой            | 2,26 | 2,98 |
| <b>Нижний пояс рамы (40В6М.01) материал сталь 10ХСНД листы S=20 мм</b> |                                        |      |      |
|                                                                        | <b>Правая часть</b>                    |      |      |
| 1                                                                      | в месте установки опор                 | 4,38 | 4,01 |
| 2                                                                      | под шкафом управления                  | 5,08 | 3,59 |

## Продолжение таблицы А.1

|                                                                                                                                                                                                                         |                                           |      |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------|-------|
| 3                                                                                                                                                                                                                       | в месте установки аутригеров              | 2,39 | 3,97  |
|                                                                                                                                                                                                                         | Левая часть                               |      |       |
| 4                                                                                                                                                                                                                       | в месте установки опор                    | 5,91 | 3,94  |
| 5                                                                                                                                                                                                                       | под шкафом управления                     | 3,94 | 3,04  |
| 6                                                                                                                                                                                                                       | в месте установки аутригеров              | 3,65 | 5,40  |
| <b>Стрела (40В6М.02) материал сталь ВСтГпс5 листы S=12 мм</b>                                                                                                                                                           |                                           |      |       |
| 1                                                                                                                                                                                                                       | перед люком                               | 2,29 | 3,10  |
| 2                                                                                                                                                                                                                       | сварной шов у короба                      | 2,84 | 1,94  |
| 3                                                                                                                                                                                                                       | сварной шов (2349 мм от короба)           | 2,34 | 3,21  |
| 4                                                                                                                                                                                                                       | сварной шов от торца стрелы (1770 мм)     | 3,08 | 2,75  |
| 5                                                                                                                                                                                                                       | место усиления (основание торца)          | 1,77 | 2,29  |
| <b>Ферма (40В6М.14) материал сталь 10ХСНД листы S= 5 мм</b>                                                                                                                                                             |                                           |      |       |
| 1                                                                                                                                                                                                                       | Первый элемент фермы                      | 2,14 | 2,64  |
| 2                                                                                                                                                                                                                       | до первого фланцевого соединения          | 2,79 | 2,91  |
| 3                                                                                                                                                                                                                       | после первого фланцевого соединения       | 2,82 | 2,96  |
| 4                                                                                                                                                                                                                       | до второго фланцевого соединения          | 2,65 | 3,05  |
| <b>Вставка удлинителя стрелы (40В6МД.12.01-10) материал сталь 10ХСНД листы S= 4 мм направление измерения: сверху – вниз, указанные расстояния - между местами измерений, места измерений – 50-60 мм от сварных швов</b> |                                           |      |       |
| 1                                                                                                                                                                                                                       | 200 мм (от верхнего торца вставки стрелы) | 8,38 | 6,81  |
| 2                                                                                                                                                                                                                       | 1060 мм                                   | 6,97 | 11,09 |
| 3                                                                                                                                                                                                                       | 2000 мм                                   | 8,59 | 10,22 |
| 4                                                                                                                                                                                                                       | 2500 мм                                   | 8,95 | 11,28 |
| 5                                                                                                                                                                                                                       | 1500 мм                                   | 7,05 | 8,20  |
| 6                                                                                                                                                                                                                       | у торца основания вставки стрелы          | 5,93 | 3,83  |

Продолжение таблицы А.1

| <b>Аутригеры изделия ( 40В6М.05) материал сталь 10ХСНД вертикальные листы S=8 мм, нижний пояс S=20 мм</b> |                                                          |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------|------|
|                                                                                                           | <b>Правый аутригер</b>                                   |      |      |
|                                                                                                           | Лицевая сторона                                          |      |      |
| 1                                                                                                         | L=200 мм от начала конструкции                           | 5,31 | 4,25 |
| 2                                                                                                         | L=950 мм от начала конструкции                           | 4,19 | 4,50 |
| 3                                                                                                         | L=1660 мм от начала конструкции<br>(вблизи сварного шва) | 4,75 | 5,62 |
| 4                                                                                                         | место изгиба конструкции                                 | 6,53 | 4,46 |
| 5                                                                                                         | место приварки гидропоры<br>аутригера                    | 6,84 | 4,77 |
|                                                                                                           | Обратная сторона                                         |      |      |
| 6                                                                                                         | L=200 мм от начала конструкции                           | 4,97 | 2,82 |
| 7                                                                                                         | L=950 мм от начала конструкции                           | 4,88 | 2,87 |
| 8                                                                                                         | L=1660 мм от начала конструкции<br>(вблизи сварного шва) | 3,43 | 4,07 |
| 9                                                                                                         | место изгиба конструкции                                 | 6,51 | 3,99 |
| 10                                                                                                        | место приварки гидропоры<br>аутригера                    | 5,22 | 4,07 |

