

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Факультет «Политехнический заочный»  
Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой БЖД  
\_\_\_\_\_ / А.И. Сидоров /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Продление срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования  
и сооружений на опасных производственных объектах (на примере экскаватора  
ЭКГ-5А)

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 200301.2017.038 ПЗ ВКР

Руководитель работы, доцент  
\_\_\_\_\_ / А.В. Хашковский /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор работы  
студент группы ПЗ–559  
\_\_\_\_\_ / А.А. Дьячков /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролер, доцент  
\_\_\_\_\_ / А.В. Кудряшов /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

## АННОТАЦИЯ

Дьячков А.А. Продление срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах (на примере экскаватора ЭКГ-5А) –Челябинск: ЮУрГУ, 2017г., 62 стр., 18 ил., 15 табл., библиогр. список – 10 наим., альбом иллюстраций – 15 листов.

В работе выполнен анализ условий безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах. Выявлены тенденции производства электрических экскаваторов, а также проанализированы их техническое состояние, сроки службы и условия эксплуатации на опасных объектах.

Выполнен анализ нормативной документации по промышленной безопасности опасных производственных объектов. Изучены подходы к классификации опасных производственных объектов, а также основные факторы, приводящие к авариям, их организационные и технологические причины.

Рассмотрены вопросы обеспечения прочности ответственных деталей оборудования ОПО. Основное внимание уделено важнейшей проблеме обеспечения надежной работы машиностроительных конструкций, и, в частности, ответственных узлов экскаватора. Для этого выполнен анализ развития теоретических и экспериментальных методов оценки их прочности и выносливости.

Основная часть работы посвящена вопросам и этапам продления срока службы ответственных узлов оборудования ОПО. Проблема поэтапного продления срока службы существующего оборудования возникает в процессе проведения работ по оценке остаточного ресурса его основных несущих конструкций. Для этого изучены условия работы и повреждения ответственных узлов экскаватора ЭКГ-5А.

В результате с использованием предложенных методов был определен остаточный ресурс рамы экскаватора ЭКГ-5А. На основании проведения экспериментальных испытаний образцов экскаваторов, расчетов напряженно-деформированного состояния и ресурса основных несущих конструкций экскаваторов ЭКГ-5А были сделаны выводы по оценке ресурса основных несущих конструкций рам экскаваторов ЭКГ-5А.

					<b>20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР</b>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Дьячков А.А.			<i>Продление срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах (на примере экскаватора ЭКГ-5А)</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Пров.</i>		Хайковский А.В.					3	63
<i>Н. контр.</i>		Кудряшов А.В.				<b>ЮУрГУ Кафедра БЖД</b>		
<i>Утв.</i>		Сидоров А.И.						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ОПО.....	6
1.1 Классификация опасных производственных объектов .....	6
1.2 Безопасность эксплуатации оборудования ОПО .....	11
2 МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ .....	13
2.1 Методы исследования нагруженности ответственных узлов оборудования ОПО .....	13
2.2 Вопросы и этапы продления срока службы ответственных узлов оборудования ОПО .....	14
2.3 Методы оценки ресурса несущих конструкций ответственных элементов оборудования .....	17
3 НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-5А .....	29
3.1 Конструктивные особенности и характеристики экскаватора ЭКГ-5А..	26
3.2 Условия работы и повреждения ответственных узлов экскаватора ЭКГ-5А.....	32
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-5А..	37
4.1 Расчет удельных наработок экскаватора ЭКГ-5А.....	37
4.2 Воспроизведение натуральных импульсных воздействий на сложную податливую механическую конструкцию .....	48
4.3 Оценка остаточного ресурса экскаваторов ЭКГ-5А экспериментально-теоретическими методами .....	53
4.4 Оценка остаточного ресурса рамы экскаватора ЭКГ-5А .....	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	62
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	63

## ВВЕДЕНИЕ

Парк электрических экскаваторов, эксплуатируемых на горных предприятиях России, представлен моделями ЭКГ-5А, ЭКГ-12, ЭКГ-10, ЭКГ-15 и их модификациями.

В последнее десятилетие, учитывая мировые тенденции, отечественное машиностроение разработало новый типоразмерный ряд и приступило к производству электрических экскаваторов с ковшами вместимостью от 18 до 60 м<sup>3</sup>.

К настоящему времени 70% экскаваторов в горной промышленности России имеют сверхнормативный срок службы. Во многом работоспособность поддерживается за счет экскаваторов «доноров», эксплуатация которых уже прекратилась, но их узлы и агрегаты не выработали предельный ресурс эксплуатации и используются для поддержания работоспособности других экскаваторов. Большинство горнодобывающих предприятий стоят на пороге технического перевооружения или уже начали процесс выбора и приобретения новых современных моделей экскаваторов.

Для обоснования эффективности вложения инвестиций в новые экскаваторы необходимо понимание того, каков будет экономически целесообразный срок службы оборудования [5].

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

# 1 СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ОПО

## 1.1 Классификация опасных производственных объектов

В России понятие опасного производственного объекта и их классификация зафиксированы в законе [1]:

это предприятие, его цех, участок, площадка или другие производственные объекты на его территории, на которых:

1) получаются, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются ... опасные вещества следующих видов:

а) воспламеняющиеся вещества – газы, которые при нормальном давлении и в смеси с воздухом становятся воспламеняющимися и температура кипения которых при нормальном давлении составляет 20°С или ниже;

б) окисляющие вещества – вещества, поддерживающие горение, вызывающие воспламенение и (или) способствующие воспламенению других веществ в результате окислительно-восстановительной экзотермической реакции;

в) горючие вещества – жидкости, газы, способные самовозгораться, а также возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления;

г) взрывчатые вещества – вещества, которые при определенных видах внешнего воздействия способны на очень быстрое самораспространяющееся химическое превращение с выделением тепла и образованием газов;

д) токсичные вещества – вещества, способные при воздействии на живые организмы приводить к их гибели и имеющие следующие характеристики:

средняя смертельная доза при введении в желудок от 15 миллиграммов на килограмм до 200 миллиграммов на килограмм включительно;

средняя смертельная доза при нанесении на кожу от 50 миллиграммов на килограмм до 400 миллиграммов на килограмм включительно;

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

средняя смертельная концентрация в воздухе от 0,5 миллиграмма на литр до 2 миллиграммов на литр включительно;

е) высокотоксичные вещества – вещества, способные при воздействии на живые организмы приводить к их гибели и имеющие следующие характеристики:

средняя смертельная доза при введении в желудок не более 15 миллиграммов на килограмм;

средняя смертельная доза при нанесении на кожу не более 50 миллиграммов на килограмм;

средняя смертельная концентрация в воздухе не более 0,5 миллиграмма на литр;

ж) вещества, представляющие опасность для окружающей среды, - вещества, характеризующиеся в водной среде следующими показателями острой токсичности:

средняя смертельная доза при ингаляционном воздействии на рыбу в течение 96 часов не более 10 миллиграммов на литр;

средняя концентрация яда, вызывающая определенный эффект при воздействии на дафнии в течение 48 часов, не более 10 миллиграммов на литр;

средняя ингибирующая концентрация при воздействии на водоросли в течение 72 часов не более 10 миллиграммов на литр;

2) используется оборудование, работающее под избыточным давлением более 0,07 мегапаскаля:

а) пара, газа (в газообразном, сжиженном состоянии);

б) воды при температуре нагрева более 115°С;

в) иных жидкостей при температуре, превышающей температуру их кипения при избыточном давлении 0,07 мегапаскаля;

3) используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы (за исключением лифтов, подъемных платформ для инвалидов), эскалаторы в метрополитенах, канатные дороги, фуникулеры;

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

4) получают, транспортируются, используются расплавы черных и цветных металлов, сплавы на основе этих расплавов с применением оборудования, рассчитанного на максимальное количество расплава 500 килограммов и более;

5) ведутся горные работы (за исключением добычи общераспространённых полезных ископаемых и разработки россыпных месторождений полезных ископаемых, осуществляемых открытым способом без применения взрывных работ), работы по обогащению полезных ископаемых;

б) осуществляется хранение или переработка растительного сырья, в процессе которых образуются взрывоопасные пылевоздушные смеси, способные самовозгораться, возгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления, а также осуществляется хранение зерна, продуктов его переработки и комбикормового сырья, склонных к самосогреванию и самовозгоранию.

К опасным производственным объектам не относятся объекты электросетевого хозяйства.

Существуют различные принципы классификации предприятий. Для отнесения объектов в составе организации по определенным признакам к категории опасного производственного объекта и определение его типа осуществляется их идентификация.

Идентификация преследует цели:

- 1) выявление признаков опасности, характерных для производственного объекта;
- 2) отнесение объекта к определенной категории промышленной опасности;
- 3) определение типа объекта по страховому признаку.

В процессе идентификации опасных производственных объектов, необходимо руководствоваться следующими принципами:

Принцип зонирования – объединение всех выявленных опасных производственных объектов в составе организации, при этом в качестве объединяющего критерия может использоваться производственная площадка (или производственное здание), на которой осуществляются технологические процессы. Как правило,

в качестве опасного производственного объекта выделяется предприятие, расположенное на одной производственной площадке. При этом опасным производственным объектом считается не отдельный механизм, оборудование, емкость с опасным веществом, а производственный объект, на котором используется такое техническое устройство или такое вещество. В случае, если предприятие размещено на нескольких производственных площадках, удаленных друг от друга на расстояние более 500 м, каждая из площадок рассматривается как отдельный опасный производственный объект. Если предприятие эксплуатирует несколько объектов и лишь один из них обладает признаками опасности, то следует рассматривать в качестве опасного этот объект, а не предприятие в целом.

Принцип полноты и достоверности – выявление и фиксирование всех признаков опасности и типов каждого опасного производственного объекта в составе организации.

Принцип поглощения – выделение объекта, обладающего несколькими признаками опасности, относящимися к разным типам, что является основанием для отнесения его к наиболее высокому из этих типов.

Принцип независимости – наличие на объекте нескольких признаков III типа опасных производственных объектов (наличие стационарно установленных грузоподъемных механизмов, независимо от их количества, и использование оборудования, работающего под давлением более 0,07 МПа, также независимо от их количества).

Идентификация опасного производственного объекта проводится организацией, эксплуатирующей эти объекты, или экспертной организацией, имеющей лицензию на проведение экспертизы промышленной безопасности в части идентификации опасных производственных объектов.

Идентификация может проводиться также организациями, которым федеральными органами исполнительной власти предоставлено право проведения идентификации в пределах их компетенции.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Идентификация опасного производственного объекта производится на основе анализа состава предприятия, проектной документации, деклараций промышленной безопасности, технологических регламентов и других документов, связанных с эксплуатацией опасных производственных объектов [6].

Государственный горный надзор и государственный пожарный надзор на объектах добычи и переработки минерального сырья, а также на объектах подземного строительства осуществляется Федеральной службой по экологическому, технологическому атомному надзору. Он осуществляется более чем в 5,5 тыс. организациях, при этом общее количество таких объектов составляет около 15 тысяч. Под надзором находятся около 300 подземных рудников, 6 тыс. карьеров по добыче руды организаций черной, цветной металлургии и золотодобывающей промышленности, 2 тыс. обогатительных, дробильно-сортировочных фабрик по первичной переработке общераспространенных полезных ископаемых и агломерационных фабрик, 300 объектов подземного строительства транспортного и специального назначения, а также карьеры по добыче общераспространенных полезных ископаемых.

Основные факторы, приводящие к авариям:

- механические травмы от обрушения горных пород при ведении горных работ, 80%;
- неисправность технических устройств, 13%;

Организационные причины:

- неправильная организация производства горных работ, 9%;
- неэффективность производственного контроля, 57%;
- низкий уровень знаний промышленной безопасности, 11%;
- нарушение производственной дисциплины, 23%.

Главные технологические причины: нарушение технологии производства, неэффективность производственного контроля 56-57%, дисциплина 27% [6].

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

## 1.2 Безопасность эксплуатации оборудования ОПО

В период с 1980 по 2011 года на горнодобывающие предприятия РФ и других стран СНГ было поставлено 5644 одноковшовых электрических экскаваторов, оснащенных ковшами вместимостью от 4,6 до 42 м<sup>3</sup>. Несмотря на резкое сокращение производства электрических экскаваторов в начале 1990-х годов (рисунок 1.1), их парк занимает значительное место в структуре комплексной механизации горных предприятий России, ведущих разработку месторождений открытым способом.

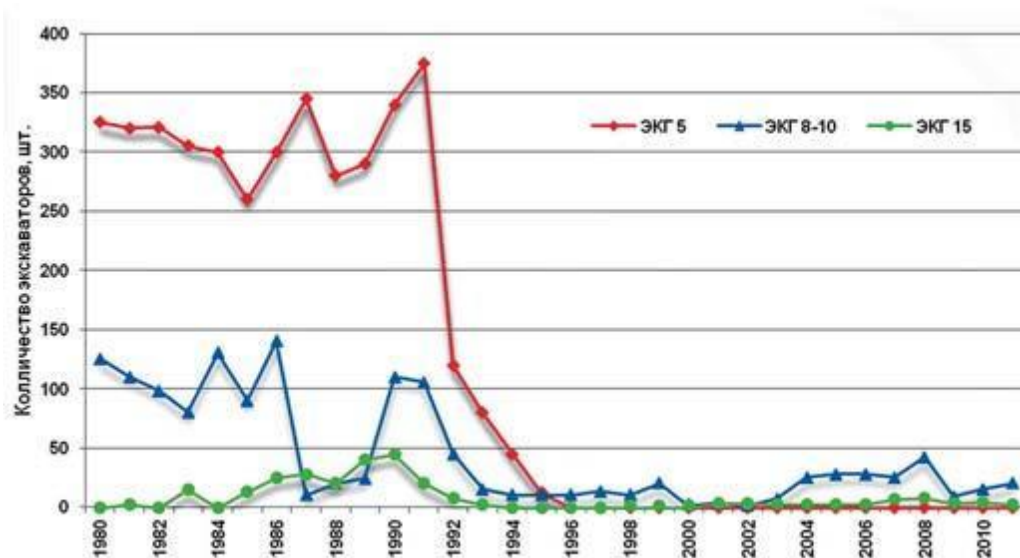


Рисунок 1.1 – Динамика производства и импорта в РФ и другие страны СНГ основных типоразмеров карьерных одноковшовых экскаваторов с электрическим приводом в период 1980–2011 годов

Срок службы техники (период до списания) Тсс – период эксплуатации техники, при котором дальнейшая эксплуатация техники невозможна по условиям безопасности или экономически нецелесообразна.

Срок службы экскаваторов зависит от природно-технологических условий эксплуатации, от уровня технического сервиса, обеспечиваемого на конкретном предприятии, а также от соблюдения правил технической эксплуатации машин.

