

На правах рукописи

НЕКРАСОВА АНАСТАСИЯ ВИТАЛЬЕВНА

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ
ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ**

Специальность: 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъёмно-транспортные машины»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Соколов Сергей Алексеевич,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический
университет» (СПбГПУ)

Официальные оппоненты: **Петин Сергей Владимирович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический
университет» (СПбГПУ);

Розовский Натан Яковлевич,
кандидат технических наук, заведующий
лабораторией «Грузоподъёмных машин»,
ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный университет
водных коммуникаций» (СПбГУВК)

Ведущая организация: **ЗАО «РАТТЕ»**
195196, Санкт-Петербург,
Заневский пр., дом 13, лит. А

Защита состоится 15 мая 2012 г. в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.24 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корп.1, ауд. 41.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (СПбГПУ).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета:

кандидат технических наук, доцент

Бортяков Данил Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Портальные краны являются одним из основных средств механизации перегрузочных работ в речных и морских портах для перегрузки штучных и сыпучих грузов, они используются также на открытых складах, в судостроении и строительстве. Эти машины отличаются высокой производительностью, имеют большие вылеты, обеспечивают энергопотребление меньше, чем козловые краны.

Металлическая конструкция шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана имеет сравнительно сложную геометрию, параметры которой на стадии проектирования выбираются исходя из функциональных требований с учетом условий прочности и горизонтальности траектории. Однако опыт эксплуатации портальных кранов свидетельствует о том, что при интенсивном режиме работы ресурс его металлической конструкции ограничивается развитием усталостного повреждения. В настоящее время не существует общепринятой нормативной методики расчета элементов стреловой системы на сопротивление усталости, и даже нормирование режимов работы портальных кранов не имеет однозначного обоснования. Это связано со спецификой нагруженности элементов стреловой системы и использованием нескольких грузовых характеристик, в том числе переменных по вылету. Эти факторы существенно усложняют прогнозирование долговечности его конструкции.

Для рационального проектирования стреловых конструкций необходимо иметь методику оценки их долговечности, которая учитывает конструктивные особенности машины, условия эксплуатации и специфику систем управления. Причем последнее обстоятельство приобретает особую значимость с учетом внедрения электроприводов с частотной системой управления. Такая методика позволит найти конструктивно-технологические решения, обеспечивающие необходимый уровень надежности портальных кранов на стадии проектирования, а также даст возможность производить оценку остаточного ресурса конструкции в процессе эксплуатации.

Целью диссертации является методика оценки долговечности металлических конструкций шарнирно-сочлененных стреловых систем портальных кранов. Методика учитывает конструктивные особенности крана, возможности системы управления приводами и характер работы. Для прогнозирования процесса нагружения конструкции используются методы статистического моделирования режима эксплуатации. Методика построена в системе расчетов по предельным состояниям и реализована в виде программного алгоритма. Применение данной методики продемонстрировано на

примере расчета трех портальных кранов. Результаты этих расчетов позволили проанализировать влияние основных конструктивных факторов на долговечность элементов стреловой системы.

Работа направлена на решение следующих задач:

1. Разработка методики статистического моделирования эксплуатационной нагруженности элементов шарнирно-сочлененной стреловой системы портального крана для расчета на сопротивление усталости.
2. Анализ влияния основных геометрических и грузовых факторов на расчетный размах напряжений и оценка их значимости. Определение значений коэффициента циклического нагружения для элементов стреловой системы.
3. Разработка методики прогнозирования долговечности элементов стреловой системы портального крана с учетом случайного характера эксплуатационной нагруженности.
4. Анализ влияния формы траектории перемещения груза и динамических нагрузок на эксплуатационную нагруженность и долговечность элементов стреловой системы.
5. Разработка рекомендаций по проектированию стреловой системы портального крана с целью обеспечению требуемой долговечности.

Для инженерной реализации предлагаемых методик разработано программное обеспечение, позволяющее выполнять расчеты по заданным параметрам в автоматическом режиме.

На защиту выносятся следующие результаты, полученные лично автором и обладающие научной новизной:

1. Методика и алгоритм статистического моделирования эксплуатационной нагруженности шарнирно-сочлененных стреловых систем портальных кранов.
2. Методика и алгоритм прогнозирования долговечности элементов стреловых систем портальных кранов по условию сопротивления усталости.
3. Рекомендации по определению параметров глобального цикла нагружения стрелы и хобота, а также значений коэффициентов циклического нагружения, которые могут быть использованы в инженерных расчетах стреловых систем портальных кранов на сопротивление усталости.
4. Результаты анализа влияния геометрических и нагрузочных параметров портальных кранов на долговечность элементов их стреловых систем, выполненного с использованием разработанных методик и алгоритмов.

