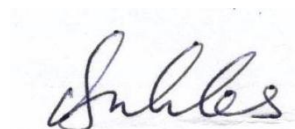


На правах рукописи



БУЛЕС ПЕТЕР

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КАРЬЕРНЫХ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
НА ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТКАХ РОССИИ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Подэрни Роман Юрьевич

Официальные оппоненты:

Захаров Юрий Никитович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет» (МАМИ), кафедра «Горное и нефтегазовое оборудование»,

Шварц Лев Израилевич

кандидат технических наук, Главный конструктор проекта. Дирекция по развитию ООО «ИЗ-КАРТЭКС» имени Г.П. Коробкова

Ведущая организация:

Тульский государственный университет

Защита состоится «___» _____ 2016 г. в ___ часов в ауд.А-305 на заседании диссертационного совета Д212.132.15 при ФГАОУ ВПО Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д.6, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и на сайте <http://misis.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета
канд. техн. наук, профессор

ШЕШКО

Евгения Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Увеличение объемов открытого способа разработки твердых полезных ископаемых в РФ в значительной степени зависит от эффективности работы наиболее широко применяемых в современных циклических и циклично-поточных комплексах оборудования, определяющим звеном которых являются одноковшовые карьерные канатные и гидравлические экскаваторы большой мощности с ковшами вместимостью от 12 м³.

В настоящее время на горных предприятиях мира эксплуатируются порядка 4500 одноковшовых экскаваторов с ковшами вместимостями свыше 12 м³, из которых около 85% - это карьерные гидравлические экскаваторы (КГЭ) – прямые и обратные лопаты. В РФ в эксплуатации находятся около 180 механических лопат отечественного производства заводов ИЗ «Картекс» и «УЗТМ» с ковшами вместимостью 12...32 м³, (42 из которых выпущены в 2010-2015 гг), а также около 20 мехлопат с ковшами 35...55 м³ компаний Caterpillar, P&N (США) и Taiyuan NM Group (Китай), которые работают наряду с парком порядка 300 карьерных гидравлических прямых и обратных лопат с ковшами вместимостями 12...45 м³, поставленными, преимущественно, компаниями Komatsu Mining Germany (KMG), Liebherr, а также Hitachi и в меньшей степени Caterpillar.

Гидравлический экскаватор представляет собой сложную систему, на работоспособность которой оказывают отрицательное влияние различные внешние и внутренние возмущающие факторы, и чем более весомыми они оказываются, тем выше вероятность ее отказа. Среди весьма значимых внешних факторов, оказывающих отрицательное воздействие на надежность гидравлических экскаваторов, а, следовательно, и на их производительность, прежде всего, следует упомянуть как климатические и горно-геологические условия, так и, в еще более существенной степени, несвоевременность замен расходных и изнашивающихся элементов как гидравлических, так и механических систем машин, которая может и должна быть устранена современной организацией сервисного их обслуживания и ремонта.

Поэтому, обеспечение высокой готовности гидравлических экскаваторов при их эксплуатации на горных предприятиях РФ, за счет повышения, как индивидуальной надежности компонентов, так и самого оборудования, сокращения количества отказов, а также, сокращения длительности простоев в ремонте, позволяющих улучшить эффективность их использования, является *актуальной* научной задачей.

Степень научной разработанности темы исследования.

Разработке оборудования для открытых работ посвящены исследова-

ния российских ученых: Н.В. Мельникова, Н.Г. Домбровского, К.Е. Виницкого, Д.П. Волкова, Л.И. Кантовича, В.Р. Кубачека, С.А. Панкратова, Р.Ю. Подэрни, Б.И. Сатовского и др., которые заложили фундаментальные основы теории его расчета и проектирования. Развитию теории надежности, в частности, гидроприводов горных машин посвящены работы: Л.А. Андреевой, Г.С. Бродского, В.Н. Гетопанова, А.И. Комиссарова, Г.Ю. Козина, М.С. Островского, И.Л. Пастоева, В.И. Русихина, М.Г. Рахутина, В.Ф. Сандалова, Л.С. Скобелева, Б.В. Слесарева, В.М. Штейнцайга, а также ряда зарубежных исследователей, в частности: Elevli S., Ercelebi, S.G., Kirmanli, Koelsh H.R., Ljungberg O., Oliver G.W., Pecht, M.G., Nash, F.R. и др.