Природно-технологических условия оказывают существенное влияние на процессы, протекающие в экскаваторе, то есть на ресурс наработки узлов и агрегатов до ремонта или замены и на долговечность несущих элементов (платформа, рама ходовой, стрела). Эксплуатация экскаваторов сопровождается разрушением деталей, их взаимным перемещением, трением, нагревом, химическим преобразованием, изменением в процессе работы физических величин и конструктивных параметров (размеров, взаимностью расположения и т.д.) [5].

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

## 2 МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ

### 2.1 Методы исследования нагруженности ответственных узлов оборудования ОПО

Вопросы обеспечения прочности ответственных деталей оборудования ОПО являются важными и требующими детального изучения, так как это непосредственно влияет на безопасность эксплуатации технических устройств.

Одной из важнейших проблем обеспечения надежной работы машиностроительных конструкций, и, в частности, ответственных узлов экскаватора является развитие теоретических и экспериментальных методов оценки их прочности и выносливости. Основные направления развития теории выносливости на сегодняшний день можно охарактеризовать следующим образом:

теоретические исследования механизма разрушения материалов и конструкций, направленные на установление связи микро- и макроструктуры материала с его сопротивлением циклическому нагружению;

исследование закономерностей усталостного разрушения материалов и конструкций, а также разработка способов повышения их выносливости в конкретных условиях эксплуатации.

Согласно установившейся терминологии [2], долговечность несущих конструкций – это свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе его обслуживания и ремонта. Количественно долговечность характеризуется ресурсом, то есть наработкой объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние, когда его дальнейшая эксплуатация невозможна или нецелесообразна. Ресурс в единицах времени представляет собой срок службы,

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

а ресурс с момента проведения контроля прочности и долговечности конструкции представляет собой ее остаточный ресурс.

Несущие конструкции карьерных экскаваторов находятся в продолжительной эксплуатации, поэтому, исключая случаи аварийного нагружения для них характерна многоцикловая усталость, когда количество циклов до разрушения значительно превышает 10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup> и время развития трещины до разрушения мало в сравнении со временем до ее образования.

Таким образом, определение ресурса несущих конструкций экскаваторов сводится к их расчету на усталость при случайных нагрузках.

Основным принципом расчета срока службы конструкции является сопоставление предела ее сопротивления усталости с динамическими нагрузками, которые действуют на нее в процессе эксплуатации.

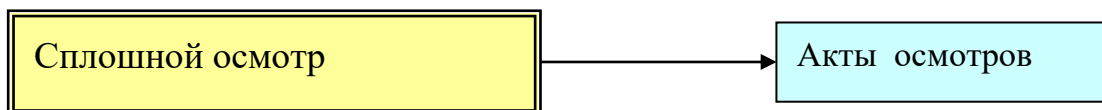
## 2.2 Вопросы и этапы продления срока службы ответственных узлов оборудования ОПО

Проблема поэтапного продления срока службы существующего оборудования возникает в процессе проведения работ по оценке остаточного ресурса его основных несущих конструкций. Необходимость такого подхода обусловлена тем, что оборудование ОПО не может быть одновременно допущено к сверхнормативной эксплуатации без проведения капитального ремонта с продлением срока службы. Система поэтапного продления срока службы (рисунок 2.1) представлена многоуровневым текущим контролем состояния ответственных узлов, позволяющим обеспечить его правомерную эксплуатацию до проведения капитального ремонта.

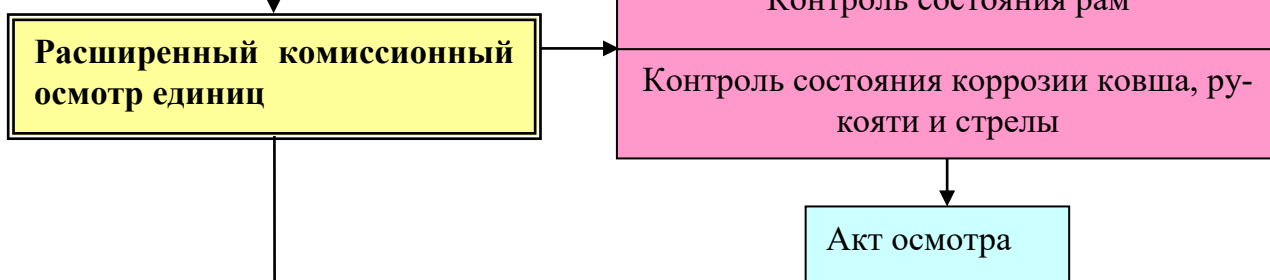
Более того, задача индивидуальной оценки надежности и ресурса конструкций является условно – корректной [3]. Это обусловлено самим характером зависимостей (степенная, экспоненциальная и подобные им), описывающих кривые

выносливости, когда малым приращениям нагрузки или напряжения соответствуют большие изменения долговечности в циклах.

Этап 1.



Этап 2.



Этап 3.

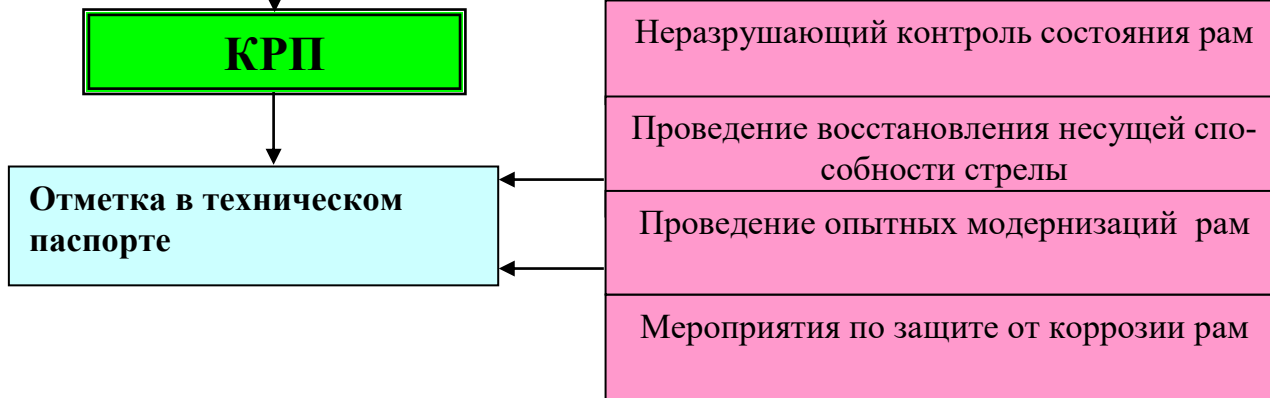


Рисунок 2.1 – Типичный порядок проведения работ по поэтапному продлению срока службы основных ответственных узлов

Например, для сварных конструкций погрешность оценки напряжения в 4–5% соответствует ошибке оценивания ресурса в 17–22%. Поэтому, в сочетании с теоретическими и экспериментальными методами оценки ресурса применяется индивидуальный неразрушающий контроль их состояния путем технической диагностики, что является одним из важных аспектов поэтапного продления сроков службы.

В настоящее время применяются два основных подхода к продлению срока службы несущих конструкций локомотивов:

Оценка предельно возможного срока эксплуатации несущих конструкций тягового подвижного состава. При этом продление срока службы достигается за счет более точного расчета остаточного ресурса, основанного на данных эксплуатации, современных экспериментальных и теоретических методах. Такое продление срока службы выполняется одноразово для определенного типа ТПС;

Поэтапное продление срока службы несущих конструкций ТПС при условии выполнения требуемых модернизаций и ограничений в процессе их эксплуатации. Такое продление срока службы выполняется для тягового подвижного состава, имевшего случаи разрушений в процессе эксплуатации, и рассматривается как временная мера для поддержания работоспособности парка до выполнения работ, радикально увеличивающих ресурс несущих конструкций.

Процесс жизни металлоконструкции при циклическом нагружении представляет собой динамический баланс между факторами, каждый из которых имеет случайный характер:

Изначальными (в смысле прочности) свойствами конструкции, приданными ей в процессе ее изготовления и технологической обработки;

Изменениями первоначального состояния конструкции, вносимыми при ремонте конструкции, а также ее модернизациях;

Изменениями состояния, обусловленными длительным влиянием окружающей среды;

Комплексом действующих на металлоконструкцию нагрузок (статических и циклических, расчетных и сверхнормативных).

В результате проведения ускоренных стендовых вибрационных испытаний рам, как правило, выявляются слабые элементы их конструкции, которые подлежат усиленному контролю на период сверхнормативной эксплуатации.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

### 2.3 Методы оценки ресурса несущих конструкций ответственных элементов оборудования

Существует два подхода при установлении критического состояния металлоконструкций горной машины требующей капитального ремонта либо замены всей конструкции: первый – использование нормативного срока эксплуатации, второй – использование объема переработанной горной массы.

Первый подход основан на среднестатистических данных об эксплуатационных свойствах экскаваторов в зависимости от срока их работы, при этом не учитываются горнотехнические условия эксплуатации, включающие время простоев на ремонте или консервации, замена отдельных элементов конструкции или полное их обновление.

Второй подход основан на среднестатистических данных об эксплуатационных свойствах экскаватора при переработке объема горной массы. Не учитывается фактическое состояние металлоконструкций, интенсивность их износа в зависимости от технологических факторов, включающих физико-механические свойства взорванной горной породы и качество подготовки к экскавации

Износ металлоконструкций в первую очередь определяется:

а) некачественной подготовкой горных пород взрывом, характеризующейся большим средним диаметром куска породы в развале, низким коэффициентом разрыхления пород, большим числом негабаритных кусков породы;

б) эксплуатацией экскаватора при наличии смерзшейся породы или глины в зимний период или при особо низких температурах;

в) несвоевременным ремонтом и диагностическим контролем;

г) эксплуатацией экскаватора с нарушением правил безопасности работ.

Износ металлоконструкций сопровождается накоплением дислокаций и микроразрывов в основном металле и сварных швах металлоконструкции в результате многоциклового усталости, приводящим к образованию трещин,

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17



накоплением макроповреждений при малоцикловых пластических деформациях, накоплением макродефектов в сварных швах при проведении ремонтных работ и образованию искусственно созданных концентраторов напряжений при наложении усиливающих накладок, косынок и пр.

Все это приводит к повышению скорости образования трещин, увеличению их числа и ускорению их роста, и, таким образом, сокращает период безопасной эксплуатации экскаватора и межосмотровый период.

Критическое состояние металлоконструкций экскаваторов наступает в момент, когда скорость роста трещин в ходе нормальной эксплуатации экскаватора достигает критической величины.

В связи с этим, под критическим состоянием металлоконструкций экскаватора, понимается уровень их повреждения, который приводит к недопустимому увеличению средней скорости роста трещин из типичных трещиноподобных дефектов.

Под уровнем приближения к критическому состоянию понимается отношение скорости роста трещин на момент обследования к скорости роста в начальный период эксплуатации, полученным для тех же условий. Скорость трещин в начальный период эксплуатации экскаваторов определяется по протоколам ультразвукового контроля этого периода или расчетным способом.

Под недопустимой (критической) средней скоростью роста трещины следует понимать такую скорость, которая позволяет стандартным допускаемым трещиноподобным дефектам развиваться в трещину от начального размера до критического за период меньший, чем межосмотровый. При этом условия эксплуатации должны быть обычными и незначительно отличаться от предшествующих. При определении величины недопустимой скорости роста трещины должен учитываться коэффициент запаса по долговечности. При этом условия эксплуатации должны быть обычными и незначительно отличаться от предшествующих. Межосмотровый период, согласно заводским требованиям, составляет 6 месяцев.

Учитывая понятие критического состояния металлоконструкций экскаватора, наиболее применимыми оказываются четыре критерия экономический,

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

надежностный, технологический и технический. Основными из них являются первые два, а остальные – вспомогательными.

Экономический критерий заключается в том, что теоретически экскаватор может безопасно работать неограниченный срок. Однако, для поддержания уровня безопасности необходимо проводить своевременные ремонты и замену частей. В связи с накоплением повреждений в металлоконструкциях экскаватора во время его эксплуатации, увеличением скорости роста трещин, сокращением времени подрастания трещиноподобных дефектов от допускаемых размеров до критических, возникает потребность уменьшения межосмотровых периодов.

Увеличение частоты осмотров и ремонтов металлоконструкций приводит к уменьшению прибыли и увеличению затрат, т.е. изменению баланса между этими показателями в худшую сторону. В момент, когда межремонтный период становится очень коротким затраты на ремонт могут превысить прибыль от эксплуатации экскаватора, в этот момент становится экономически выгодным экскаватор списать и приобрести новый.

Под надежностным критерием понимают использование параметров надежности для косвенной оценки состояния металлоконструкций. Такими параметрами могут быть коэффициенты готовности, ремонтпригодности, использования, среднее число отказов, поток отказов, наработки на отказ, отказов и простоев, вероятность безотказной работы и т.д. Для использования этих параметров необходимо проводить длительные наблюдения за работой экскаваторов и выполнить анализ документации за большой период времени. Для конкретного экскаватора исследуются параметры за весь период эксплуатации. По полученным данным строятся графики изменения этих параметров. Эти графики имеют пологий вид в течение почти всего периода эксплуатации с определенными скачкообразными изменениями исследуемого параметра после ремонтов. Однако в момент достижения критического состояния происходит резкое устойчивое изменение параметра: либо подрастание, либо уменьшение. Этот момент и является критерием списания экскаватора, полностью соответствуя экономическому критерию.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Под технологическим критерием понимаем момент резкого снижения производительности экскаваторов.

Достоинством методов является отсутствие необходимости производить непосредственные замеры параметров на площадке работы экскаватора, исключают его даже временную остановку.

Экономический критерий является основным, все остальные критерии являются вспомогательными или косвенными. Согласно ему, эксплуатация экскаватора с межосмотровым периодом и ремонтом металлоконструкций меньше полугода экономически не выгодна.

Экономический, надежностный и технологический критерии очень трудоемки и требуют для анализа большое число документов за достаточно большой период эксплуатации. Требуется вычисление параметров надежности и производительности за длительный срок. А, главное, они не учитывают реального состояния металлоконструкций и не позволяют это сделать непосредственно. С их помощью можно опосредованно определить момент экономической целесообразности списания экскаватора, но критерием безопасной эксплуатации они не являются.

В качестве критерия, способного оценить фактическое техническое состояние металлоконструкций экскаватора, возможность их безопасной эксплуатации или необходимость списания является технический критерий. Этот критерий напрямую позволяет определять изменение долговечности металлоконструкций экскаваторов. Метод основан на определении расчетного периода роста трещины и сравнении его с фактическим.