Методы исследования. Теоретические положения работы базируются на известных методах статистического моделирования, численных методах расчета и алгоритмизации, а также гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений. Использовано надежное программное обеспечение, достоверные результаты экспериментальных исследований, учтен опыт проектирования и эксплуатации порталных кранов. Методики построены в системе расчетов по предельным состояниям.

Практическая ценность работы заключается в том, что:

- предложенные методики и алгоритмы позволяют производить оценку долговечности элементов стреловых систем порталных кранов, как на стадии проектирования, так и при оценке остаточного ресурса;
- получены зависимости долговечности элементов стреловых систем от значений динамических нагрузок и конфигурации стреловой системы, которая обуславливает траекторию перемещения груза при изменении вылета стрелы;
- установлены эффективные пути повышения долговечности конструкции, показана эффективность применения современных приводов с частотной системой регулирования.

Реализация результатов работы. По заказу ЗАО «РАТТЕ» была выполнена с использованием разработанного методического и программного обеспечения оценка долговечности и остаточного ресурса трёх порталных кранов КПП 16 (34/52), «Витязь» (42/65) и «Докер» (42/52), находящихся в настоящее время в эксплуатации.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на межвузовских научно-технических конференциях в СПбГПУ (2008 – 2011 гг.), научно-технических семинарах кафедры «Транспортные и технологические системы» СПбГПУ (2008-2011 гг.), на конференции политехнического симпозиума «Молодые учёные – промышленности Северо-западного региона» 2007 г.; выставке по итогам конкурса грантов Санкт-Петербурга 2008 года для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук; были изложены в сборниках аннотаций научных работ победителей конкурса грантов Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук 2008 г. и 2010 г.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 5 печатных работах, включая 1 работу в издании, рекомендованном ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 191 странице машинописного текста, включает 70 рисунков, 3 формы и 13 таблиц, состоит из

введения, пяти глав, заключения и основных выводов, списка использованных источников 66 наименований и приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая информация о порталных кранах; указаны основные проблемы, связанные с их проектированием, нормированием режимов работы и определением остаточного ресурса эксплуатируемых кранов. Обоснована актуальность и сформулирована цель диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены существующие конструкции порталных кранов, конструкции их основных механизмов, схемы стреловых устройств и систем уравнивания, указаны основные характеристики рабочих движений. Приведены результаты обзора литературы по исследованию усталости металлических конструкций, описаны основные достижения в этой области, описаны существующие методики расчёта на сопротивление усталости грузоподъемных машин.

Исследованиям кинематики и нагруженности металлических конструкций порталных кранов, а также проблемам расчета и проектирования стреловых устройств посвящены работы Дукельского А.И., Гохберга М.М., Брауде В.И., Серлина Л.Г., Орлова А.Н., Бортякова Д.Е. На основании результатов их исследований созданы методики синтеза оптимальных по массе стреловых устройств, обеспечивающих наилучшую траекторию перемещения груза при изменении вылета, с учетом условий прочности и конструктивных ограничений. Материалы экспериментальных исследований Розовского Н.Я., Карпова В.В., Орлова А.Н., Бортякова Д.Е. позволили сформировать рекомендации по оценке динамических нагрузок и углов отклонения подъемных канатов при раскачивании груза. Основы расчетов металлических конструкций грузоподъемных машин на сопротивление усталости заложены в работах М.М.Гохберга, В.И.Труфякова, В.Н.Юшкевича и др. Под руководством профессора Брауде В.И. создана методика вероятностного расчета долговечности металлических конструкций порталных кранов, базирующаяся на результатах статистических исследований процессов эксплуатационного нагружения их элементов. В работах Н.Я.Розовского эта методика была доведена до уровня, приемлемого для инженерного применения.

Однако методика вероятностных расчётов порталных кранов, основанная на статистических данных, собранных для старых моделей машин, оснащенных релейно-контакторными системами управления приводами, не позволяет прогнозировать

долговечность машин, оснащенных электроприводами с частотными системами управления, анализировать влияние особенностей траектории перемещения груза. Кроме того отсутствуют рекомендации, которые позволили бы оценить влияние снижения динамических нагрузок и искать пути повышения долговечности конструкций.