Однако до настоящего времени в технической литературе, посвященной исследованиям КГЭ, не нашли должного отражения вопросы связанные с повышением их надежности (готовности к эксплуатации) за счет применения такой стратегии замен выработавших свой ресурс компонентов их систем, которая базируясь на статистически обоснованных сроках их наработки, обеспечивала бы оптимальные эксплуатационные затраты по их эксплуатации за оговоренный срок службы КГЭ, а поэтому, проведение дальнейших исследований в этой области, остается актуальным.

Целью работы является повышение надежности и эффективности эксплуатации карьерных гидравлических экскаваторов (КГЭ) на горных предприятиях РФ за счет реализации экономически обоснованной системы плановых превентивных замен основных изнашивающихся компонентов экскаваторов с определенными интервалами, при которых сокращаются сроки их восстановления, обеспечивается заданный высокий уровень готовности и минимизируются расходы на эксплуатацию за оговоренный срок их работы до списания.

Основная идея работы заключается в определении оптимальных сроков эксплуатации основных компонентов, агрегатов и систем карьерных гидравлических экскаваторов и обосновании рациональных нормативов превентивных замен критических элементов КГЭ, обеспечивающих заданные коэффициенты технической готовности (уровни надежности) оборудования, позволяющие продлить сроки их эксплуатации до заданных пределов.

Задачи исследования:

- сопоставительный анализ технологических характеристик современных канатных и гидравлических карьерных экскаваторов и оценка перспектив их применения на горных предприятиях РФ;
- анализ методов получения данных о надежности (отказах, времени восстановления и готовности) компонентов ГЭ за необходимый промежуток времени, обработка массивов статистических наблюдений, определение коли-

чественных значений исследуемых СВ и установление статистических закономерностей их распределения;

- разработка номенклатуры учета отказов компонентов ГЭ и оценка коэффициентов их готовности применительно к КГЭ, используемых на конкретных горных предприятиях с учетом условий контракта;
- разработка блок-схемы КГЭ, отражающей функциональные связи всех систем и механизмов в общей структуре гидравлического экскаватора в их взаимодействии;
- формирование исходного комплекта технической базы экскаваторов компании КМГ, учитывающего сроки службы и нормы трудовых затрат на замену и обслуживание их компонентов;
- разработка графиков комбинированной замены компонентов (стратегии обслуживания) КГЭ, обеспечивающих заданный уровень готовности его к работе и установленный срок службы до списания.
- разработка математической модели оценки изменения стоимостных показателей эксплуатации КГЭ, показывающей уровень его готовности к работе, позволяющей оптимизировать расходы на эксплуатацию в течение устанавливаемого срока его работы до списания, учитывающей ставки дисконтирования, снижение надежности оборудования в результате его старения.

Научные положения, разработанные лично соискателем и выносимые автором на защиту, их новизна:

1. Оценку показателей надежности систем гидравлического экскаватора и его готовности в целом следует производить с учетом последовательности функционального взаимодействия всех его компонентов на основе разработанной универсальной структурной блок-схемы экскаватора
2. Комплект технической базы КГЭ и технологические карты периодической замены его изнашивающихся компонентов, разработанные на основе их систематизации на сбалансированные по ресурсу группы с учетом установленных законов распределения наработок на отказ, обеспечивающие достижение заданного уровня готовности и выбранного срока службы экскаватора до заданных пределов.
3. Закономерность снижения базового уровня надежности КГЭ с увеличением срока эксплуатации машины, обуславливающая снижение текущих показателей МТBF и увеличение МТTR по сравнению с нормативными. Предложено понятие временного фактора старения оборудования, позволяющего учесть повышение расходов на заменяемые компоненты и соответствующие трудозатраты и обоснованно определить стратегию выбора рациональных сроков службы КГЭ на горных предприятиях.
4. Математическая модель оценки стоимости эксплуатации и технического об-