С накоплением повреждений от периода к периоду будет происходить увеличение скорости роста трещин в одних и тех же зонах металлоконструкции при одних и тех же условиях эксплуатации, и уменьшаться срок их подрастания от начального размера до критического. Отношение фактического срока роста трещины к расчетному – есть коэффициент уменьшения долговечности.

В случае, если фактическая скорость роста трещин позволит им вырасти до опасного состояния за период меньше чем полгода, то эту скорость можно

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

признать опасной. Metalлоконструкции, в которых трещины растут с такой скоростью, должны быть заменены.

К сожалению, опасная скорость не может быть выражена абсолютными величинами, что связано с большим числом вариантов развития трещин, их расположением и размерами. Эта скорость определяется расчетным путем в зависимости от условий эксплуатации и фактического напряженно-деформированного состояния металлоконструкций в зоне роста трещины.

По скорости роста трещины определяется ее расчетный размер за межосмотровый период. Он сравнивается с фактическим размером трещины, определенным неразрушающими методами контроля – ультразвуковой дефектоскопией (УЗД) и акустической эмиссией (АЭ). Отношение фактической длины трещины к расчетной, также является коэффициентом уменьшения долговечности. По скорости уменьшения долговечности определяемой за несколько лет на основе технических отчетов по результатам УЗД можно прогнозировать момент ее исчерпания. Определение в процессе экспертной оценки текущего состояния и срока дальнейшей безопасной эксплуатации (остаточного ресурса) металлических конструкций производится в соответствии с разработанной методикой, алгоритм которых смотреть на рисунках 2.2, 2.3.

Величина недопустимой средней скорости роста трещины должна определяться с учетом коэффициента запаса по долговечности.

Разработанная методика позволяет определять долговечность металлоконструкций экскаваторов и остаточный ресурс (срок безопасной эксплуатации) при наличии в них трещиноподобных дефектов на любой стадии работы и при любом уровне поврежденности микродефектами [7].

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

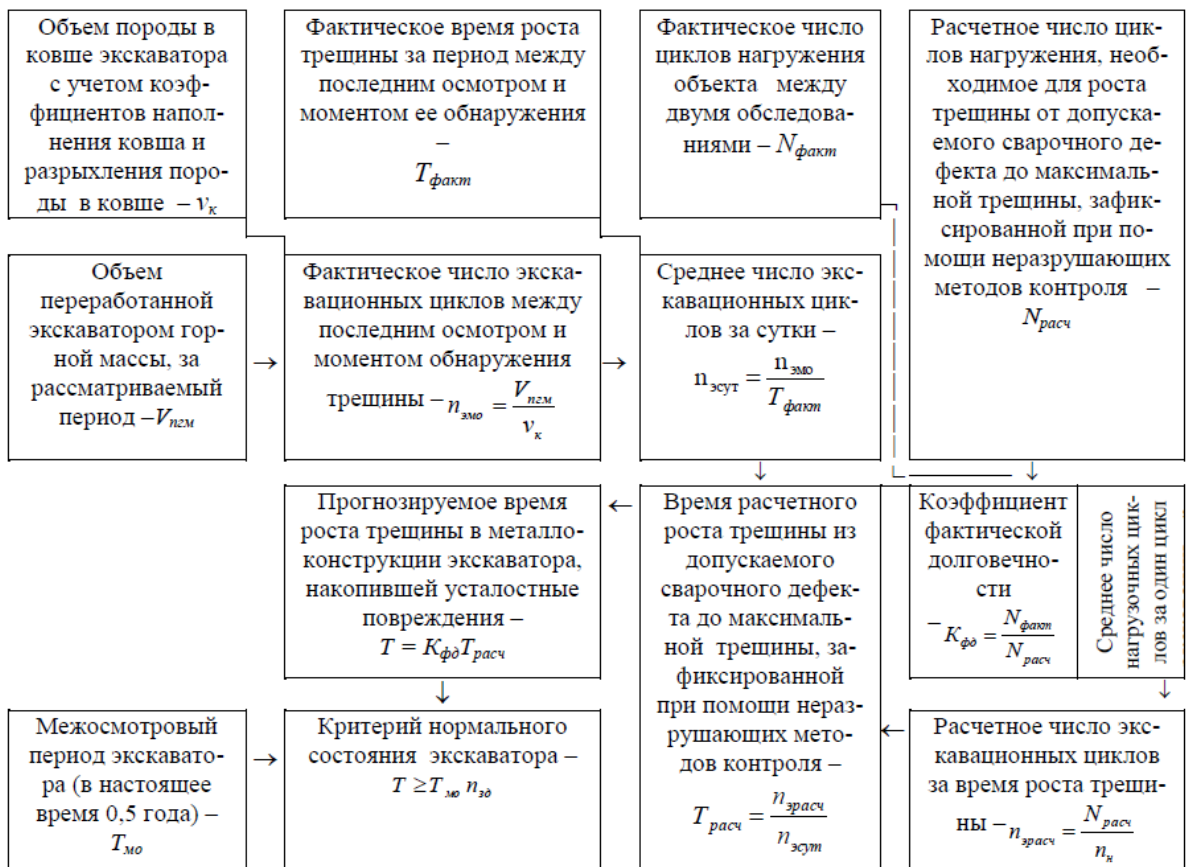


Рисунок 2.2 – Схема оценки текущего состояния металлоконструкций горной машины



Рисунок 2.3 – Схема оценки остаточного ресурса (срока безопасной эксплуатации)

На рисунке 2.4 приведена блок-схема метода обобщенной экспериментально - теоретической оценки характеристик долговечности несущих конструкций ответственных узлов оборудования ОПО.

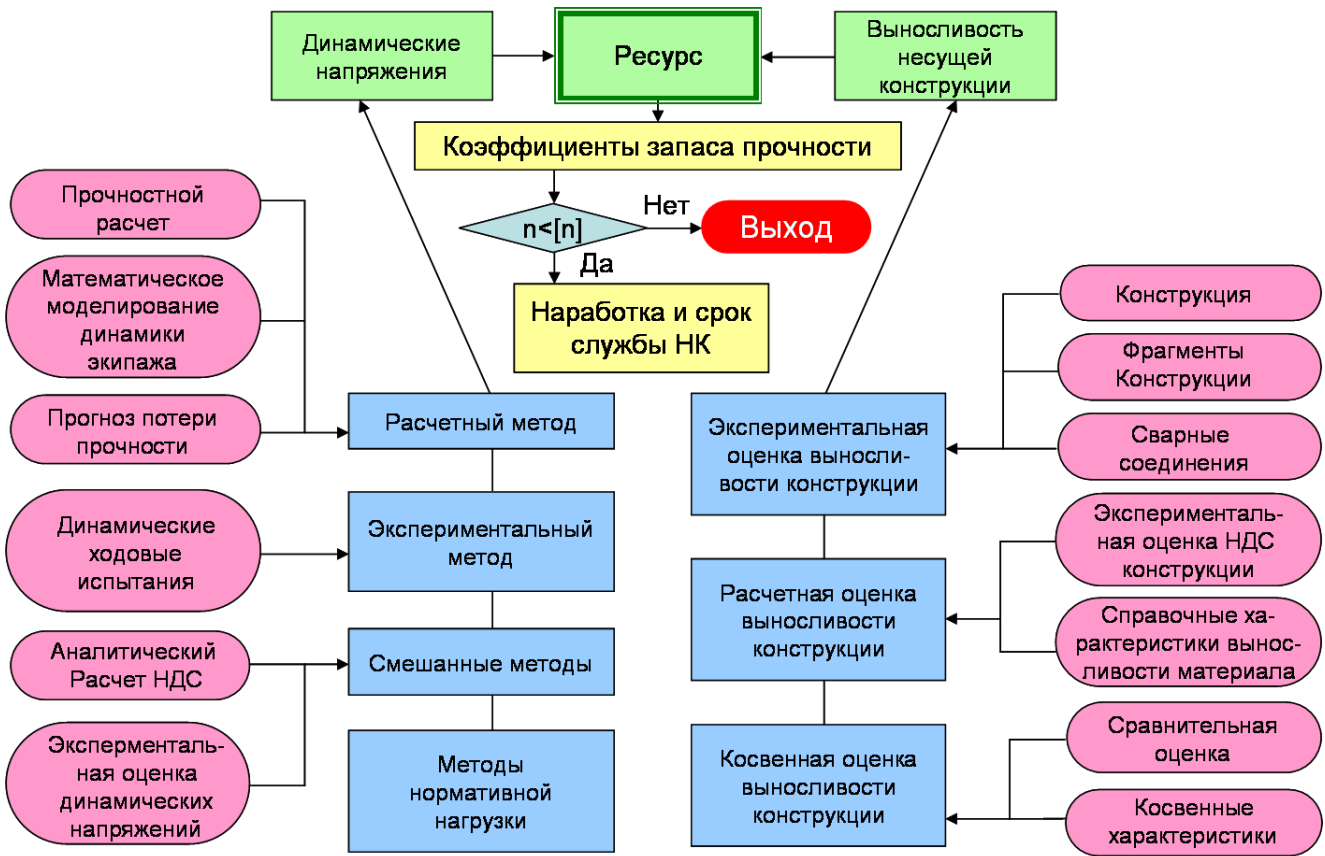


Рисунок 2.4 – Обобщенная схема метода расчетно-экспериментальной оценки ресурса несущих конструкций подвижного состава

Несущие конструкции имеют три основные характеристики долговечности: ресурс и живучесть, выражаемые в наработке, а также срок службы, измеряемый в единицах времени. Нарботка наиболее часто оценивается также в единицах времени.

Нарботка в нагрузках и циклах нагружения служит основой для дальнейшей оценки ресурса и срока службы. В качестве меры наработки для дальнейшего рассмотрения принимается величина  $D$ , основанная на степенной кривой усталости Веллера.

$$\dot{D} = \sum_{i=1}^k s_i^m n_i = const, \quad (2.1)$$

где  $\dot{D}$  – дискретная форма меры наработки НК;

$k$  – количество разрядов (квантилей) силового фактора;

$s_i$  –  $i$ -й разряд силового фактора, в качестве которого может выступать напряжение в НК, усилие, перемещение в рессорном комплекте или любой иной фактор, коррелированный с разрушающим напряжением в НК;

$m$  – показатель степени кривой выносливости НК;

$n_i$  – количество циклов нагружения при значении силового фактора  $s_i$ .

Ресурс (общий или остаточный)  $D_{\max}$ , который выражается в объеме наработки до перехода НК в предельное состояние, который также может быть получен из параметров кривой выносливости для несущих конструкций. Указанная кривая может быть построена экспериментально.

Ресурс конструкции дифференцируют [4] как:

– технический, то есть такой, когда предельное состояние НК наступает в результате потери ее несущей способности от полученной в процессе эксплуатации наработки, с учетом факторов, влияющих на его величину

– назначенный, определяемый из величины физического ресурса с учетом экономических, технических и иных факторов, способных повлиять на эту величину.

Назначенный ресурс всегда меньше физического.

Для сварных или лито-сварных конструкций наиболее вероятным местом разрушения является сварной шов или околошовная зона термического влияния сварки. Поэтому одним из способов оценки выносливости конструкции является испытание на выносливость образцов сварных соединений. При этом указанные образцы должны быть выполнены соблюдением технологии, которая используется при постройке конструкции. К недостатку метода также относится то, что в реальной эксплуатации конструкции сварные соединения работают в условиях

сложного напряженного состояния, реализация которого в лабораторных условиях практически невозможна. Единственное исключение можно сделать для стыковых или фланговых соединений, расположенных на несущих полках основных НК, работающих преимущественно в условиях растяжения – сжатия.

Один из возможных способов снижения себестоимости испытаний на выносливость представлен здесь расчетным методом оценки выносливости НК. При этом разрушающие напряжения оцениваются путем расчета НДС конструкции с применением подробных математических моделей метода конечных элементов (МКЭ) или иного подходящего метода, позволяющего определять компоненты напряженно – деформированного состояния (НДС) с учетом влияния на них геометрических концентраторов напряжений. Влияние состояния поверхности и технологических факторов оценивается на основании справочной информации Норм или проводимых отдельно экспериментальных исследований. Указанные поправки входят в коэффициенты пересчета характеристик выносливости материала к конструкции. Характеристики выносливости материала могут быть оценены экспериментально по испытаниям стандартных образцов или приняты по их справочным значениям.

К преимуществам данного метода оценки выносливости несущих конструкций можно отнести:

- сравнительно низкая стоимость проведения экспериментальных работ;
- возможность ускорения испытаний образцов материала путем максимально возможного повышения частоты их нагружения.

К недостаткам метода можно отнести:

- существенное влияние человеческого фактора при проведении аналитических прочностных расчетов конструкций;
- наличие большого количества факторов, которые непосредственно не учитываются при использовании данного метода, что приводит к дополнительному занижению расчетных оценок срока службы за счет использования справочных величин.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



### 3 НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-5А

#### 3.1 Конструктивные особенности и характеристики экскаватора ЭКГ-5А

Наиболее характерными представителями выемочно-погрузочных машин, эксплуатируемых на открытых разработках горнодобывающего предприятия, являются одноковшовые и многоковшовые экскаваторы. Экскаватором называется машина, предназначенная для зачерпывания (экскавации) горной массы, перемещения ее на относительно небольшие расстояния и погрузки на транспортные средства или в отвал. Рабочий цикл одноковшового экскаватора складывается из четырех последовательных операций: наполнения ковша (черпания), перемещения его к месту разгрузки (транспортирования), разгрузки и перемещения порожнего ковша к месту зачерпывания для воспроизведения нового цикла. Поэтому одноковшовые экскаваторы являются машинами циклического (прерывного) действия. В отличие от них многоковшовые экскаваторы, у которых все элементы рабочего цикла осуществляются одновременно (совмещенно), являются машинами непрерывного действия.

Любой экскаватор, одноковшовый или многоковшовый, состоит из рабочего (у одноковшовых экскаваторов оно же и транспортирующее), транспортирующего, механического, включающего главным образом передаточные механизмы (трансмиссии), ходового и силового оборудования, а также механизмов управления, металлоконструкций платформы и надстройки, рама.

Конструктивной схемой, в отличие от кинематической, называют схематическое изображение всей машины или ее основных узлов с указанием их действительного взаимного расположения и кинематической связи. Одним из главных признаков различия одноковшовых экскаваторов, определяющих их назначение и область применения, является рабочее оборудование (исполнительный механизм). В зависимости от назначения рабочее оборудование одноковшовых экскаваторов

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

имеет различную конструкцию и кинематику. На универсальных экскаваторах могут применяться до десяти видов сменного рабочего оборудования. Однако экскаваторы, используемые на открытых горных разработках, имеют, как правило, один основной вид специализированного рабочего оборудования. Основные виды рабочего оборудования одноковшовых экскаваторов, применяемого на открытых работах – прямая напорная лопата и драглайн; более ограниченно используют гидравлические прямые и обратные лопаты, ковшовые погрузчики, грейфер, струг и кран. Известны четыре вида рабочего оборудования прямой напорной лопаты; прямая с выдвижной рукоятью, коленно-рычажная, рычажная типа «Супер-фронт» и гидравлическая. Напорная лопата имеет систему принудительной подачи рукояти и ковша в забой, действующую от какого-либо привода.