Анализ существующего состояния методического обеспечения проектирования порталных кранов обусловил цель диссертационной работы как методику оценки долговечности металлических конструкций шарнирно-сочлененных стреловых систем порталных кранов с учетом их конструктивных и нагрузочных характеристик, а также ее структуру и перечень задач, которые должны быть решены.

Вторая глава посвящена конкретизации существующей методики нормирования режимов работы грузоподъемных машин применительно к особенностям порталных кранов, а также исследованию процессов нагружения элементов стреловой системы.

Принятая в настоящее время методика нормирования режима работы кранов по ISO 4301/1 устанавливает систематизацию данных о нагруженности металлических конструкций кранов для расчета их на сопротивление усталости. Она в основном ориентирована на краны мостового типа, которые имеют постоянные грузовые характеристики, а размах напряжений в значительной степени определяется массой поднимаемого груза. Портальные краны имеют несколько грузовых характеристик, в том числе переменных по вылету. Кроме того, размах напряжений в элементах стреловой системы не пропорционален массам грузов, а зависит от траектории его перемещения и процессов раскачивания грузовых канатов. В связи с этим показано, что коэффициент распределения нагрузок K_p , устанавливаемый нормативными режимами, может быть применен только для части элементов металлической конструкции, то есть для колонны, каркаса и портала.

Для учета множественности и переменности грузовых характеристик предложено конкретизировать нормативную методику применительно к порталным кранам, не нарушая ее структуры. В частности коэффициент распределения нагрузок, который согласно ISO 4301/1 вычисляется как $K_p = \sum_i \left[\frac{C_i}{C_T} \left(\frac{P_i}{P_{max}} \right)^m \right]$, рекомендовано находить на основании вероятностного подхода как

$$K_p = \sum_{j=1}^J \int_{R_{min}}^{R_{max}} v_j \cdot \left(\frac{G_j(R)}{G_1(R)} \right)^m f_G(R) dR. \quad (1)$$

Здесь J – количество грузовых характеристик; $G_j(R)$ и $G_1(R)$ – зависимости грузоподъемности от вылета по j -той и по первой, то есть максимальной, характеристике; v_j – частота реализации j -той грузовой характеристики; $f_G(R)$ – плотность распределения максимальных вылетов.

Такой подход позволил получить набор комбинаций классов использования и нагружения, соответствующих одной группе режима работы, которые следует использовать при расчетах на сопротивление усталости. Расчеты, выполненные для различных вариантов работы крана по различным грузовым характеристикам для трех вариантов законов распределения вероятностей вылетов, трапецеидальному, равномерному и усеченному нормальному, показали, что принципиальных различий по значениям коэффициента K_p они не дают.

В данной главе также описана предлагаемая методика моделирования нагруженности элементов стреловой системы порталных кранов, необходимая для прогнозирования процесса накопления усталостного повреждения. Расчет на сопротивление усталости выполняется для конкретного места металлоконструкции, где сочетаются достаточно большой размах номинальных напряжений от внешней нагрузки ($\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$) и существенная концентрация напряжений от сварных или болтовых соединений, галтельных переходов, вырезов и т.п. Такие места называют расчетными зонами (РЗ). Основной расчёт на сопротивление усталости выполняется по РЗ, расположенным в основных сечениях конструкции в области наибольших растягивающих

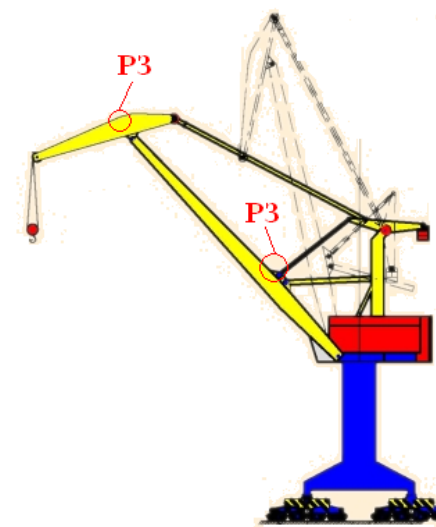


Рис.1. Схема порталного крана с указаниями мест расположения РЗ

напряжений. Возникновение в этих зонах усталостной трещины может привести к катастрофическим последствиям и свидетельствует об исчерпании ресурса конструкции. В стреловой системе портального крана РЗ расположены в поперечном сечении стрелы, в месте шарнирного присоединения рейки механизма изменения вылета, в хоботе, в верхней части сечения в зоне перегиба верхнего поясного листа (рис. 3). Расчёт оттяжки показывает, что в ней в процессе эксплуатации существенные переменные напряжения не возникают.