служивания экскаватора, разработанная в соответствии с технологическими картами замены компонентов, отличающаяся учетом ставки дисконтирования и временного фактора снижения надежности оборудования в результате его старения, позволяющая определить границу нулевого дохода, установить минимально допустимую производственную стоимость 1 м³ отгружаемого материала, а также обосновать выбор целесообразного срока работы экскаватора до списания

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: корректностью постановки задач исследований, научными положениями, выводами и рекомендациями, базирующимися на современных научных методах исследований, получением оценок показателей надежности с доверительной вероятностью $\gamma \geq 0,9$ и величиной относительной ошибки $\sigma \leq 0,1$ для гидросистем в целом и с доверительной вероятностью $\gamma = 0,8$ и величиной относительной ошибки $\sigma = 0,2$ для гидроэлементов основных функциональных групп гидросистем.

Методы исследований, использованные в работе: систематизация и анализ литературных источников; анализ и обобщение статистических наблюдений; теория планирования эксперимента и математические методы обработки данных; методы теории вероятности и математической статистики,

Научная новизна состоит в:

- установлении последовательных функциональных связей систем и механизмов КГЭ при их взаимодействии в его структуре, реализуемых в универсальной обобщенной блок-схеме КГЭ, позволяющей оценить уровень его надежности в целом;
- установлении сроков наработки и последовательности замен выработавших ресурс компонентов КГЭ для обеспечения заданного уровня его готовности к эксплуатации;
- разработке оптимальной комбинированной стратегии обслуживания КГЭ, обеспечивающей заданный уровень готовности его к работе, устанавливаемый срок его службы до списания и отказ от капитального ремонта путем одновременной превентивной замены с обоснованной периодичностью однотипных по ресурсу его компонентов, достигших установленного срока наработки;
- установлении зависимости снижения базового уровня надежности оборудования КГЭ от временного фактора при увеличении срока его службы, обуславливающей снижение текущих показателей МТBF и увеличения МТTR по сравнению с нормативными;
- выявлении четырех основных периодов интенсивности потока отказов (частоты) и установлении закономерности их изменения от времени на-

работки КГЭ;

- разработке математической модели оценки изменения стоимостных показателей эксплуатации КГЭ, позволяющей оптимизировать расходы на эксплуатацию в течение устанавливаемого срока его работы до списания с учетом ставки дисконтирования, темпа снижения надежности оборудования в результате его старения.

Практическое значение исследования состоит в разработке (впервые для экскаваторов, эксплуатирующихся в условиях РФ):

- номенклатуры фиксируемых отказов и методики оценки коэффициентов готовности применительно к КГЭ, используемым на конкретных горных предприятиях;
- группировкой основных компонентов ГЭ производства компании KMG, на функциональные группы, сбалансированные по ресурсу и среднему нормативному сроку службы;
- формированием исходного комплекта технической базы экскаваторов компании KMG, учитывающего стоимость, сроки службы и нормы трудовых затрат на замену и обслуживание их компонентов;
- разработкой регламентных таблиц-графиков комбинированной замены компонентов, являющихся основой оптимальной стратегии обслуживания КГЭ, устанавливающей сроки периодических замен компонентов с учетом часовой стоимости компонентов и трудозатрат на их замену и обслуживание.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Программы замен компонентов реализованы на экскаваторах РС 3000 месторождении кимберлитовых руд «им. Гриба» «Верхотинского» ГОКа Архангельского региона, и РС 5500 железорудного карьера ОАО «Карельский Окамыш», а также на экскаваторах типа РС ЗАО «АК АПРОСА» и ОАО ХК «Якутуголь».

Основные результаты исследований используются компанией Komatsu Mining Germany при разработке и изготовлении модификаций гидравлических экскаваторов, в частности новой модели РС 7000, а также при организации их сервис-мониторинга на карьерах, разработке технических средств и инструкций по эксплуатации гидросистем.