ЭКГ-5А – электрическая карьерная полноповоротная механическая лопата (рисунок 3.1) на гусеничном ходу, предназначенная для выемки и погрузки в транспортные средства полезных ископаемых и вскрышных пород, в том числе тяжелых скальных, предварительно разрыхленных взрывом. Применяется на открытых горных работах в рудной и угольной промышленности, а также в карьерах промышленности строительных материалов, при строительстве промышленных, гидротехнических и других сооружений.



Рисунок 3.1 – Общий вид экскаватора ЭКГ-5А

Экскаватор ЭКГ-5А является модификацией ранее выпущенных моделей ЭКГ-4.6Б, ЭКГ-4.6А, ЭКГ-4.6

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

Экскаватор ЭКГ-5А состоит из рабочего оборудования, поворотной платформы с механизмами и ходовой. В рабочее оборудование входят: ковш, рукоять, стрела с напорным механизмом, двуногая стойка и механизм открывания ковша.

Технические характеристики:

Параметры	ЭКГ-5А
Вместимость ковша, м <sup>3</sup>	4,6–6,3
Радиус черпания наибольший, м	14,5
Радиус черпания на уровне стояния, м	9,04
Высота черпания наибольшая, м	10,3
Радиус выгрузки наибольший, м	12,65
Радиус хвостовой части, м	5,25
Высота выгрузки наибольшая, м	6,7
Просвет под поворотной платформой, м	1,85
Среднее удельное давление на грунт при передвижении, кгс/см <sup>2</sup>	2,1/1,72/1,3
Среднее удельное давление на грунт при передвижении, кПа	205/162/127
Расчетная продолжительность цикла при угле поворота 90°), с	23
Напряжение питающей сети, кВ	3; 3,3; 6; 6,6
Тип электропривода	Г-Д с МУ
Мощность сетевого двигателя, кВт	250
Масса рабочая, т	196

Поворотная платформа состоит из основной рамы, к которой по бокам крепятся две площадки, а сзади корпус противовеса. На поворотной платформе

установлены подъемная лебёдка, два редуктора поворота, компрессорная установка, трансформатор, и высоковольтное распределительное устройство.

На корпусе противовеса установлен пятимашинный преобразовательный агрегат. Под поворотной платформой крепится стреловая лебедка. Все механизмы на платформе закрыты рамой. Для удобства монтажных работ, при ремонтах механизмов на платформе, кровля рама имеет съемные панели. Справа в передней части платформы устанавливается кабина машиниста и станция управления. В кабине сосредоточены органы управления экскаватором и контрольная аппаратура.

Поворотная платформа опирается на ходовую через опорно-поворотное устройство, состоящее из зубчатого венца и роликового круга, заключенного между двумя рельсами. Кроме того, поворотная платформа соединена с ходовой центральной цапфой. Между поворотной платформой и нижней рамой, расположен высоковольтный кольцевой токоприемник. На поворотной платформе также установлено рабочее оборудование.

Ходовая состоит из сварной нижней рамы, к которой с двух сторон прикреплены: гусеничные рамы с колесами и гусеничными цепями. На задней стенке расположен ходовой механизм, служащий для перемещения экскаватора. Поворотная рама, корпус противовеса, корпус стрелы и нижняя рама представляют сварные комбинированные металлоконструкции, состоящие из отливок и металлических листов.

Основные механизмы экскаватора (подъема, поворота, напора и хода), а также механизм открывания ковша приводятся в движение двигателями постоянного тока, а вспомогательные механизмы двигателями переменного тока.

Тормозы подъемной лебедки, поворотного и напорного механизмов управляются при помощи сжатого воздуха, подаваемого компрессорной установкой. На ходовой имеется гидравлическая система, управляющая тормозом ходового механизма и муфтами переключения гусениц.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

Конструктивные особенности:

– реечный напорный механизм с двухбалочной рукоятью и цельносварной стрелой коробчатого сечения обеспечивает лучшую отработку тяжелых скальных забоев крупнокусовой или плохо взорванной горной массы;

– подъем ковша канатный, бесполиспастного типа с автоматическим выравниванием усилий в ветвях подъемного каната;

– ковш, сварно-литой с клиновым самозатягивающимся креплением зубьев. Свободно падающее днище ковша с широко расставленными петлями, исключая динамический контакт с рукоятью;

– экскаваторы оборудованы стрелоподъемной лебедкой, облегчающей ремонтно-монтажные работы;

– вентиляционные установки обеспечивают нагнетание в раму воздуха, и создание избыточное давление воздуха в раме;

– тормоза основных механизмов колодочного типа с пневматическим приводом для растормаживания;

– ходовая – двухгусеничная. Гусеничный ход открытого малоопорного типа с отдельным приводом каждой гусеницы обеспечивает доступность для осмотра и ремонтов. Ведущие колеса («звездочки»), имеющие сменные кулаки, подняты и освобождены от опорных реакций. Натяжение гусеничных лент осуществляется с помощью встроенных гидроцилиндров. На ходовых двигателях применена принудительная вентиляция;

– основные металлоконструкции экскаватора изготавливаются из легированной стали, стрела и рукоять – из высокопрочной стали.

– главные механизмы экскаватора имеют индивидуальный регулируемый электропривод;

– автоматическая система смазки сокращает до минимума затраты на техническое обслуживание экскаватора в процессе эксплуатации.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### Габаритные размеры и масса основных узлов и агрегатов

Наименование узла (агрегата)	Номер чертежа	Масса, тн	Длина, м	Ширина, м	Высота, м
Ковш	-	9,935	2,45	2,19	2,56
Рукоять	-	7.950	7.915	1.774	-
Стрела с головными блоками	-	17.14	11.15	-	-
Двуногая стойка	-	3.48	6.45	1.4	-
Преобразовательный агрегат	-	8.0	4.76	1.12	1.6
Двигатель подъема	-	3.5	1.85	0.96	-
Двигатель поворота	-	0.93	1.32	0.57	-
Двигатель хода	-	0.86	1.28	0.59	-
Двигатель напора	-	0.86	1.28	0.59	-
Редуктор поворота	-	2.01	1.32	0.85	0.62
Редуктор хода	-	2.95	1.34	1.09	0.88
Редуктор подъемной лебедки	-	3.12	1.78	1.14	1.69
Поворотная платформа	-	18.9	8.1	3.16	1.2
Нижняя рама	-	10.5	3.0	3.0	1.68
Гусеничная рама	-	5.45	5.5	0.75	1.0
Зубчатый венец	-	2.77	3.37	-	-
Роликовый круг	-	1.78	3.05	-	-
Центральная цапфа	-	0.64	1.22	0.33	-
Кабина	-	1.1	2.36	1.35	2.76

#### Характеристика канатов

Назначение	Обозначение каната	ГОСТ	Диаметр каната, мм	Длина, м	Разрывное усилие каната, кгс
Подъем ковша	39,5-Г-В-Н-180	ТУ 14-4-192-77	39,5	58,0	94623
Подъем стрелы	30-Г-В-О-Н-170	ГОСТ 7669-80	30,0	125	57300
Открывание днища ковша	11,5-Г-1-Н-180	ГОСТ 3071-74	11.15	10,5	6255

### 3.2 Условия работы и повреждения ответственных узлов экскаватора ЭКГ-5А

На горные машины, эксплуатируемые на открытых работах, особенно большое влияние оказывают климатические факторы. Низкие температуры вызывают резкое уменьшение ударной вязкости не хладостойких сталей, загущение смазочных масел. Снижение ударной вязкости сталей, в свою очередь, вызывает их низкотемпературную хрупкость, или хладноломкость, делает чувствительными к ударным нагрузкам и к концентраторам напряжений в элементах, поэтому в зимнее время возникает наибольшее число поломок. С застыванием масел и технических жидкостей резко увеличивается их вязкость и уменьшается текучесть, становится затруднительным поступление масел и технических жидкостей по каналам и трубопроводам к точкам смазки. В конечном итоге, все это приводит к повышенному износу деталей.

Высокие и низкие температуры воздуха оказывают неблагоприятное воздействие на детали из пластмасс, изоляцию электротехнических оболочек, ускоряя их старение. Солнечная радиация, воздействуя на машину, ускоряет процесс естественного старения пластмасс, резины, изоляции обмоток электрических машин. Материалы становятся более ломкими, в них образуются трещины, поэтому снижается механическая прочность и электрическое сопротивление изоляции.

Повышенное (более 70%) содержание влаги в воздухе вызывает атмосферную коррозию металлов, а образование пленок окислов интенсифицирует процесс механического изнашивания. Влага ускоряет процесс изнашивания полимерных материалов, снижает электрическую прочность (пробивное напряжение) изоляции. Попадая во влагостойкие смазки, она образует с ними эмульсии и снижает смазывающие свойства. К этому же приводит попадание влаги в масла. Некоторые горные машины работают в условиях воздействия газов, выделяющихся при самовозгорании углей, газы ускоряют процесс старения полимерных материалов и металлических частей.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Высокая запыленность воздуха возникает при разработке и перевалке сыпучих пород в условиях сухого воздуха и действия ветра. Частицы и пыль, попадая в смазку, загрязняют ее и способствуют интенсивному абразивному износу металлических поверхностей. Осаждение пыли на обмотках электрических машин ухудшает теплоотдачу обмоток, вызывая их перегрев. Пыль с высоким содержанием угля или руды становится токопроводящей и, осажаясь на оголенных токоведущих элементах, может вызвать утечку тока или короткое замыкание в электроцепях.

Динамические нагрузки вызывают усталостный износ и приводят к быстрому разрушению зубчатых передач и подшипников. Вредные процессы могут возникать из-за несовершенства конструкции деталей, нарушений точности регулировки, взаимной увязки деталей в сборочных единицах, неправильной замены материалов деталей, нарушения технологии сборки, обработки и монтажа.

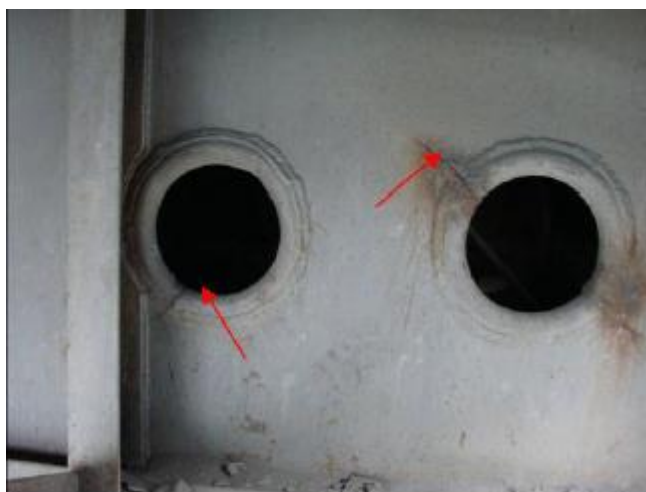
Систематизация и анализ дефектов, обнаруженных в ходе проведения ЭПБ металлоконструкций экскаваторов, позволили определить участки узлов экскаватора с наиболее часто повторяющимися дефектами.

Результаты представлены на рисунках.



а) Трещины по сварным швам нижнего листа платформы и постели верхнего рельса





б) Трещины основного металла вертикальных стенок (наружных и внутренних), выходящие на края окон осмотра



в) Трещины по основному металлу и по ремонтным сварным швам нижнего листа платформы, в районе ступиц поворотных шестерен



г) Трещины, деформации силовых элементов рабочих площадок



д) Трещина гусеничных рам в районе натяжных окон

Рисунок 3.2 – Фотофиксация основных дефектов металлоконструкций экскаваторов

Анализ состояния экскаваторного парка показывает, что среднее статистическое значение износа оборудования по сроку службы превышает 70%. Средний срок эксплуатации экскаваторов составляет 21,6 года. Анализ работы действующего парка карьерных экскаваторов показывает, что и после отработки срока службы по норме амортизации экскаваторы продолжают эффективно работать с коэффициентом использования до 0,7. Рост ресурса машин не оказывает существенного влияния на производительность экскаваторов, которая сохраняется на среднем уровне 200–230 м<sup>3</sup>/ч при экскавации пород III–IV категории по шкале проф. М.М. Протоdjяконова. Сохранению стабильности технических параметров и уровня надежности машин способствует значительный запас прочности базовых узлов экскаватора и агрегатно-узловой метод ремонта, при котором основные агрегаты заменяются на новые или полностью восстановленные [8].

Анализ эксплуатационной надежности показывает, что в общей структуре потока отказов экскаваторов доля отказов механического оборудования составляет 50–70%. Значительную часть (35%) занимают отказы металлоконструкций.

Последнее связано с тем, что сварные соединения металлоконструкций до настоящего времени остаются зонами, в которых могут возникать и развиваться хрупкие разрушения (трещины).

С увеличением срока работы экскаваторов происходит процесс ускорения образования и роста трещин, что может привести к аварийным ситуациям.

Проведенные обследования экскаваторов показали, что трещины образуются практически во всех несущих металлоконструкциях. Наиболее часто трещины проявляются в поворотных платформах и рабочем оборудовании. Установлено, что трещины в указанных местах развиваются со значительной скоростью и достигают весьма больших размеров: максимально зафиксированный во время осмотров размер трещины составил 1,5м (на верхнем и нижнем листах поворотной платформы) [8].

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

## 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭКСКАВАТОРА ЭКГ-5А

### 4.1 Расчет удельных наработок экскаватора ЭКГ-5А

Оценка характеристик выносливости и ресурса несущих конструкций, определения и продления срока службы является актуальной, эффективной и необходимой задачей для обеспечения устойчивой безаварийной работы.

Совершенствование методов оценки выносливости и обеспечения необходимого ресурса несущих конструкций особенно важно, так как работа карьерных машин связана транспортировкой опасных и крупногабаритных грузов.

Таким образом, комплексный характер рассматриваемой проблемы предполагает целесообразность и необходимость использования методов, изложенных в предыдущих разделах, направленных на получение более точных и обоснованных оценок выносливости, ресурса и нагруженности основных НК при безусловном обеспечении требований его безопасной эксплуатации.

В данном разделе приведены результаты исследований прочности и ресурса несущих конструкций экскаваторов типа ЭКГ-5А.