Для расчета процесса накопления усталостного повреждения в элементах стреловой системы необходимо смоделировать график изменения напряжений, возникающих в этих элементах в ходе работы крана по различным технологическим схемам и по разным грузовым характеристикам. Параметры цикла работы крана, масса груза, вылеты, углы отклонения грузовых канатов, динамические коэффициенты при работе механизмов, являются случайными величинами. Для построения модели процесса нагружения принимаются следующие допущения:

1) Процесс эксплуатации формируется из w циклов работы крана, которые повторяются многократно. Каждый цикл работы представляет собой описание возможной траектории перемещения груза.

2) Вылеты, на которых начинается и заканчивается цикл, являются случайными величинами.

3) Масса груза равна номинальной грузоподъемности крана на максимальном вылете текущего цикла, выполняемого по заданной грузовой характеристике.

В данной работе вылеты, на которых оказывается грузозахватный орган в произвольный момент времени, рассматриваются как случайные величины, распределенные по усеченному нормальному, трапецеидальному или равномерному законам распределения. Наиболее реалистичной и в тоже время пессимистической оценкой распределения является трапецеидальный закон, переменные участки графика плотности которого занимают 10% полного диапазона в зоне минимальных и максимальных вылетов. То есть области, в которых кран работает весьма редко и к тому же автоматически обеспечивается снижение скорости механизма изменения вылета. Наименее реалистичной оценкой распределения является равномерный закон, так как, при распределении вылетов по нему, учитываются зоны граничных вылетов, на которых кран работает редко. Нормальный усеченный закон используется на основании статистических данных, собранных сотрудниками Ленинградского института водного транспорта.

Моделирование процесса работы крана производится разыгрыванием нескольких (w) траекторий перемещения груза со случайными параметрами. Для каждого цикла работы в характерных точках траектории последовательно производятся расчёты напряжений в РЗ с учётом текущих положений всех элементов стреловой системы по всем комбинациям нагрузок (табл. 1) в соответствии с заданной грузовой характеристикой. В результате получается массив значений напряжений в РЗ, характеризующих процесс эксплуатационного циклического нагружения.

Таблица 1

Расчетные комбинации нагрузок

№	Напряжения	Манипуляции крана	Нагрузки на систему
1	σ_1	Груз на земле	Собственные веса
2	σ_2	Плавный подъём груза ^{1,2}	Вес груза, собственные веса
3	σ_3	Отрыв груза от основания	Вес груза, собственные веса, вертикальные динамические нагрузки
4	σ_4	Торможение механизма подъёма	Вес груза, собственные веса, обратные колебания
5	σ_5	Плавная работа МИВ ^{1,2} , механизм работает в сторону уменьшения вылета	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы направлены от стрелы
6	σ_6	Разгон/торможение МИВ, механизм работает в сторону уменьшения вылета	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы, направлены от стрелы; отклонение грузового каната в плоскости качания стрелы направлено от стрелы
7	σ_7	Разгон/торможение МИВ, механизм работает в сторону увеличения вылета	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы, направлены от стрелы; отклонение грузового каната в плоскости качания стрелы направлено к стреле
8	σ_8	Плавная работа МИВ ² , механизм работает в сторону увеличения вылета	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы направлены к стреле
9	σ_9	Разгон/торможение МИВ, механизм работает в сторону увеличения вылета	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы, направлены от стрелы; отклонение грузового каната в плоскости качания стрелы направлено от стрелы
10	σ_{10}	Разгон/торможение МИВ, механизм работает в сторону увеличения вылета	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы, направлены от стрелы; отклонение грузового каната в плоскости качания стрелы направлено к стреле