**Краткие выводы** по оценкам величин коэрцитивных сил различных участков элементов металлоконструкции изделия 40В6М.

Результаты выполненных замеров показывают, что величины коэрцитивных сил примерно в 2 раза ниже предельных для стали 10 ХСНД и ВСтГпс5 соответствующих толщин.

## Приложение Б

Таблица Б.1 – Сравнительные результаты расчетов 5 мостовых кранов АЭХК на сейсмические воздействия.  
Геометрические параметры и параметры жесткости металлоконструкции крана

| Параметры                                                          | Размерности     | Значения.<br>Кран 5 т,<br>пролет<br>16,5 м | Значения.<br>Кран 10 т,<br>пролет<br>16,5 м. | Значения.<br>Кран 15 т,<br>пролет<br>16,5 м. | Значения.<br>Кран 16 т,<br>пролет<br>16,5 м. | Значения.<br>Кран 10 т,<br>пролет<br>32,0 м |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Геометрические параметры главных балок в расчетном сечении         |                 |                                            |                                              |                                              |                                              |                                             |
| Моменты инерции:                                                   |                 |                                            |                                              |                                              |                                              |                                             |
| относительно горизонтальной оси                                    | см <sup>4</sup> | 99293                                      | 108055                                       | 259649                                       | 208512                                       | 740624                                      |
| относительно вертикальной оси                                      | см <sup>4</sup> | 30915                                      | 64971                                        | 61721                                        | 51079                                        | 140225                                      |
| Моменты сопротивления:                                             |                 |                                            |                                              |                                              |                                              |                                             |
| относительно горизонтальной оси                                    | см <sup>3</sup> | 2655                                       | 3087                                         | 5299                                         | 4181                                         | 10329                                       |
| относительно вертикальной оси                                      | см <sup>3</sup> | 1546                                       | 2320                                         | 2743                                         | 2270                                         | 5008                                        |
| Жесткость главных балок:                                           |                 |                                            |                                              |                                              |                                              |                                             |
| вертикальная                                                       | Н/см            | 22281                                      | 24247                                        | 58263                                        | 46788                                        | 22783                                       |
| горизонтальная                                                     | Н/см            | 6937                                       | 14579                                        | 13850                                        | 11462                                        | 4314                                        |
| Жесткость канатов                                                  | Н/см            | 8465                                       | 40920                                        | 49698                                        | 88946                                        | 40920                                       |
| Отношение вертикальной жесткости главных балок к жесткости канатов |                 | 2.63                                       | 0.59                                         | 1.17                                         | 0.53                                         | 0.56                                        |