Использование косвенных методов оценки прочности и ресурса НК ПС позволяет обеспечить сокращение объема исследований, не в ущерб достоверности полученных при этом результатов.

В разделе приведено использование метода сравнения динамической нагруженности НК применительно к рамам экскаваторов ЭКГ-5А. Рассмотрено обоснование применения метода сравнительной оценки ресурса по состоянию наименее прочного элемента НК.

Испытания на действие натуральных вибраций являются одним из наиболее перспективных и экономически эффективных методов лабораторной оценки характеристик прочности, выносливости (и надежности) высокотехнологичных систем и конструкций. В разделе приведены результаты исследований по воспроизведению импульсного нагружения сложной податливой механической конструкции.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

Ниже приведены результаты исследований, представляющие часть комплексных экспериментально – теоретических работ с использованием косвенных методов оценки прочности и выносливости НК.

Рассмотренный в разделе 2 метод косвенной оценки остаточного ресурса НК путем сопоставления их динамической нагруженности с нагруженностью машины – эталона применен для оценки остаточного ресурса рамы экскаватора ЭКГ-5А. В качестве машины – эталона был взят экскаватор ЭКГ-5А, рамы которого имеют практически идентичную конструкцию с рассматриваемым в разделе.

Для оценки динамической нагруженности рам экскаватора ЭКГ-5А выполнялись их динамические ходовые и динамические прочностные испытания. В таблице 4.1 приведен расчет наработок для испытываемого оборудования.

Конечный этап расчетов по сравнению удельных наработок рам экскаваторов ЭКГ-5А, приведен в таблице 4.2.

Из данных таблице 4.2 следует, что отношение наработок экскаваторов ЭКГ-5А разрешает без ограничений принять Технические решения по продлению срока службы основных несущих конструкций. В данном расчете присутствует определенный резерв срока службы связанный с тем, что при проведении работ по оценке срока службы несущих конструкций экскаваторов ЭКГ-5А, в качестве показателя динамической нагрузки (оценка эксплуатационной нагруженности методом максимальной нагруженности) был принят наиболее жесткий режим эксплуатации.

Таблица 4.1 – Расчет удельных наработок экскаваторов ЭКГ-5А

Динамические добавки $K_{дв}$			Эквивалентные приведенные силы $S_{экр}$			Наработки		
ЭКГ - 5А рама	ЭКГ - 5А ковш	ЭКГ - 5А стрела	ЭКГ - 5А рама	ЭКГ - 5А ковш	ЭКГ - 5А стрела	ЭКГ - 5А рама	ЭКГ - 5А ковш	ЭКГ - 5А стрела
0.15	0.15	0.168	0.23	0.23	0.248	0.0001119	0.0001119	0.0001513
0.14	0.15	0.216	0.22	0.23	0.296	0.0006560	0.00078356	0.0021494
0.14	0.17	0.224	0.22	0.25	0.304	0.0007965	0.0013281	0.0029038
0.18	0.2	0.224	0.26	0.28	0.304	0.0015537	0.0020898	0.0029038
0.18	0.19	0.224	0.26	0.27	0.304	0.0015537	0.0018069	0.0029038
<b>Всего</b>						0.0035320	0.0046270	0.011012

Таблица 4.2 – Сравнение удельных наработок экскаваторов ЭКГ-5А

Экскаватор Параметр	Экскаваторы		
	ЭКГ -5А №1	ЭКГ -5А №2	ЭКГ -5А №3
Обозначение наработки	$D1$	$D2$	$D3$
Наработки, МПа <sup>4</sup>	0.00706	0.00924	0.0225
Обозначение сравнительной оценки	$D3/D1$	$D3/D2$	-
Значение сравнительной оценки	3.18	2.43	-
Срок службы конструкции – эталона, лет	-	-	45
Расчетный срок службы исследуемой конструкции, лет.	143	109	-
Срок службы, назначенный по результатам работ, лет	45	45	-

Сравнивая величины удельных наработок можно сделать вывод о том, что сравнительно наиболее нагружающими основные продольные балки рамы рама опытами являются опыт 006, запись 003 и опыт 009, запись 002. По данным реализациям выполнена проверка методики сравнительной оценки ресурса несущих конструкций

На рисунках 4.1 и 4.2 приведены распределения эквивалентных по запасу амплитуды напряжений, соответственно, в точках ТХК4 и ТХК5.

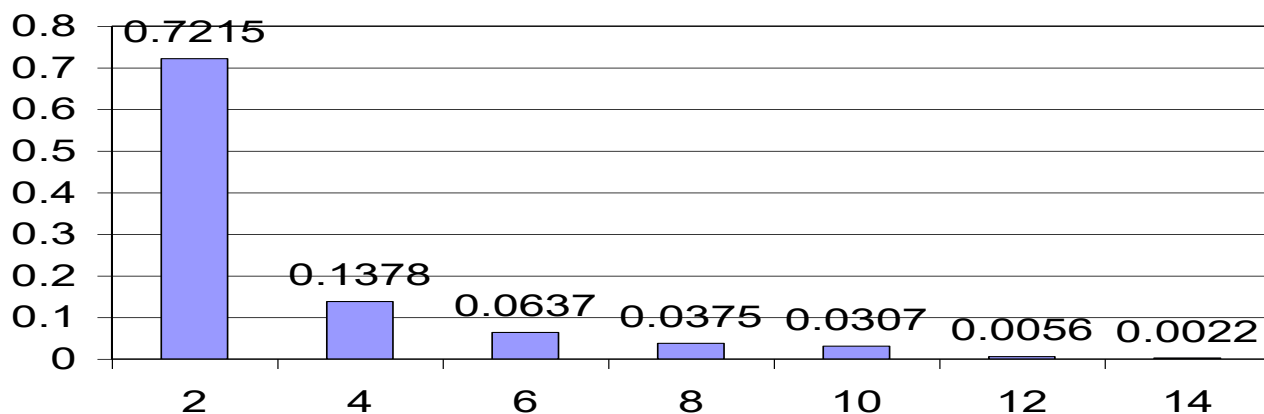


Рисунок 4.1 – Гистограмма распределения напряжений в области основной несущей конструкции

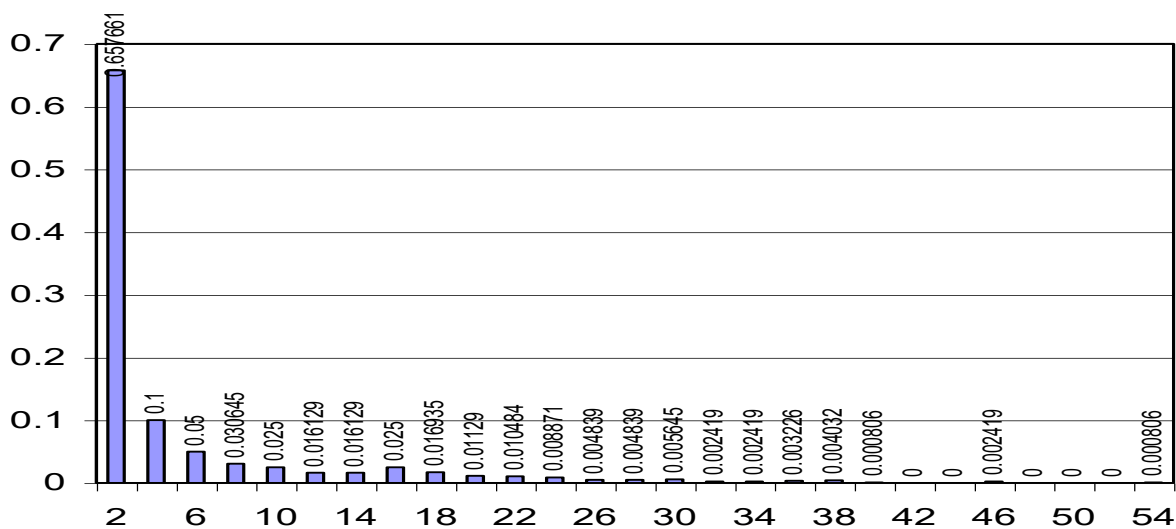


Рисунок 4.2 – Гистограмма распределения напряжений в области «слабого» элемента

Результаты обработки представительного объема опытных данных по установлению линейной зависимости показателей нагруженности «слабого» элемента и эталонной точки приведены на рисунках 4.3, 4.4.

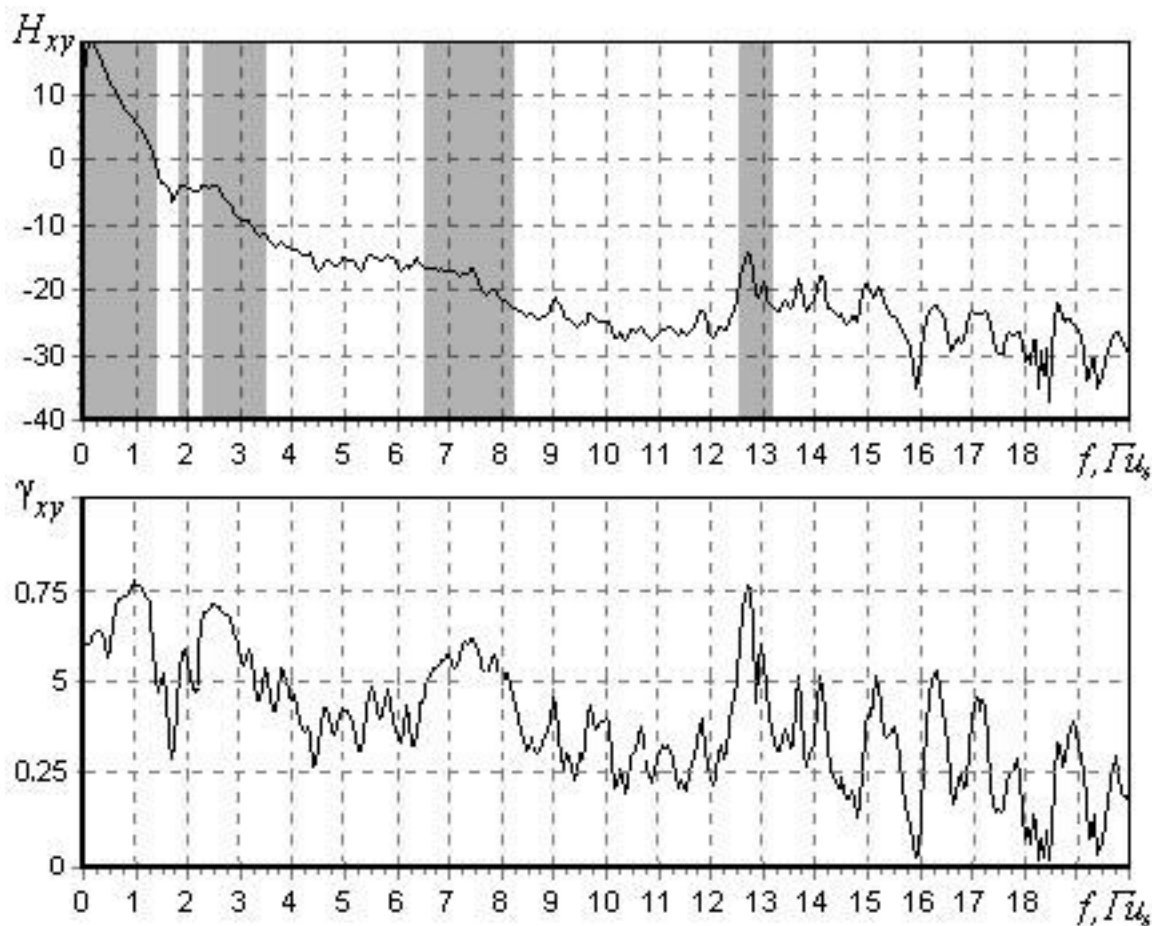


Рисунок 4.3 – Взаимная спектральная плотность  $H_{xy}$ , [дБ] и функция когерентности  $\gamma_{xy}$  напряжения в «слабом» звене и контрольной точке основной продольной балки экскаватора

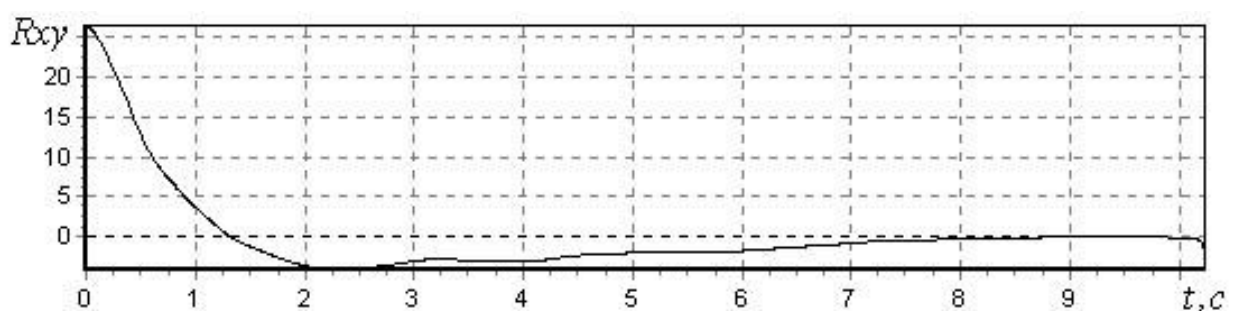


Рисунок 4.4 – Функция взаимной корреляции  $R_{xy}$  [МПа2с] напряжения в «слабом» звене и контрольной точке основной продольной балки экскаватора

Из анализа рисунка 4.4 следует, что напряжения в «слабом» элементе связаны с напряжениями в контрольной точке основной продольной балки, в основном, в



области низких (до 3,5 Гц.) частотах. При этом изменение модуля взаимного спектра составляет в этом диапазоне до 20 дБ. Кроме диапазона низких частот следует отметить области (6,5–8,2 Гц.) и частоту первой формы изгиба ( $\approx 12,8$  Гц.), где функция когерентности имеет значимую величину ( $>0,6$ ). Таким образом, дальнейший анализ энергии колебаний с целью оценки влияния форм колебаний рама экскаватора на его напряженно-деформированное состояние, следует выполнять в диапазонах, приведенных в таблице 4.3.