№	Напряжения	Манипуляции крана	Нагрузки на систему
11	σ_{11}	Плавная работа механизма поворота ² по часовой стрелке	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы направлены против часовой стрелки
12	σ_{12}	Плавная работа механизма поворота ² против часовой стрелки	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы направлены по часовой стрелке
13	σ_{13}	Разгон/торможение механизма поворота по часовой стрелке	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы направлены против часовой стрелки; отклонение грузового каната из плоскости качания стрелы, направлено против часовой стрелки
14	σ_{14}	Разгон/торможение механизма поворота по часовой стрелке	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы направлены против часовой стрелки; отклонение грузового каната из плоскости качания стрелы, направлено по часовой стрелке
15	σ_{15}	Разгон/торможение механизма поворота против часовой стрелки	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы направлены по часовой стрелке; отклонение грузового каната из плоскости качания стрелы, направлено по часовой стрелке
16	σ_{16}	Разгон/торможение механизма поворота против часовой стрелки	Вес груза, собственные веса, силы инерции элементов стреловой системы направлены по часовой стрелке; отклонение грузового каната из плоскости качания стрелы, направлено против часовой стрелки

Примечания:

1. Обозначено: МИБ - механизм изменения вылета.
2. Отсутствуют раскачивания грузового каната.
3. Холостую часть цикла, то есть холостой ход грузозахватного органа, можно не учитывать, так как создаваемые при этом циклы нагружения для элементов стреловой системы не являются повреждающими.

В третьей главе описана предлагаемая методика расчёта металлических конструкций порталных кранов на сопротивление усталости, приведён анализ и рекомендуемые для расчёта значения коэффициента циклического нагружения ζ_e для стрелы, хобота и оттяжки.

При построении методики расчета на сопротивление усталости за основу была принята методика, которая ориентирована на расчет несущих металлических конструкций машин циклического действия и в качестве исходных данных использует расчетные параметры нестационарного эксплуатационного нагружения. Прогнозирование долговечности элементов стреловой системы, подвергающихся сложному нестационарному процессу нагружения, целесообразно вести в форме

анализа накопленного усталостного повреждения с использованием гипотезы линейного суммирования повреждений, которая удовлетворительно подтверждается для элементов сварных конструкций в условиях хорошо «перемешанного» процесса циклического нагружения и дает приемлемую погрешность, идущую в запас надежности.

Согласно гипотезе линейного суммирования повреждений усталостное повреждение, возникающее за один усредненный цикл работы крана, вычисляется по результатам обработки w циклов работы крана как

$$\bar{d}_1 = \frac{1}{w} \sum_{i=0}^w \frac{\zeta_e (k_\alpha \sigma \max_i)^{m_i}}{N_o (\gamma_n \gamma_{dd} \gamma_{di} \gamma_m \sigma_{RKi})^{m_i}}. \quad (2)$$

Здесь σ_{RKi} и m_i - предел выносливости РЗ на базе $N_o = 2 \cdot 10^6$ циклов нагружения и показатель наклона усталостной кривой при коэффициенте асимметрии цикла Rr_i соответственно; $\sigma \max_i$ - значение наибольшего максимума напряжений, действующего в РЗ в течение одного цикла работы крана; $\gamma_n, \gamma_{dd}, \gamma_{di}, \gamma_m$ - коэффициенты надежности, учитывающие различные аспекты неточности расчета, которые в данной работе принимались постоянными по известным рекомендациям. $\zeta_e = \bar{d}_1 / \bar{d}_{1g}$ - коэффициент циклического нагружения, который характеризует влияние дополнительных циклов, происходящих за один цикл работы крана, но имеющих меньший размах напряжений, чем глобальный цикл; \bar{d}_{1g} - усталостное повреждение за один усредненный цикл работы крана, вычисленное по параметрам глобального цикла нагружения.

Эквивалентное количество циклов работы крана до возникновения усталостного повреждения вычисляется как $C_e = 1/\bar{d}_1$. Для обеспечения проектной долговечности должно быть $C_e \geq C_T$, где C_T - нормативное количество циклов работы крана за срок службы, соответствующее установленному классу использования.

Значения коэффициента циклического нагружения, рекомендуемые для использования при расчёте элементов стреловой системы порталного крана на сопротивление усталости, были вычислены в результате анализа модельных процессов нагружения РЗ в стреле, хоботе и оттяжке. Для этого на языке Java была написана программа ANJ-2009. В качестве исходных данных в этой программе задаются базовые значения усталостных характеристик и процесс циклического нагружения РЗ.