Продолжение таблицы Б.1

| Расчетный случай 1: Кран с номинальным грузом, тележка в середине пролета            |     |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| Собственные частоты колебаний крана:                                                 |     |       |       |       |       |       |
| в вертикальном направлении                                                           | Гц  | 2.36  | 2.46  | 2.76  | 3.56  | 2.26  |
| в горизонтальном направлении                                                         | Гц  | 2.64  | 3.55  | 2.60  | 2.71  | 1.55  |
| Вертикальное абсолютное ускорение                                                    |     | 0.72g | 0.45g | 0.52g | 0.45g | 0.45g |
| Горизонтальное абсолютное ускорение:                                                 |     |       |       |       |       |       |
| без учета скольжения ходовых колес                                                   |     | 1.03g | 0.64g | 0.74g | 0.64g | 0.64g |
| с учетом скольжения ходовых колес                                                    |     | 0.77g | 0.48g | 0.55g | 0.48g | 0.48g |
| Напряжения в главных балках от:                                                      |     |       |       |       |       |       |
| вертикальных статических нагрузок                                                    | МПа | 79.1  | 107.3 | 100.0 | 79.8  | 74.3  |
| вертикальной составляющей сейсмического воздействия                                  | МПа | 59.3  | 56.5  | 59.4  | 42.4  | 40.1  |
| Напряжения в главных балках от горизонтальной составляющей сейсмического воздействия | МПа | 31.4  | 14.8  | 25.4  | 20.4  | 21.0  |
| Суммарные напряжения в среднем сечении главной балки                                 | МПа | 169.8 | 178.7 | 184.7 | 142.6 | 135.4 |
| Максимальный прогиб главной балки:                                                   |     |       |       |       |       |       |
| в вертикальной плоскости                                                             | мм  | 40.0  | 50.6  | 35.1  | 26.5  | 64.8  |
| в горизонтальной плоскости                                                           | мм  | 11.0  | 3.7   | 7.9   | 6.4   | 19.8  |
| Коэффициент увеличения нагрузки в канате при сейсмическом воздействии                |     | 2.1   | 1.6   | 1.7   | 1.6   | 1.6   |
| Равнодействующие сил тяжести (+) и сил сейсмического воздействия (-):                |     |       |       |       |       |       |
| для крана                                                                            | Н   | 48502 | 50833 | 96800 | 66103 | 91117 |
| для тележки                                                                          | Н   | 23162 | 23553 | 46090 | 22536 | 28230 |

## Продолжение таблицы Б.1

| Расчетный случай 2. Кран без груза, тележка в середине пролета                                                                 |     |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| Собственные частоты колебаний крана:<br>в вертикальном направлении<br>в горизонтальном направлении                             | Гц  | 4.66  | 4.50  | 5.25  | 5.38  | 3.54  |
|                                                                                                                                | Гц  | 2.64  | 3.55  | 2.60  | 2.71  | 1.55  |
| Вертикальное абсолютное ускорение                                                                                              |     | 0.72g | 0.45g | 0.51g | 0.45g | 0.45g |
| Горизонтальное абсолютное ускорение:                                                                                           |     |       |       |       |       |       |
| без учета скольжения ходовых колес                                                                                             |     | 1.03g | 0.64  | 0.74  | 0.64  | 0.64g |
| с учетом скольжения ходовых колес                                                                                              |     | 0.77g | 0.48g | 0.55g | 0.48g | 0.48g |
| Напряжения в главных балках от:<br>вертикальных статических нагрузок<br>вертикальной составляющей сейсмического<br>воздействия | МПа | 40.3  | 40.5  | 41.6  | 40.4  | 35.6  |
|                                                                                                                                | МПа | 34.2  | 20.9  | 24.6  | 20.6  | 19.1  |
| Напряжения в главных балках от горизонтальной<br>составляющей сейсмического воздействия                                        | МПа | 31.4  | 14.8  | 25.4  | 20.4  | 21.0  |
| Суммарные напряжения в среднем сечении<br>главной балки                                                                        | МПа | 105.8 | 76.2  | 91.6  | 81.4  | 75.7  |
| Максимальный прогиб главной балки в<br>горизонтальной плоскости                                                                | мм  | 11.0  | 3.7   | 7.9   | 6.4   | 19.8  |
| Равнодействующие сил тяжести (+) и сил<br>сейсмического воздействия (-):<br>для крана<br>для тележки                           | Н   | 38192 | 48765 | 85472 | 64914 | 88678 |
|                                                                                                                                | Н   | 1584  | 6580  | 9995  | 8689  | 5572  |
| Расчетная величина отрыва от рельсового пути<br>при сейсмическом воздействии:<br>для крана<br>для тележки                      | мм  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
|                                                                                                                                | мм  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  |

Таблица Б.2 – Исходные параметры мостовых двухбалочных кранов, подготовленные для проверки сейсмической прочности