Апробация работы. Основные научные положения и принципиальные разделы диссертации в целом доложены на: Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» 2014 г. МГГУ и 2015 т 2016 г. НИТУ «МИСиС», Москва; В рамках 18, 19 и 20-й Международных выставок «Горное оборудование, добыча и обогащение руд и минералов» в докладах на Международных конференциях «Машины и оборудование для открытых горных работ», 2014, 2015 и 2016 г., Москва - Крокус Экспо; научных семинарах ООО «МОГОРМАШ», г. Москва, 2013 и 2014 г.; научных семинарах ЗАО «Mining Solutions», г. Москва,

2014 и 2015 г; научных семинарах кафедры Горные машины и оборудование в 2013 г. (МГГУ), 2014 г., 2015 и 2016 г. (НИТУ «МИСиС») г. Москва.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 работ, 4 из них в изданиях, входящих в перечень, рецензируемых журналов, утвержденных ВАК Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников информации из 107, приложения, включает 57 рисунков, 44 таблиц, в том числе 28 в приложении.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень научной разработанности темы исследования, сформулированы цель, основная идея работы, задачи исследования, основные научные положения и новизна, а также практическое значение работы.

В первой главе выполнен обзор исследований в области надежности систем карьерных экскаваторов в РФ и за рубежом, проведен анализ 15 объективных и 15 субъективных факторов, влияющих на формирование надежности гидравлических систем горного оборудования, показавший необходимость проведения более детальных исследований характеристик надежности КГЭ на основе изучения статистических данных их полевых испытаний, в частности, на горных предприятиях РФ.

Проведенный нами обзор мирового уровня экскаваторостроения и предложенная методика сравнения карьерных канатных (ККЭ) и гидравлических экскаваторов (КГЭ) по 27 показателям геологических, технических, технологических, эргономических, экологических и экономических характеристик, позволяют оценить применимость их в конкретных условиях горных предприятиях. Показано, что КГЭ имеют существенные технологические преимущества перед ККЭ, объемы поставок их с ковшами 25...45 м³ на мировом рынке преобладают, а обратным КГЭ альтернативы среди ККЭ нет. Несмотря на это, ККЭ, и далее останутся востребованными для долгосрочной эксплуатации в течение, не менее 15...30 лет, особенно в классе ковшей свыше 45 м³.

Для сохранения же конкурентоспособности КГЭ, необходимо обеспечить их высокую готовность к эксплуатации в течение 10...15 лет при приемлемых экономических затратах, за счет повышения, как надежности их компонентов, сокращения частоты отказов и длительность простоев их в ремонте, что можно осуществить внедрением оптимальной системы их обслуживания, предусматривающей периодические замены изнашивающихся и расходных элементов, и тем самым продлить срок службы машин до заданных пределов.

На основе выполненного нами обзора и анализа сформулированы цель, идея и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы и свидетельствующие об их актуальности.

Вторая глава посвящена разработке методических основ исследования надежности работы компонентов КГЭ, анализу конструкций и гидравлических схем КГЭ производства КМГ, составлению их обобщенной структурной блок-схемы, изучению показателей количественной оценки надежности их работы,