Модельный процесс задается в виде графика изменения напряжений, возникающих при реализации нескольких циклов работы крана, осуществляемых по различным схемам. В характерных точках каждого цикла вычислялись напряжения в РЗ по соответствующим комбинациям нагрузок (табл. 1). Полученный график схематизировался методом полных циклов, и выделенные циклы нагружения приводились к симметричному циклу, после чего вычислялось значение коэффициента циклического нагружения как

$$\zeta_e = \sum_{j=1}^J [\mu_j \cdot \sum_{i=1}^{I_j} [n_{ji} \cdot (\frac{\sigma_{redji}}{\sigma_e})^m]], \quad (3)$$

где j – номер цикла работы крана, J – количество рассматриваемых циклов, i – номер ступени нагружения, I_j – количество ступеней нагружения, n_{ji} – число циклов нагружения с одинаковым размахом напряжений, σ_{redji} – эксплуатационные напряжения в опасном сечении рассматриваемого элемента металлоконструкции, приведенные к симметричному циклу нагружения; σ_e – эквивалентное напряжение, равное наибольшему приведенному напряжению, полученному с учетом раскачивания груза на канатах; μ_j – весовой коэффициент, который присваивается каждому ХТЦ работы крана.

При помощи данной программы были осуществлены расчёты для нескольких кранов с разными параметрами стреловых систем и определены значения коэффициента циклического нагружения для элементов металлоконструкции с учетом и без учета продольных и поперечных раскачиваний грузового каната. Результаты расчетов коэффициента ζ_e представлены в табл.2.

Таблица 2

Коэффициенты циклического нагружения элементов портального крана

Элементы	Точки опасного сечения			
	1	2	3	4
Хобот, без раскачиваний	1,0	1,0	1,0	1,0
Хобот, с учетом раскачиваний	1,1	1,1	1,1	1,02
Оттяжка, без раскачиваний	н/п ц	н/п ц	н/п ц	н/п ц
Оттяжка, с учетом раскачиваний	н/п ц	н/п ц	н/п ц	н/п ц
Стрела, с учетом раскачиваний	1,1	1,1	1,2	1,2

Примечание: Н/п ц – не повреждающие циклы.

На основании этих расчетов сделаны следующие выводы:

– процессы эксплуатационного нагружения оттяжки с учетом динамических нагрузок и раскачивания груза не создают повреждающих циклов;

– для расчёта стрелы на сопротивление усталости рекомендуется использовать значение коэффициента циклического нагружения $\zeta_e = 1,2$, для хобота – $\zeta_e = 1,1$.

В четвёртой главе представлен алгоритм анализа долговечности элементов стреловой системы портального крана. Он включает следующие основные разделы:

– ввод исходных данных: массы и геометрические параметры элементов стреловой системы, скорости и время работы механизмов крана, углы раскачиваний грузового каната в плоскости и из плоскости качания стрелы, геометрические параметры сечений основных элементов стреловой системы, характеристики материала элементов стреловой системы, параметры режима работы крана; параметры закона распределения, по которому разыгрываются вылеты; расчётные коэффициенты;

– статистическое моделирование процесса работы крана: разыгрывание случайных параметров траектории перемещения груза, задание грузовой характеристики, определение расчетной массы груза и инерционных нагрузок;

– математическая модель геометрии и кинематики шарнирно-сочлененного стрелового устройства;

– построение линий влияния изгибающих моментов и продольных сил в опасных сечениях стреловой системы от единичных сил x , y , z , приложенных в точке подвеса груза; вычисление напряжений, действующих в РЗ конструктивного элемента, во всех расчетных точках траектории груза по всем комбинациям нагрузок;

– анализ процесса нагружения, расчет накопленного усталостного повреждения и оценка долговечности.

Алгоритм реализован в пакете MathCAD.

В пятой главе изложены результаты исследования влияния параметров стреловой системы и динамических нагрузок на долговечность стрелы и хобота. Эти исследования были выполнены с использованием вышеописанных алгоритмов. На основании этого анализа были сделаны следующие выводы и заключения:

1. Моделирование эксплуатационной нагруженности стреловой системы позволило установить следующие правила вычисления параметров глобального цикла нагружения хобота для расчета на сопротивление усталости: максимальные напряжения возникают при разгоне/торможении механизма подъёма груза, при работе крана на максимальном вылете; минимальные напряжения возникают, при минимальном вылете стрелы без груза.