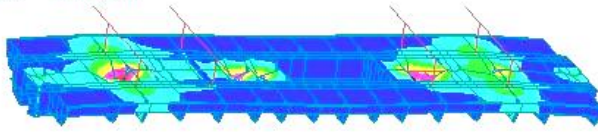
Таблица 4.3 – Диапазоны частот, при которых контрольные напряжения  $\sigma_{ТХК4}$  и  $\sigma_{ТХК5}$  взаимно коррелируют

Частотный диапазон, Гц.	Примечание
0 – 3,5	Область частот колебаний экскаватора как твердого тела.
6,5 – 8,2	Область возможного диапазона работы оборудования, возможно, первая форма кручения.
12,5 – 13,3	Область первого тона колебаний продольного изгиба рамы экскаватора

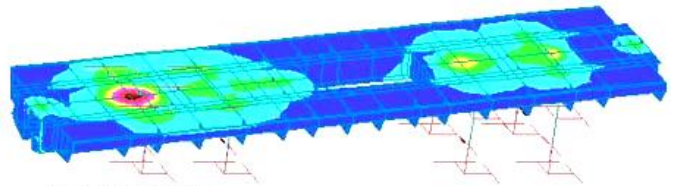
Результаты расчета форм напряженно – деформированного состояния рам экскаватора ЭКГ-5А приведены на рисунке 4.6 и в таблице 4.4. При расчете, в соответствии с требованиями методики сравнительного расчета ресурса несущих конструкций, определялось напряженно-деформированное состояние рам экскаватора, соответствующие формам собственных колебаний конструкции рам экскаватора, а также напряжения в области основных несущих конструкций и «слабого» элемента его конструкции.



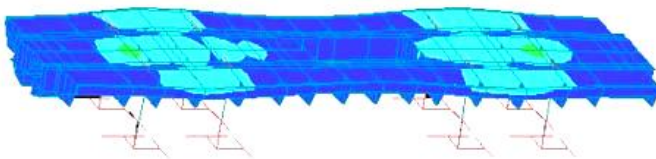
1)



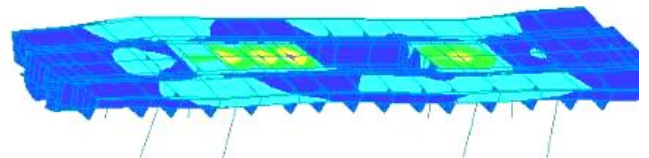
2)



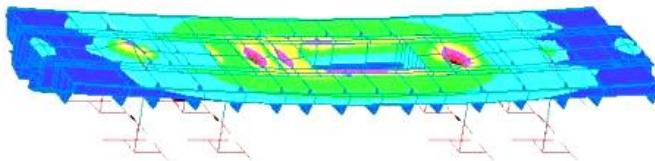
3)



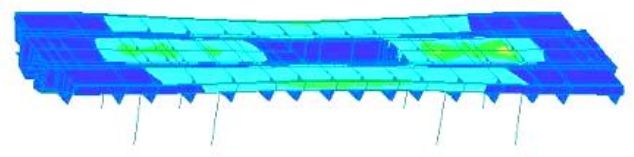
4)



6)



7)



8)

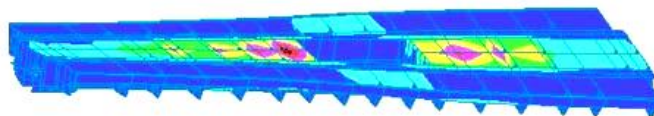


Рисунок 4.5 – Формы напряженно – деформированного состояния рам экскаватора ЭКГ-5А при деформациях по формам собственных колебаний

Поскольку независимые колебания по каждой из форм связаны с единственной переменной (главной координатой), а также учитывая линейную связь

компонентов напряженного состояния в любой точке с главной координатой, в данном расчете допустимо сравнение главных напряжений. Могут также сравниваться эквивалентные напряжения, полученные как функции линейной или квадратичной комбинации компонентов напряженного состояния.

Для данного расчета сечение «слабого» элемента находится в узлах №№ 888, 887, 855, 856. Датчик ТХК4 расположен в районе узла расчетной схемы № 691. Соответствующие данные взяты из результатов прочностного расчета и сведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты расчета на прочность рам экскаватора ЭКГ-5А для оценки ресурса его основных несущих конструкций методом «слабого» элемента

№ формы колебаний	Наименование формы собственных колебаний рама экскаватора	Место расположения датчика в области «слабого» элемента ТХК5, $\sigma_{\min\xi}$ МПа	Максимальное напряжение в сечении «слабого» элемента, МПа	Напряжение в точке ТХК4, МПа	Напряжение $\ T_{\xi}\ $ МПа
1	Подпрыгивание	10,4	10,6	8,47	34,0
2	Галопирование	5,08	5,22	3,32	29,9
3	Поперечный относ	20,4	20,4	3,05	41,6
4	Перевалка	1,56	3,46	2,41	11,0
5	Виляние рама	21,2	21,2	2,82	42,3
6	Вертикальный изгиб	4,63	4,63	2,20	17,9
7	Поперечный изгиб1	-	-	-	-
8	Кручение	7,28	11,5	10,3	63,0

Ориентировочные оценки частот собственных колебаний рам могут быть получены на основании упрощения формулы (4.14) как

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{16} |g_i|}{\sum_{i=1}^{16} |z_i|}},$$

где  $g_i$  – фиктивные ускорения свободного падения частей рамы для имитации инерционной нагрузки;

$Z_i$  – средние перемещения частей рамы в направлении действия инерционной нагрузки.

Результаты оценки собственных частот колебаний рама экскаватора ЭКГ-5А приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты оценки собственных частот колебаний рамы экскаватора

№ формы колебаний	Наименование формы колебаний рама экскаватора	Суммарное перемещение элементов рама, м.	Суммарное ускорение элементов рама м/с <sup>2</sup>	Частота, Гц
1	Подпрыгивание	0,353	9,8	0,84
2	Галопирование	0,203	7,35	0,96
3	Поперечный относ1	-	-	-
4	Перевалка	0,255	7,35	0,85
5	Виляние рама1	-	-	-
6	Вертикальный изгиб	0.000451	2,94	12,9
7	Поперечный изгиб	0.000388	2,94	13,8
8	Кручение	0,0031	5,51	6,7

Таким образом, составляющие спектров колебаний напряжений в процессе движения в области частот 6–7 Гц. предположительно связаны с крутильными колебаниями рамы экскаватора. Основные частоты колебаний экскаватора как твердого тела не превышают величины 1–1,5 Гц.

С учетом данных о разрушениях в области боковой продольной вспомогательной балки и данных о негативном балансе соотношении наработок, следует сделать вывод о необходимости учета остаточных напряжений в области стыковых сварных соединений частей продольной балки.

В соответствии с положениями Норм расчета, напряжения в области «слабого» элемента с учетом наличия остаточных напряжений в области стыковых сварных швов и характера влияния статических составляющих напряжений определяются как

$$\sigma_o = (0,3 \div 0,4) \cdot \sigma_T \cdot \psi = 0,4 \cdot 245 \cdot 0,3 = 29,4 \text{ МПа} \quad (4.1)$$

$$T_{\min \xi} = \sigma_{\min \xi} + \sigma_o$$

В формуле обозначим

$$C_{CR} = \left( \frac{T_{\min \xi} \cdot k_{S \min} \cdot k_{K \min}}{\|T_{\xi}\| \cdot k_{K \xi}} \right)^m \cdot k_i^{-1}. \quad (4.2)$$

Данные для оценки ресурса рамы экскаватора ЭКГ-5А, полученные на основании результатов таблицы 4.2 с учетом соотношений (4.1), приведены в таблице 4.6.

Коэффициенты  $k_{K \min}$ ,  $k_{K \xi}$  в расчете не учитываются.

В соответствии с данными таблицы 4.6, наиболее неблагоприятным по соотношению наработок в «слабом» элементе и основных продольных балках являются колебания галопирования, при этом позитивный баланс наработки составляет 1,89.

На основании эксплуатационных данных для обследованной группы экскаваторов горнодобывающего предприятия можно выделить две их группы со следующими характеристиками наработки на отказ по разрушению «слабого»

элемента: по группе 1 – среднее время до разрушения 26,36 года, его среднеквадратичное отклонение (СКО) – 1,03 года; по группе 2 – среднее 22,99, СКО – 1,09 года.

Минимальное время появления трещин с вероятностью 0,997 оценим по формуле

$$R_{\min} = \bar{R}_{\min} - 3 \cdot \delta_{\min} . \quad (4.3)$$

где  $\bar{R}_{\min}$  – средний возраст разрушения,

$\delta_{\min}$  – дисперсия возраста разрушения.

Таблица 4.6 – Исходные данные для оценки ресурса рамы

Наименование формы колебаний рама экскаватора	Напряжение $T_{\min\zeta}$ , МПа	Коэффициент $k_{S\min}$ , формула(4.28)	Коэффициент $k_n$ формула (4.28)	Коэффициент $C_{CR}$ формула (4.1)
Подпрыгивание	39,2	1,02	1,0	1,91
Галопирование	33,9	1,03	1,0	1,89
Поперечный относ	49,3	1,0	1,0	1,97
Перевалка	30,4	2,22	10,0	140,9
Виляние рама	50,0	1,0	1,0	1,95

Таблица 4.7 – Оценка ресурса рамы экскаваторов ЭКГ – 5А

№ эксплуатационной группы экскаваторов	Состав эксплуатационной группы экскаваторов, зав. №№	Нижняя граница возраста разрушения (от постройки), лет	Уточнение коэффициента $k_n$ , формула (4.28) <sup>1</sup>	Коэффициент $C_{CR}$ формула (6.1)	Оценка ресурса, лет	Остаточный ресурс, лет
1	157,204	23,3	1,2	1,55	36	5
2	557,701,794,837,862,954,1012-1014, 1265, 1266, 1454	18,7	1,07	1,76	33	10

На основании проведения экспериментальных испытаний образцов экскаваторов, расчетов напряженно-деформированного состояния и ресурса основных несущих конструкций экскаваторов ЭКГ-5А, эксплуатируемых в горнодобывающем предприятии, были сделаны такие выводы:

- Ресурс основных несущих конструкций экскаваторов ЭКГ-5А группы 1 (таблице 4.7) составляет 36 лет эксплуатации от постройки при условии проведения систематического неразрушающего контроля их основных несущих конструкций.
- Ресурс основных несущих конструкций экскаваторов ЭКГ-5А группы 2 (таблице 4.7) составляет 33 лет их эксплуатации от постройки при условии проведения систематического неразрушающего контроля их основных несущих конструкций.

#### 4.2 Воспроизведение натуральных импульсных воздействий на сложную податливую механическую конструкцию

Предложенный метод коррекции АЧХ вибрационного стенда использован для воспроизведения воздействия полусинусоидальных импульсов ускорения на сложную механическую конструкцию. Испытания проводились на базе оборудования ЦСКБ. Контроль качества воспроизводимого процесса осуществлялся по датчику ускорений, расположенному на столе вибростенда. В качестве силовозбудителя использовался электрогидравлический вибрационный стенд фирмы «Shenk» с толкающим усилием 200 кН совместно с его стойкой управления. Результаты идентификации фиктивного перемещения стола вибростенда с объектом испытаний приведены на рисунках 4.7 – 4.9. Как видно из представленной информации, предлагаемый метод обеспечивает удовлетворительное качество идентификации ПФ системы в рабочей области частот (0–60 Гц.). По результатам

выполненной идентификации определена импульсная функция отклика, приведенная на рисунке 4.10.

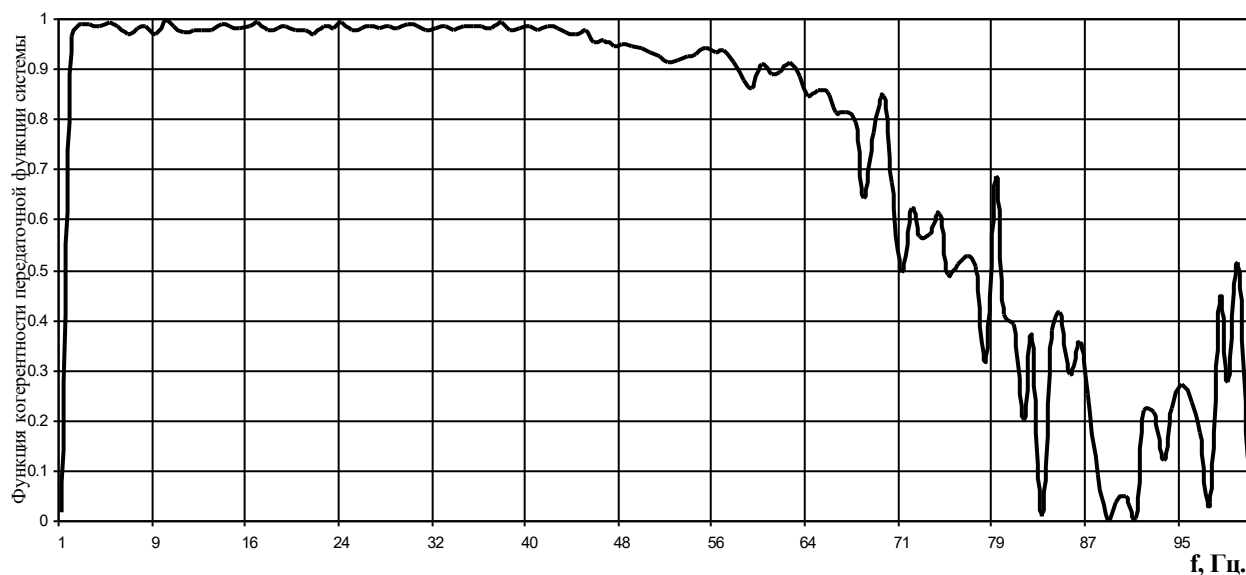


Рисунок 4.6 – Функция когерентности  $\gamma(f)$  ПФ вибростенда с объектом испытаний, идентифицированная по его ускорению

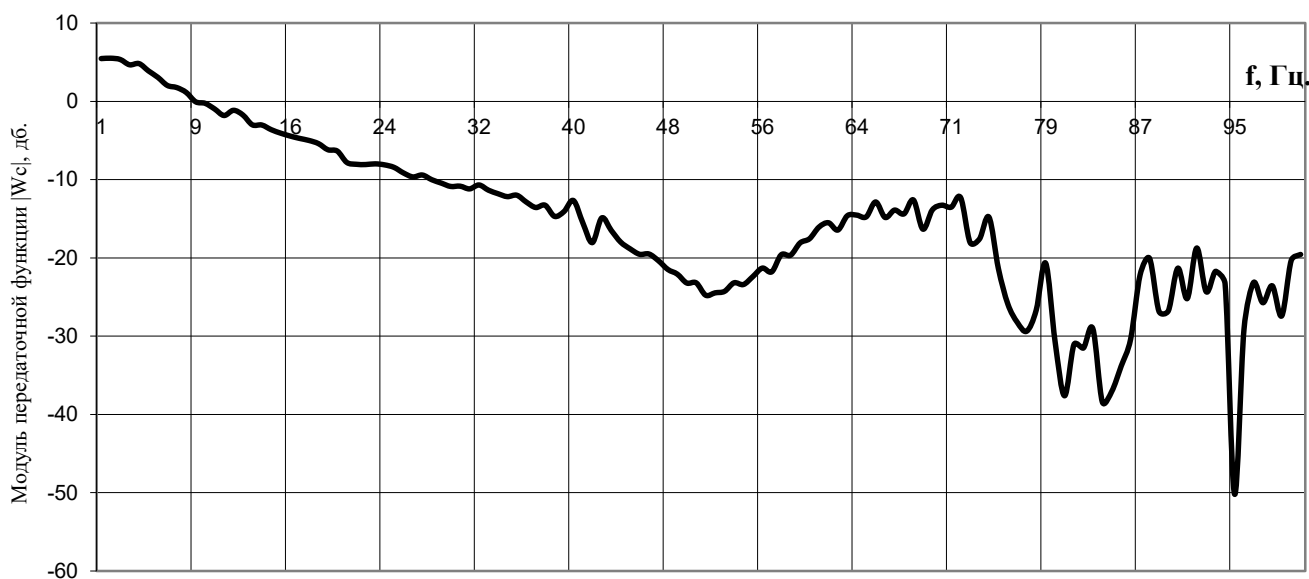


Рисунок 4.7 – Амплитудно-частотная характеристика  $H_c(f)$  ПФ вибростенда с объектом испытаний, идентифицированная по его ускорению