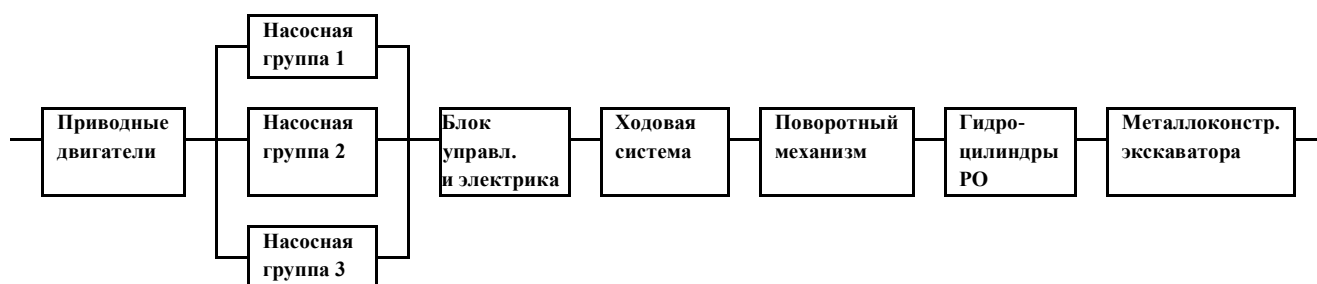


Рис. 1. Универсальная обобщенная структурная блок-схема КГЭ типа РС

На основе анализа конструкций КГЭ типа РС, установлено, что все функциональные группы гидравлического и механического оборудования имеют последовательное, с позиций надежности взаимодействие, поскольку отказ одной из групп приводит непосредственно к отказу всего экскаватора в смысле полноценной его эксплуатации, хотя и сохраняет (частично) возможность функционирования его отдельных элементов и агрегатов. Предложена универсальная обобщенная структурная блок-схема (рис. 1), отражающая функциональные связи компонентов, как гидравлических систем, так и основных механизмов в общей структуре ГЭ, в их взаимодействии.

Вероятность безотказной работы такой системы $P_{\text{сист}}$ и средняя наработка на отказ системы последовательно взаимодействующих элементов $T_{1(\text{сист})}$ определяются выражениями

$$P_{\text{сист}} = \prod_{i=1}^M P_i = \prod_{i=1}^M (1 - q_i), \quad \text{и} \quad T_{1(\text{сист})} = \left(\sum_{i=1}^N 1/T_{1i} \right)^{-1},$$

где P_i - вероятность безотказной работы i -го элемента; M – общее число последовательно взаимодействующих элементов, q_i - вероятности отказа каждого i -го последовательного элемента системы; T_{1i} – средняя наработка на отказ i -го элемента подсистемы.

Для оценки и анализа надежности систем КГЭ типа РС, приняты обозначения и показатели в соответствии с действующим в РФ ГОСТ 27.002-89 "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения". Нами также использовалась и терминология, принятая в мировой практике машино- и приборостроения, в частности "MTBF" - для среднего времени между отказами и "MTTR" - для среднего времени ремонта.

Коэффициент готовности – K_G определялся как отношение количества отработанных мч T_0 к сумме отработанных T_0 мч и времени восстановления компонента T_B , ч:

$$K_G = T_0 / (T_0 + T_B).$$

Разработана классификация простоев и отказов, предусматривающая регистрацию отказов по 17-ти категориям и 143 компонентам, определен необходимый перечень и объем статистической информации для оценки надежности, в частности КГЭ РС 5500, эксплуатирующихся на карьерах рудоуправления ОАО «Карельский Окамыш», где в соответствии с их требованиями и договором с КМГ, показатели надежности K_G , K_{TG} , $K_{И}$, для конкретного оборудования регистрировались в соответствии с выражениями

$$K_G = (T - T_{ТП}) / T;$$

$$K_{TG} = (T - T_{ТП} - T_{РО} - T_{ТО}) / T;$$

$$K_{И} = (T - T_{ТП} - T_{РО} - T_{ТО} - T_{ОП}) / T.$$

где T – полный баланс времени отработанного КГЭ в карьере; $T_{ТП}$ – время на ликвидацию неисправности базовых компонентов экскаватора; $T_{РО}$ – на «ремонт и замену компонентов ковшей и рабочего оборудования» и $T_{ТО}$ – на «плановые ТО и Р»; $T_{ОП}$ – на преодоление плохо организованных процедур.

В РФ эксплуатируются около 100 КГЭ компании КМГ: 30 РС 3000; 35 РС 4000; 25 РС 5500 и 3 РС 8000, из которых 57 на угольных разрезах, 18 на железорудных и 18 на меднорудных и кимберлитовых карьерах. Конкретные массивы данных по надежности компонентов КГЭ получены на предприятиях РФ от: двух РС 5500 карьера ОАО «Карельский Окамыш» и трех РС 3000 «Верхотинского» карьера месторождения «им. Гриба» в объеме свыше 100 тыс. мч, а также 5 РС 5500 карьеров Hope Downs, West Angelas и Yandicoogina в Австралии в объеме 35 тыс. мч, 10-ти РС 8000 карьеров Drummond и Cerrejon в Колумбии в объеме 180 тыс. мч.

Уровень исходной информации достаточен для оценки надежности исследуемых объектов с доверительной вероятностью $\gamma \geq 0,9$ и относительной ошибкой $\sigma \leq 0,2$.