2. Для определения параметров глобального цикла нагружения стрелы для кранов с минимальным вылетом 8 – 10 м и максимальным 32 – 34 м целесообразно руководствоваться следующими рекомендациями: максимальные напряжения в опасном сечении стрелы возникают на средних вылетах (20 – 27 м) при работе механизма поворота (при этом грузовой канат раскачивается из плоскости качания стрелы), минимальные – на вылете 15 – 17 м при работе механизма изменения вылета (при этом грузовой канат раскачивается в плоскости качания стрелы).

3. Наибольшее влияние на долговечность металлоконструкции хобота оказывают динамические нагрузки, возникающие при работе механизма подъёма (рис. 2). Так понижение динамического коэффициента с 1,6 до 1,2, которое вполне возможно реализовать с помощью частотных приводов, обеспечивает повышение долговечности примерно на 70 %.

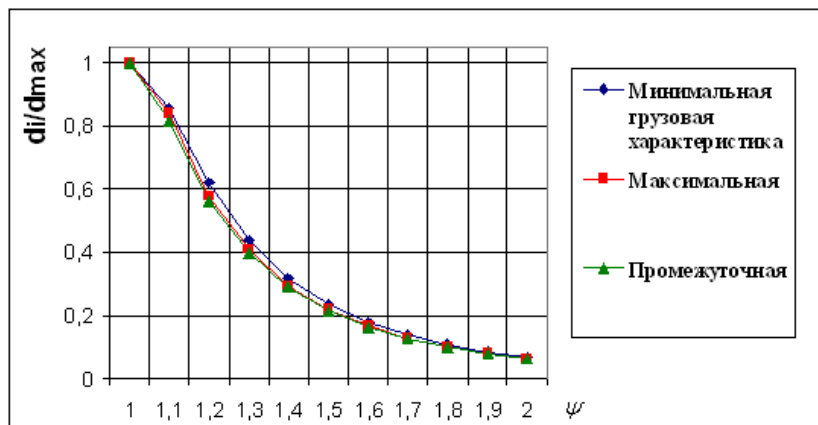


Рис.2. График зависимости долговечности хобота в относительных единицах $\frac{d_i}{d_{max}}$ от динамического коэффициента ψ

4. Наибольшее отрицательное влияние на долговечность металлоконструкции стрелы оказывают раскачивания грузового каната в плоскости и из плоскости качания стрелы, возникающие при работе механизмов изменения вылета и поворота соответственно (рис.3). Причём, раскачивания грузового каната, возникающие при работе механизма поворота, влияют на долговечность стрелы наиболее сильно. Уменьшение с помощью частотных приводов углов отклонения канатов с 6° до 3° обеспечивает повышение долговечности примерно на 86 %.

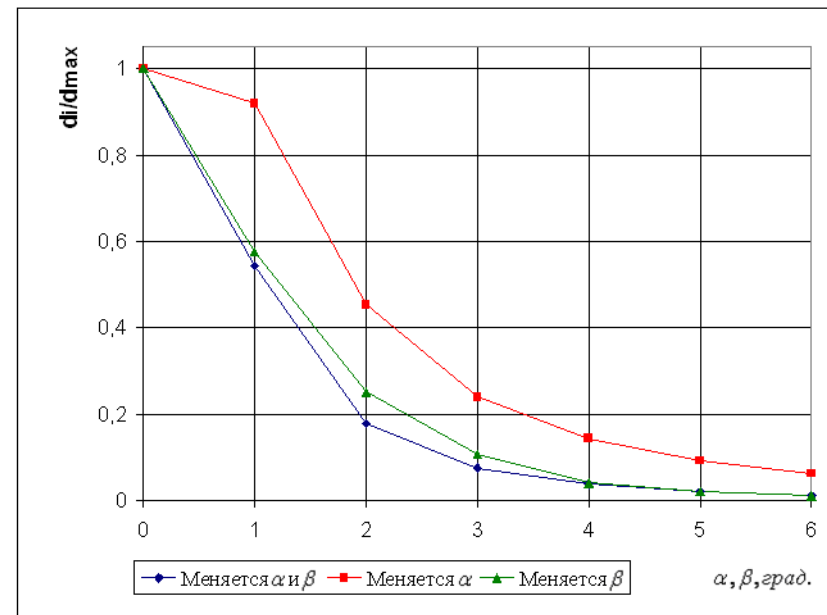


Рис.3. График зависимости долговечности стрелы в относительных единицах $\frac{d_i}{d_{max}}$ от углов раскачивания грузового каната в плоскости α и из плоскости β качания стрелы для максимальной грузоподъемной характеристики

5. Отклонение траектории перемещения груза от горизонтали оказывает на долговечность стрелового устройства существенно меньшее влияние, чем продольные и поперечные раскачивания грузового каната, возникающие при работе механизмов изменения вылета и поворота. Поэтому данный фактор имеет смысл учитывать только в тех случаях, когда углы отклонения канатов и динамические нагрузки снижены до минимума с помощью частотных приводов.