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



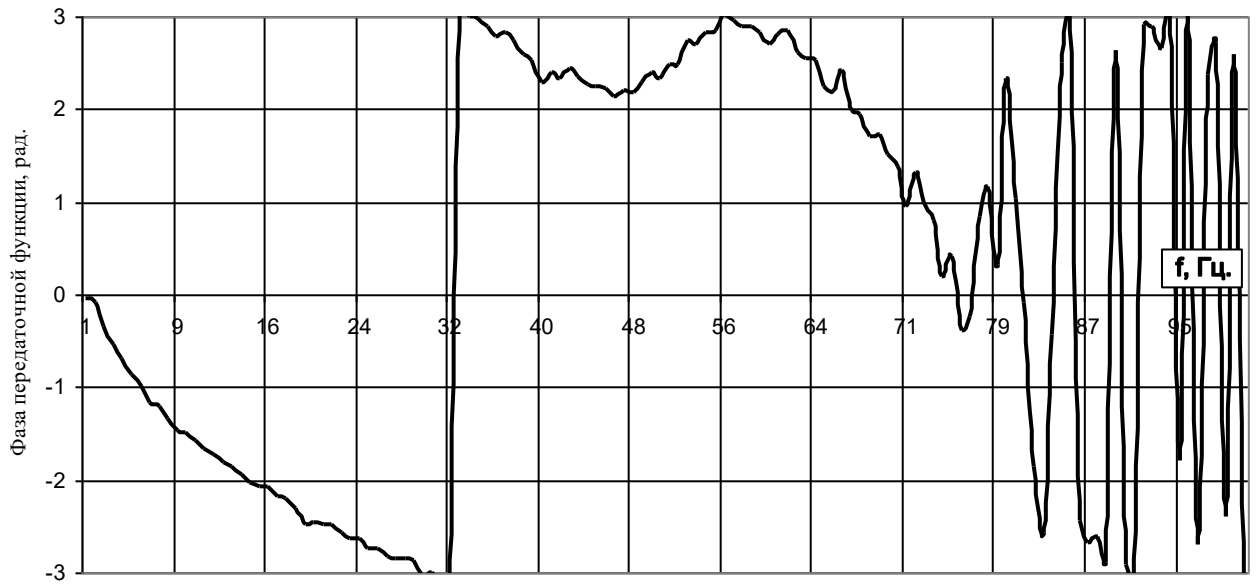


Рисунок 4.8 – Фазочастотная характеристика  $\varphi_c(f)$  ПФ вибростенда с объектом испытаний, идентифицированная по его ускорению

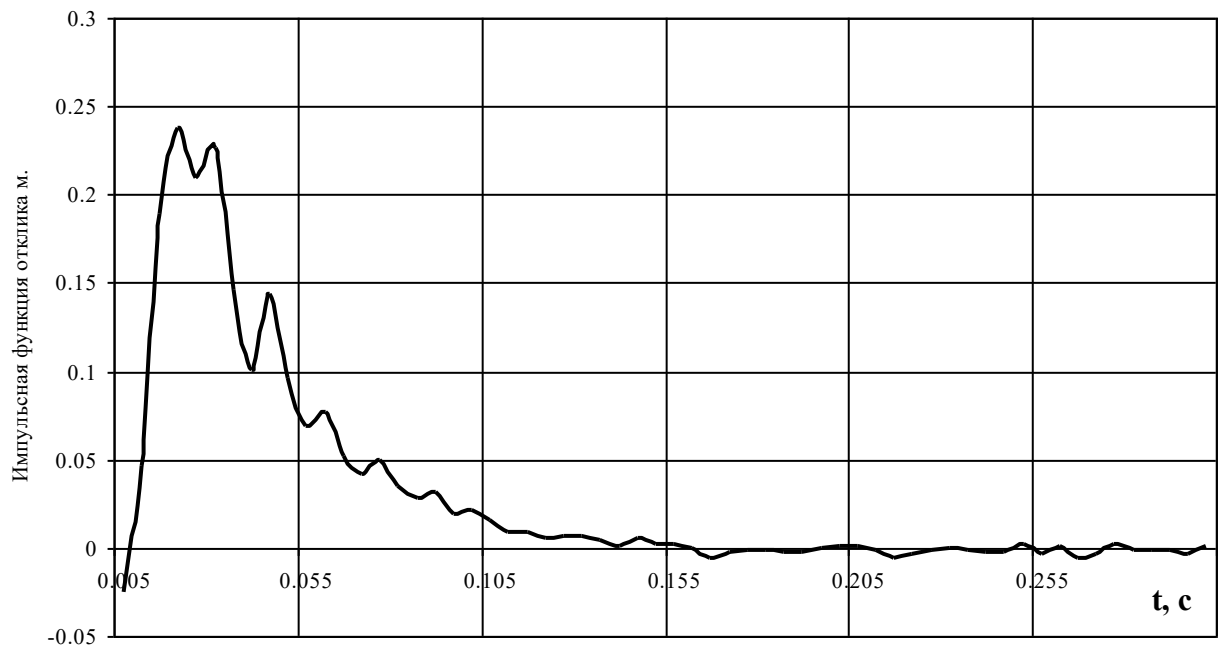


Рисунок 4.9 – Импульсная функция отклика  $h(f)$  системы

После определения параметров ЦКФ были выполнены натурные эксперименты по нагружению объекта испытаний импульсами, параметры которых приведены в таблицы 4.8.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Таблица 4.8 – Параметры нагружения объекта испытаний

Длительность импульса, мс.	Амплитуда импульса, g	Период следования импульсов, мс.
30	2,3	1000
100	1,5	600

Результаты воспроизведения импульсов показаны на рисунке 4.11, а сравнительная оценка спектров воспроизводимых сигналов – на рисунке 4.12. Следует отметить, что на качество воспроизведения сигналов при идентификации ПФ тракта воспроизведения по ускорениям объекта испытаний сильное воздействие оказывают посторонние воздействия (вибрации пульсатора от неравномерности давления масла, качество работы сервоклапанов пульсаторов, механические вибрации, передающиеся через силовой пол и т.д.). В связи с этим погрешность воспроизведения сигнала на некоторых гармониках достигает 10–12 дБ.

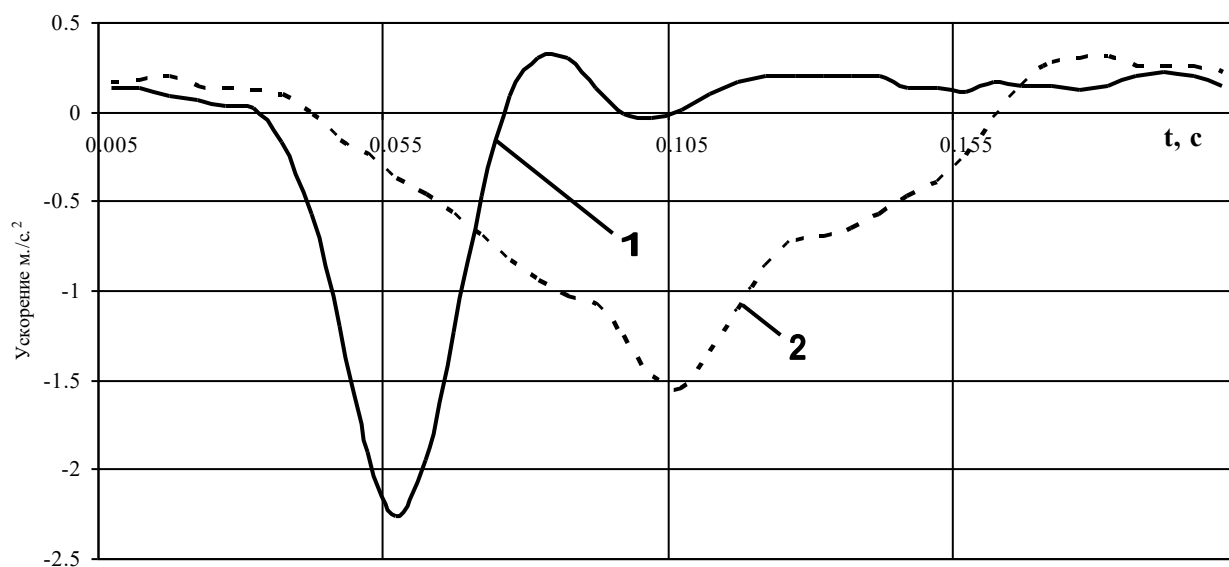


Рисунок 4.10 – Полусинусоидальные импульсы ускорения, воспроизведенные на электрогидравлическом вибростенде: 1 – импульс длительностью 30 мс; 2 – импульс длительностью 100 мс

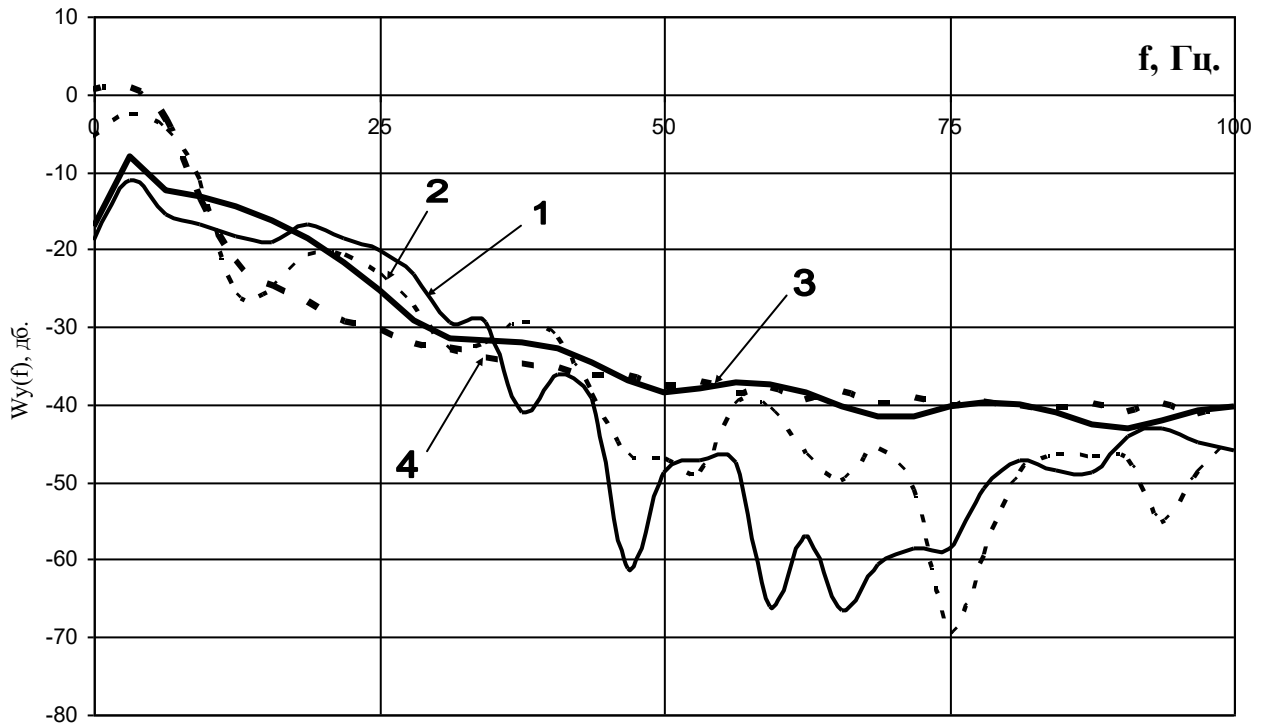


Рисунок 4.11 – Сравнение спектров воспроизведенных и эталонных сигналов: 1 – импульс 30 мс, воспроизведенный; 2 – импульс 30 мс, эталон; 3 – импульс 100 мс, воспроизведенный; 4 – импульс 100 мс, эталон

Исследование возможности применения системы воспроизведения реальных вибраций для создания желаемого напряженно-деформированного состояния элементов и конструкций подвижного состава показывает, что системы управления вибрационными испытаниями, основанные на идентификации ПФ системы «вибростенд – объект испытаний» по ускорениям точек объекта испытаний, подтвердило возможность её использования для воспроизведения реальных вибраций конструкций экскаваторов.

### 4.3 Оценка остаточного ресурса экскаваторов ЭКГ-5А

экспериментально-теоретическими методами

Заключительным этапом проведения комплексов экспериментально – теоретических работ по оценке и продлению сроков службы НК является обобщение результатов теоретических расчетов, натурных испытаний по определению их динамической нагруженности в условиях эксплуатации и оценок характеристик выносливости НК и их ресурса. Комплекс испытаний, на основании результатов которого выполняется оценка ресурса несущих конструкций ПС, призван обеспечить выполнение следующих основных требований:

обеспечение необходимой точности и полноты измерений при проведении комплексных испытаний;

обеспечение необходимой точности и полноты исходных данных для оценки ресурса НК ПС;

проведение комплекса испытаний на выносливость НК в технически и финансово приемлемые для Заказчика сроки.

Оценки ресурса и сроков службы экскаваторов, независимо от характера расчетных и экспериментальных данных и методов их определения, обязаны обеспечить достоверное получение нижней границы указанных величин. Методы оценки ресурса и сроков службы экскаваторов должны обладать достаточной полнотой и быть научно и физически обоснованными. Объем и содержание работ по оценке срока службы ПС должно быть адекватно его типу, характеру и условиям эксплуатации, а также степени ответственности несущей конструкции при обязательном соблюдении требований безопасности движения поездов.