| Параметр                                                                 | Размерность       | Значения     |              |              |           |              |              |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|
|                                                                          |                   | Кран №10-614 | Кран №10-616 | Кран №10-656 | Кран №329 | Кран №10-668 | Кран №10-601 |
| Грузоподъемность                                                         | т                 | 5            | 5            | 5            | 10,0      | 10,0         | 10,0         |
| Расчетный груз                                                           | т                 | 5            | 5            | 5            | 10,0      | 10,0         | 10,0         |
| Масса крана                                                              | кг                | 21020        | 11680        | 11920        | 15600     | 9700         | 12400        |
| Пролет крана                                                             | м                 | 22,5         | 16,5         | 16,5         | 22,5      | 10,5         | 16,5         |
| Высота установки крана                                                   | м                 | 6,0          | 6,7          | 16,0         | 10,0      | 8,0          | 8,08         |
| Жесткость главных балок, вертикальная                                    | Н/см <sup>2</sup> | 21725        | 21861        | 22281        | 28361     | 56660        | 25204        |
| Жесткость главных балок, горизонтальная                                  | Н/см <sup>2</sup> | 3989         | 6597         | 6937         | 8034      | 29002        | 14764        |
| Результаты расчета собственных частот колебаний металлоконструкции крана |                   |              |              |              |           |              |              |
| Собственная частота колебаний метал. крана в верт. плоскости             | Гц                | 3,43         | 4,76         | 4,66         | 4,59      | 7,43         | 4,69         |
| Собственная частота колебаний метал. крана в гориз. плоскости вдоль пути | Гц                | 1,48         | 2,65         | 2,64         | 2,48      | 5,47         | 3,65         |

## Продолжение таблицы Б.2

| Параметр                                                                 | Размерность       | Значения     |              |              |              |              |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                                          |                   | Кран №10-603 | Кран №10-664 | Кран №10-682 | Кран №10-625 | Кран №10-362 |
| Грузоподъемность                                                         | т                 | 10,0         | 10,0         | 10,0         | 10,0         | 10,0         |
| Расчетный груз                                                           | т                 | 10,0         | 10,0         | 10,0         | 10,0         | 10,0         |
| Масса крана                                                              | кг                | 12772        | 15719        | 21348        | 40582        | 22600        |
| Пролет крана                                                             | м                 | 16,5         | 17,0         | 22,5         | 32,0         | 32,0         |
| Высота установки крана                                                   | м                 | 8,08         | 8,08         | 10,0         | 8,6          | 6,75         |
| Жесткость главных балок, вертикальная                                    | Н/см <sup>2</sup> | 24247        | 36459        | 39063        | 32462        | 22783        |
| Жесткость главных балок, горизонтальная                                  | Н/см <sup>2</sup> | 14569        | 17725        | 10047        | 5410         | 4314         |
| Результаты расчета собственных частот колебаний металлоконструкции крана |                   |              |              |              |              |              |
| Собственная частота колебаний метал. крана в верт. плоскости             | Гц                | 4,5          | 5,5          | 4,79         | 3,26         | 3,54         |
| Собственная частота колебаний метал. крана в гориз. плоскости вдоль пути | Гц                | 3,55         | 3,9          | 2,46         | 1,34         | 1,55         |

Таблица Б.3 – Результаты расчетов. Кран с грузом паспортной грузоподъемности. Тележка в середине пролета.

| Параметр                                                                   | Размерность | Значения     |              |              |           |              |              |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-----------|--------------|--------------|
|                                                                            |             | Кран №10-614 | Кран №10-616 | Кран №10-656 | Кран №329 | Кран №10-668 | Кран №10-601 |
| Напряжения в главных балках от верт. статических нагрузок                  | МПа         | 81,1         | 77,6         | 79,1         | 82,5      | 92,1         | 103,3        |
| Напряжения в главных балках от верт. составляющей сейсм. воздействия       | МПа         | 42,2         | 41,3         | 59,3         | 43,8      | 44,7         | 55,1         |
| Напряжения в главных балках от гориз. составляющей сейсм. воздействия      | МПа         | 33,4         | 19,3         | 31,4         | 16,0      | 12,2         | 14,1         |
| Суммарные напряжения в среднем сечении главной балки                       | МПа         | 136,7        | 138,2        | 169,8        | 142,0     | 149,0        | 172,6        |
| Прогиб главной балки (мах) вертикальный                                    | мм          | 50,1         | 34,6         | 40,0         | 45,4      | 19,9         | 48,1         |
| Прогиб главной балки (мах) горизонтальный                                  | мм          | 21,8         | 6,8          | 11,0         | 7,7       | 1,5          | 3,5          |
| Козф. увеличения нагрузки от сеймики в грузовом канате                     | -           | 1,6          | 1,6          | 2,1          | 1,6       | 1,8          | 1,6          |
| Равнодействующая сил тяжести (+) и сил от сеймики (-) для крана            | Н           | 84356        | 48,246       | 48502        | 64589     | 54313        | 49609        |
| Равнодействующая сил тяжести (+) и сил от сеймики (-) для грузовой тележки | Н           | 18342        | 15244        | 23182        | 27229     | 36980        | 24133        |