6. Масса стрелового устройства оказывает незначительное влияние на долговечность металлоконструкции стрелы и дает снижение долговечности, не превышающее разброс значений этого показателя, менее 20%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В настоящем диссертационном исследовании разработан ряд методических материалов, направленных на развитие и совершенствование методического обеспечения оценки долговечности и остаточного ресурса порталных кранов. Эти материалы восполняют пробелы в существующих подходах к решению указанной проблемы и являются новым научным результатом в области обеспечения надежности подъемно-транспортных машин.

Основные выводы и результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Разработана методика, алгоритм и программная реализация статистического моделирования эксплуатационной нагруженности элементов шарнирно-сочлененной стреловой системы порталного крана, которая позволяет учитывать геометрию и кинематику стреловой системы, динамические нагрузки и особенности систем управления приводами механизмов. Даны рекомендации по оценке параметров глобального цикла нагружения элементов конструкции для расчета на сопротивление усталости.

2. Разработана методика, алгоритм и программная реализация расчёта металлических конструкций стреловой системы на сопротивление усталости и определения их долговечности, которая может быть применена как на стадии проектирования конструкции и выбора конструктивных решений, так и при оценке остаточного ресурса кранов, отработавших нормативный срок службы. Данная методика использует результаты статистического моделирования эксплуатационной нагруженности конструкций.

3. На основании статистического анализа структуры циклического нагружения конструкции, создаваемого при совершении краном рабочего цикла, получены оценки коэффициента циклического нагружения ξ_c для элементов стреловой системы (стрелы, хобота). Применение этого коэффициента упрощает алгоритм прогнозирования долговечности конструкций.

4. С использованием разработанных методик и программ выполнен анализ влияния собственной массы стреловой системы, геометрических параметров траектории перемещения груза, динамических нагрузок, углов раскачивания грузовых канатов на долговечность стрелы и хобота. Результаты этого анализа дали основание утверждать, что наиболее существенное влияние на долговечность стрелы оказывают углы раскачивания грузовых канатов.

5. Анализ показал, что применение приводов с частотной системой управления, которое может обеспечить уменьшение углов отклонения и количества качаний грузовых канатов повысит долговечность элементов стреловой системы в $6 \div 7$ раз.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В рецензируемых журналах, входящих в реестр ВАК РФ:

1. **Некрасова А.В., Бортяков Д.Е., Соколов С.А.** Моделирование эксплуатационной нагруженности элементов порталных кранов. Научно-технические ведомости СПбГПУ. № 3' 2008. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПбГПУ. Изд-во Политехнического университета, член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России. С. 203-211.

В других изданиях:

2. **Некрасова А.В., Алексеенко Я.В., Соколов С.А., Бортяков Д.Е.** Методика оценки долговечности и определения остаточного ресурса элементов несущей конструкции порталного крана. Молодые ученые – промышленности Северо-Западного региона: Материалы конференции политехнического симпозиума, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С. 25-26.
3. **Некрасова А.В., Соколов С.А., Бортяков Д.Е.** Методика оценки долговечности и определения остаточного ресурса элементов несущей конструкции порталного крана. XXXVI Неделя науки СПбГПУ: Материалы межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. III. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. С. 89-90.
4. **Некрасова А.В.** Исследование эксплуатационной нагруженности и долговечности несущих конструкций порталных кранов. Тринадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотации научных работ победителей конкурса грантов Санкт-Петербурга 2008 года для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук. – СПб.: Фонд «ГАУДЕАМУС», 2008. С. 122.
5. **Некрасова А.В.** Прогнозирование долговечности несущих конструкций машин. Пятнадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотации научных работ победителей конкурса грантов Санкт-Петербурга 2010 года для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук. – СПб.: Фонд «ГАУДЕАМУС», 2010. С. 128.