Ниже рассмотрен ряд примеров экспериментально-теоретической оценки ресурса НК, проведенных в рамках комплексных работ по продлению срока службы экскаваторов.

#### 4.4 Оценка остаточного ресурса рамы экскаватора ЭКГ-5А

В данном подразделе представлены результаты комплекса исследований по лабораторной оценке предела выносливости рам экскаваторов ЭКГ-5А и оценке их остаточного ресурса.

Рамы заводской № 169, 170 подвергались действию блочных нагрузок с возрастанием амплитуды нагружения. Соотношения амплитуд блоков нагружения и количество циклов нагружения выбирались так, чтобы обеспечить близкий к линейному характер накопления усталостных повреждений конструкции.

Режимы нагружения рам экскаватора ЭКГ-5А представлены в таблицах 4.9 и 4.10.

При испытаниях на первом режиме визуальным осмотром после наработки 67600 циклов на режиме 6 была выявлена трещина сварного шва, соединяющая накладку и поперечную балку в районе тензорезистора Т5. В связи с тем, что это разрушение не имело непосредственного влияния на несущую способность рамы, испытания были продолжены.

Таблица 4.9 – Режимы нагружения рамы заводской № 169

Режим №	Частота, Гц	$P_{ст}$ кН	$P_{дин}$ кН	Количество циклов	Напряжение, $\sigma_{экв}$ , МПа (датчик)
Проба	10	63	23	4 200	403 (Т3*)
Проба	10	100	45	34 350	592 (Т2*)
Проба	10	110	60	17 160	739 (Т2)
Проба	10	113	65	30 600	795 (Т2)
1	10	120	70	57 000	854 (Т2)
2	10	135	75	234 450	800 (Т3)

Общая наработка конструкции составила 377 760 циклов.

Таблица 4.10 – Режимы нагружения рамы заводской № 170.

Режим №	Частота, Гц	$P_{ст}$ кН	$P_{дин}$ , кН	Количество циклов	Напряжение, $\sigma_{экв}$ , МПа (датчик)
1	10	53	38	313 200	438
2	10	60,5	40,3	108 600	447
3	10	67,4	46	102 000	530
4	10	70,7	48	814 800	591
5	10	74	50,3	100 200	603
6	10	75,6	52	79 800	638
7	10	84	59	205 200	724
8	10	89	64	98 400	899

Суммарная наработка конструкции до разрушения составила 1822200 циклов.

После наработки 78 600 циклов на режиме 8 визуально была выявлена трещина в районе тензорезистора  $T5^*$ . Нагружение было продолжено, и после наработки еще 15 000 циклов было зафиксировано резкое падение статической и динамической составляющей силы на силовозбудителе. Развитие трещины продолжалось на протяжении 4800 циклов.

Экскаваторы ЭКГ-5А отличаются высокой эксплуатационной надежностью. Как показатель этого можно отметить отсутствие сведений относительно разрушений рам экскаваторов от усталости. Этому способствовало удачное конструкторское решение несущей части рам, которая дает возможность организовать силовое взаимодействие в раме таким образом, чтобы избежать возникновения чрезмерных напряжений от ее изгиба.

При оценке меры рассеивания величины предела выносливости рам, были приняты следующие предположения:

Погрешность измерений при проведении каждого этапа испытаний считается случайной величиной с нормальным законом распределения вероятности;

Экспериментальная оценка средней величины предела выносливости конструкции рам считается состоятельной;

Характеристики кривой выносливости для испытанных объектов испытаний принимаются постоянными.

Тогда дисперсия предела выносливости конструкции рамы вычисляется по формуле

$$S_{\sigma_{-1D}}^2 = \left(1 + \frac{\beta}{N_2 - N_1}\right)^2 (S_{\sigma_{(1)}}^2 + S_{\sigma_{(2)}}^2), \quad (4.4)$$

где  $S_{\sigma_{-1D}}^2$  – дисперсия границы сопротивления усталости конструкции;

$\beta$  – константа кривой усталости;

$N_2, N_1$  – количество циклов нагрузки конструкции рамы соответственно на втором и первом режимах испытаний;

$S_{\sigma_{(2)}}^2, S_{\sigma_{(1)}}^2$  – дисперсии погрешностей измерений при проведении соответственно второго и первого этапов стендовых вибрационных испытаний.

При определении остаточного срока службы несущих конструкций экскаватора был использован жесткий критерий его оценки, основанный на сравнении наработки, которое воспринимается несущими конструкциями при проведении стендовых испытаний и в процессе эксплуатации.

Для этого были использованы соотношения

$$T_P = \frac{\sum_i N_{ei} \sigma_{ei}^m \chi_{ei}^m}{L_P \sum_i N_{ai} \sigma_{ai}^m \chi_{ai}^m}, \quad (4.5)$$

где  $T_D$  – остаточный срок службы несущей конструкции, т.е. ее остаточный ресурс, выраженный в единицах времени (годах);

$L_D$  – годовая работа экскаватора;

$N_{ai}$  – количество циклов нагружения, полученное несущей конструкцией в процессе проведения стендовых испытаний при уровне эквивалентного напряжения  $\sigma_{ai}$ ;

$\bar{N}_{yi}$  – среднее количество циклов нагрузки, полученное несущей конструкцией в процессе эксплуатации при уровне напряжений  $\sigma_{ai}$ ;

$m$  – показатель степени кривой выносливости.

Напряжения, которые реализуются в несущих конструкциях экскаватора в процессе эксплуатации и искусственно вызванные при проведении стендовых испытаний, имеют погрешности, которые в данной формуле отнесены как к эксплуатационным напряжениям, так и к испытательным как коэффициенты их масштабирования при на каждом равные напряжения  $\chi_{ai}, \chi_{yi}$ .

В выражении (4.5) учитываются все циклы, которые имели место при эксплуатации экипажа, несмотря на их величину. Поэтому наработка при эксплуатации будет завышенной, а расчетный срок службы с этой точки зрения является оценкой снизу.

На основе данных эксплуатации экскаваторов ЭКГ-5А, пробег рам, которые были предоставлены для проведения стендовых вибрационных испытаний, составляет 120 тысяч часов, или 15 лет эксплуатации при их среднегодовой работе 8 тысяч часов в год.

После проведения динамических ходовых и динамических прочностных испытаний экскаваторов ЭКГ-5А с учетом вероятности возникновения различных эксплуатационных ситуаций, было найдено глобальное распределение вероятности эквивалентных напряжений, которые приходятся на единицу пробега локомотива (1 км). Данное распределение приведено в табл. 4.11 для наиболее нагруженного сечения рам экскаваторов ЭКГ-5А.

Как видно из данных таблицы 6.11, нагруженные зоны рамы характеризуется малым уровнем напряжений в их конструкции.

С учетом того, что при проведении испытаний рамы зав. № 169 произошло преждевременное разрушение рамы вследствие некачественного выполнения косого сварного шва в месте приварки челюсти по нижней полке продольной балки, предел выносливости определялся отдельно для случая 1 и случая 2 испытаний рамы зав. № 169.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57



Таблица 4.11 – Распределение величины эквивалентных напряжений в нагруженном сечении рамы экскаваторов ЭКГ-5А

Напряжение, МПа	Вероятность
1	0.4855
2	0.3211
3	0.1098
4	0.04432
5	0.02394
6	0.01171
7	0.002093
8	0.0009695
9	0.0002321
10	0.0000463
11	0.0001332

Результаты расчета по алгоритмам методики и научно-технического отчета приведены в таблице 4.12.

Следует обратить внимание на то, что в случае преждевременного разрушения № 364, получена большая величина предела выносливости, чем при проведении испытаний в полном объеме. Это объясняется неудачным расположением рабочих точек режимов испытаний на кривой выносливости, при котором возникает неприемлемая погрешность измерений величины  $\sigma_{-1D}$ . Поэтому в дальнейших расчетах предела выносливости конструкции рамы принимаются во внимание данные пункта 2 таблице 4.12.

Учитывая предоставленные специалистами горнодобывающего предприятия данные, относительно величины погрешности измерений при определении напряжений во время выполнения стендовых вибрационных испытаний, с использованием формулы 4.4 выполнена оценка нижней границы предела выносливости рам экскаваторов ЭКГ-5А. Результаты расчетов приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.12 – Параметры кривой выносливости при стендовых вибрационных испытаниях рам

Режим испытаний	Наименование параметра	Оценка среднего значения параметра
С учетом преждевременного разрушения №169 по дефектному сварному шву	коэффициент $\beta$	114200
	предел выносливости конструкции $\sigma_{-1D}$	54,15 МПа
Проведение испытаний №169, №170 в полном объеме	коэффициент $\beta$	339718
	предел выносливости конструкции $\sigma_{-1D}$	48,65 МПа

Сравнивая данные таблиц 4.11. и 4.13 можно сделать вывод, что напряжения в наиболее нагруженных зонах рамы экскаватора при его эксплуатации не превышают величину предела выносливости конструкции.

Таблица 4.13 – Оценки нижней границы величины предела выносливости рам экскаваторов ЭКГ-5А.

Среднее значение предела выносливости рамы с вероятностью 0,997	Нижняя граница предела выносливости рамы с вероятностью 0,997	Нижняя граница предела выносливости рамы с вероятностью 0,9999
48,7	22,3	13,5

Отклонение измеренных величин и при проведении ходовых и стендовых вибрационных испытаний (предел выносливости натурной детали в вероятностной постановке также определяется с вероятностью 0,95), определяется при уровне доверительной вероятности 0,95, т.е. при его отклонении  $2S$  ( $S$  – среднеквадратичное отклонение).

При расчете принято: показатель кривой усталости  $m=3$ ; коэффициент уменьшения напряжений при ресурсных испытаниях вследствие погрешностей измере-

ний  $\chi_{\text{ai}}=0,92$ ; коэффициент увеличения напряжений в эксплуатации вследствие погрешностей измерений  $\chi_{\text{ai}}=1,10$ ;  $L_p = 120000$  км./год.

Результаты расчетов остаточного ресурса приведены в табл. 4.14. С учетом данных таблицы 4.14 и возраста, подвергнутых испытаниям на выносливость (15 лет), были сделаны выводы относительно продления назначенного срока службы экскаваторов ЭКГ-5А и разработаны мероприятия по его обеспечению.

Поскольку экскаваторы ЭКГ-5А на текущий момент эксплуатируются в среднем 28 лет, не следует допускать неудовлетворительное состояние косых швов нижней полки продольных балок рам.

Учитывая результаты проведенных комплексных исследований, срок эксплуатации рам может быть оценен, как показано в таблице 4.15.

Таблица 4.14 – Остаточный ресурс рам экскаваторов ЭКГ-5А

Режим испытаний	Наименование параметра	Оценка среднего значения параметра, лет
С учетом преждевременного разрушения № 364.	Остаточный срок службы	10
Проведение испытаний №364, №363 в полном объеме	Остаточный срок службы	24

Таблица 4.15 – Общий ресурс рам экскаваторов ЭКГ-5А

Режим испытаний	Наименование параметра	Оценка среднего значения параметра
С учетом преждевременного разрушения №364.	Срок службы, Лет	25
Проведение испытаний №364, №363 в полном объеме	Срок службы, лет	39

Проведенные исследования остаточного ресурса рам экскаваторов ЭКГ-5А показали, что рамы экскаваторов ЭКГ-5А характеризуются значительными запасами выносливости. Напряжения, которые были зафиксированы в процессе эксплуатации, не превышали предела выносливости конструкции рамы даже при учете разброса измеренных величин по жесткому критерию. Полный срок эксплуатации

рам с нарушениями выполнения косых сварных швов по нижней полке продольной балки рамы составляет 25 лет при среднегодовой наработке 8 тыс. ч. Полный срок эксплуатации рам с качественным выполнением косых сварных швов по нижней полке продольной балки рамы составляет 39 лет при среднегодовой наработке 8 тыс. ч.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнены исследования и разработки, направленные на обеспечение безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах (на примере экскаватора ЭКГ-5А) после окончания его назначенного срока службы. Это позволило сохранить его работоспособность на основе проведения комплексных научно-исследовательских работ с применением экспериментально – теоретических методов.

Даны результаты экспериментально-теоретических работ по оценке остаточного ресурса рам экскаватора ЭКГ-5А с использованием модели выносливости, основанной на критериях воспринятой ими наработки. Получены позитивные результаты оценки величин остаточного ресурса рассмотренных конструкций, что позволило продлить их назначенный срок службы: до 39 лет от постройки – для рам экскаваторов ЭКГ-5А при среднегодовой наработке 8 тыс. ч.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116–ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // последняя редакция 8 декабря 2006 г.
2. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике, основные понятия, термины и определения. // М.: Госстандарт СССР, 1989. – 35 с.
3. ГОСТ Р 27.002–2009. Надежность техники. Термины и определения.
4. Богданов, А.П. Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов: научный журнал / А.П. Богданов. – М.: «Технические науки», 2015. – 22 с.
5. Волошенко-Климовицкий, Ю.Я. Динамический предел текучести: учебное пособие для вузов / Ю.Я. Волошенко-Климовицкий. – М.: Наука, 1965. – 176 с.
6. Насонов, М.Ю. Методика оценки остаточного ресурса металлоконструкций горных машин при наличии растущих трещин / М.Ю. Насонов. – М.: Вестник КузГТУ, 2012. – 36 с
7. Подэрни, Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ: учебное пособие для вузов / Р.Ю. Подэрни. – М.: Недра, 1971. – 456 с.
8. Фанина, Е.А. Опасные производственные объекты: устойчивое функционирование, мониторинг: учебное пособие для вузов / Е.А. Фанина, А.Н. Лопанов, А. П. Гаевой. – М.: Белгород: Издательство БГТУ, 2011. – 183 с.
9. Хашковский, А.В. Промышленная безопасность и охрана труда при эксплуатации технических объектов повышенной опасности: Учебное пособие для вузов / А.В. Хашковский. – М.: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 326 с.
10. Оптимальный срок службы карьерных одноковшовых экскаваторов с электрическим приводом. <http://mining-media.ru/ru>.

					20.03.01.2017.038 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Факультет «Политехнический заочный»  
Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой БЖД  
\_\_\_\_\_ / А.И. Сидоров /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Продление срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования  
и сооружений на опасных производственных объектах (на примере экскаватора  
ЭКГ-5А)

АЛЬБОМ ИЛЛЮСТРАЦИЙ  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ  
ЮУрГУ – 200301.2017.038 АИ ВКР

Количество листов: 15

Руководитель работы, доцент  
\_\_\_\_\_ / А.В. Хашковский /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор работы  
студент группы ПЗ–559  
\_\_\_\_\_ / А.А. Дьячков /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролер, доцент  
\_\_\_\_\_ / А.В. Кудряшов /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.