Продолжение таблицы Б.3

| Параметр                                                                   | Размерность | Значения     |              |              |              |              |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                                            |             | Кран №10-603 | Кран №10-664 | Кран №10-682 | Кран №10-625 | Кран №10-362 |
| Напряжения в главных балках от верт. статики (вес крана + груз)            | МПа         | 107,3        | 82,2         | 69,3         | 75,3         | 74,3         |
| Напряжения в главных балках от верт. составляющей сейсм. воздействия       | МПа         | 56,5         | 43,8         | 36,6         | 39,3         | 40,1         |
| Напряжения в главных балках от гориз. составляющей сейсм. воздействия      | МПа         | 14,8         | 11,7         | 16,9         | 28,0         | 21,0         |
| Суммарные напряжения в среднем сечении главной балки                       | МПа         | 178,7        | 138,7        | 122,9        | 142,6        | 135,4        |
| Прогиб главной балки (мах) вертикальный                                    | мм          | 50,6         | 33,7         | 36,4         | 59,8         | 64,8         |
| Прогиб главной балки (мах) горизонтальный                                  | мм          | 3,7          | 3,1          | 7,9          | 24,6         | 19,8         |
| Коэф. увеличения нагрузки от сеймики в грузовом канате                     | -           | 1,6          | 1,6          | 1,7          | 1,6          | 1,6          |
| Равнодействующая сил тяжести (+) и сил от сеймики (-) для крана            | Н           | 50833        | 68561        | 91658        | 167823       | 91117        |
| Равнодействующая сил тяжести (+) и сил от сеймики (-) для грузовой тележки | Н           | 23553        | 27339        | 32125        | 33600        | 28230        |

## Приложение В

### Акты внедрения



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

### «Научно-технический центр по безопасности в промышленности»

ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность»

Адрес местонахождения: 109147, г. Москва, ул. Таганская, д. 34 А • Почтовый адрес: 109147, г. Москва, 147, а/я 224  
Тел.: (495) 500-51-98 • Тел./факс: (499) 763-70-19 • e-mail: ntc@oaontc.ru • www.oaontc.ru  
ОКПО 13247558 • ОГРН 1067746399929 • ИНН 7709666234 • КПП 770901001

21.06.2012 № 01-5/466  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Заведующему кафедры РК-4 МГТУ  
им. Н.Э. Баумана проф., д.т.н.

**А.В. Вершинскому**

Копия: Заведующему кафедры  
«Теоретическая механика» МИИТа,  
проф., д.т.н.

**С.Б. Косицыну**

Согласно Договору от 16.01.2012 № 13 р / 12 с Открытым акционерным обществом Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ОАО «ВНИИЖТ») ОАО НТЦ «Промышленная безопасность» выполнена и принята Заказчиком НИР по разработке руководящего нормативного документа «Методика технического диагностирования грузоподъемного оборудования кранов ЕДК с целью установления возможности продления срока их службы».

Данная Методика разработана с целью выполнения работ по техническому диагностированию, оценке остаточного ресурса и условий дальнейшей эксплуатации грузоподъемного оборудования железнодорожных кранов ЕДК, выработавших назначенные сроки службы, эксплуатирующихся в ОАО «РЖД». Методика разработана в соответствии с требованиями Федерального закона от 21.07.1997 г. №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов, а также нормативных документов в области обеспечения промышленной безопасности, в том числе «Правил устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов».

Методика устанавливает требования к периодичности, организации и методам технического диагностирования, оценке остаточного ресурса и условий дальнейшей эксплуатации кранов. Методика предназначена для экспертных (специализированных) организаций, занимающихся техническим диагностированием (экспертизой промышленной безопасности) кранов, для предприятий и организаций ОАО «РЖД», в которых эксплуатируются вышеуказанные краны.

Данный руководящий нормативный документ ОАО «РЖД» согласован Ростехнадзором (письмо от 21.03.2012 исх. № 00-02-07/406).

Настоящим подтверждаем, что в коллективе непосредственных исполнителей данной работы приняли участие профессор кафедры РК-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н. Анатолий Степанович Липатов (ответственный исполнитель) и доцент кафедры «Теоретическая механика» МИИТ, к.т.н. Емельянова Галина Александровна.



Генеральный директор

В.С. Котельников



Общество с ограниченной ответственностью  
 "Троицкий Крановый Завод" (ООО "ТКЗ")  
 142150, г. Москва, ппх Минзаг,  
 ул. Солнечная, д.21  
 Тел./факс: +7 (495) 225-56-74  
 ИНН/КПП 5046067230/ 775101001  
 Р/С 40702810500010000039  
 в Филиале ООО «ПромТрансБанк» г. Москва  
 К/С 3010 1810 4000 0000 0103, БИК 044599103  
<http://троицкий-крановый-завод.рф>  
<http://www.lemmens.ru>  
 E-mail: lemmens@mail.ru

Исх. № 083-15/П  
 От «18» февраля 2015 г.

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

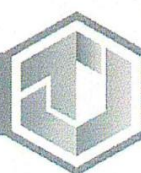
Настоящим подтверждаем, что результаты научно-исследовательских работ, выполненные под руководством проф. каф. РК-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н. А.С.Липатова и группы специалистов в составе: доц., к.т.н. Г.А.Емельяновой, инженеров Ю.Н. Головачева и В.С. Обломея, использованы при проведении расчётов на сейсмостойкость, подготовке документа по обоснованию безопасности (расчётной оценки вероятности безотказной работы) и грузовых натурных испытаниях крана мостового, электрического специального, однобалочного, подвесного грузоподъёмностью 10т. для Смоленской АЭС.

В настоящее время кран отгружен Заказчику - Смоленской АЭС.

Главный инженер



А.И. Котов



E-mail: lemmens@mail.ru  
<http://www.lemmens.ru>  
<http://троицкий-крановый-завод.рф>

**Технический комитет по стандартизации  
«Краны грузоподъемные»  
ТК 289**

|                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                 | <p align="center"><b>Инженерно-экспертное предприятие Акционерное общество «РАТТЕ»</b></p> <p align="center">195196, Санкт-Петербург, Заневский пр., дом 13, лит. А, тел/факс: +7 (812) 552-60-88, e-mail: ptsm@mail.ru</p> |
| <p align="center">Аттестат аккредитации Органа по сертификации подъемно-транспортного оборудования<br/>№ РОСС RU.0001.11МБ11</p> | <p align="center">Лицензия Ростехнадзора на право проведения экспертизы промышленной безопасности технических устройств<br/>№ 00-ДЭ-001467</p>                                                                              |

Ректору МАРХИ, академику  
Д.О. Швидковскому

№ 250-ТК-289 от 10.08.2015г.

Россия, 107031, Москва,  
ул. Рождественка, д.11, корп.1, стр.4

Настоящим подтверждаем непосредственное активное участие доцента МАРХИ, к.т.н. Емельяновой Галины Александровны в разработке проекта национального стандарта Российской Федерации «Краны грузоподъемные. Пути рельсовые крановые надземные. Общие технические условия.», разработанного на основании Программы национальной стандартизации на 2014-2015 г.г. по ТК-289. Шифр по ПНС 1.2.289-2.005.14.

Целью разработки стандарта являлось создание нормативной базы для надземных рельсовых крановых путей, которые являются одним из типов подъемных сооружений, необходимых для передвижения во время эксплуатации внутри цехов и на эстакадах грузоподъемных мостовых кранов (включая опорные и подвесные), полукозловых кранов, передвижных консольных кранов, монорельсовых тележек, электрических и ручных электроталей.

Г.А. Емельянова участвовала не только в разработке концепт-проекта данного стандарта, но и в публичных обсуждениях, результаты которых были учтены непосредственно в тексте ГОСТ.

Проект, созданный при участии Г.А. Емельяновой, успешно прошёл процедуру голосования в ТК-289 и рекомендован к принятию в качестве национального стандарта Российской Федерации.

Председатель ТК-289



Плотников Г.В.