Таким образом, реализовано 1-ое научное положение, заключающееся в том, что оценку показателей надежности систем гидравлического экскаватора и его готовности в целом следует производить с учетом последовательности функционального взаимодействия всех его компонентов на основе разработанной универсальной структурной блок-схемы экскаватора

В третьей главе исследованы статистические закономерности проявления отказов КГЭ, установлены законы распределения исследуемых парамет-

ров, произведены числовые оценки МТBF и МТTR, принимаемые за основу при обосновании рекомендуемых нами нормативов наработки компонентами экскаваторов моточасов до замены и оценке трудозатрат на выполнение сервисного обслуживания и ремонтных работ, направленных на повышение надежности КГЭ при их эксплуатации.

Проведены исследования работы 3-х КГЭ типа РС 3000 для определения надежности их компонентов по 5-ти категориям (табл. 1), установлены количественные значения: простоев и их длительность, наработка на отказ - МТBF, среднее время на восстановление – МТTR и коэффициенты готовности $K_{Г}$.

Таблица 1. Обобщенные показатели надежности основных компонентов экскаваторов РС 3000 при наработке им 60700 мч

Категория	Кол-во отказов	Сумма времени простоев, ч	МТBF, мч	Среднее МТTR, ч	$K_{Г}$
Гидрооборудование (ГО)	108	1327,5	562,04	12,29	0,9786
Рабочее оборудование (РО)	73	1883,5	831,5	25,80	0,97
Ходовое оборудование (ХО)	28	1136	2168,0	51,64	0,982
Электрооборудование (ЭО)	22	993,5	2759,1	45,16	0,9839
Другое	60	1573	1011,7	26,21	0,975
По 5 категориям	291	6913,5	208,6	23,76	0,898

В целом, по отказам, ГО этих РС 3000D, имеет наименьшие МТBF - 562,04 мч и МТTR 12,29 ч при наибольшем количестве отказов 108 (рис. 2), его доля в простоях - 19%. Наиболее часто выходящие из строя его компоненты находятся в зоне ковша с неблагоприятными условиями эксплуатации по вибрационному и ударному режимам нагружения, запыленности и температуре.

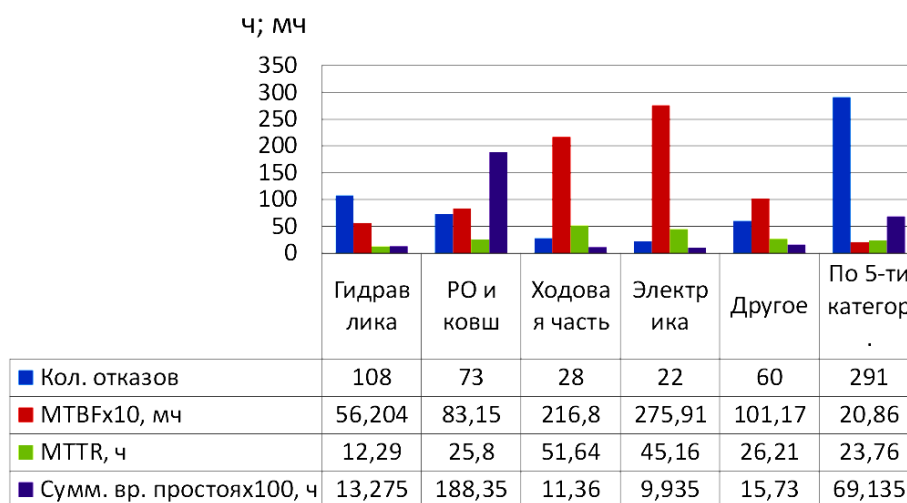


Рис. 2. Сравнительная диаграмма распределения количества и длительности отказов основных компонентов экскаваторов РС 3000 и показатели их надежности - МТBF и МТTR

Наибольшая продолжительность простоев 1883,5 ч у РО и приходилась на восстановление ковшей сваркой, замену его вооружения, и в целом по группе экскаваторов оказалась наибольшей - 27,24% .

MTBF ХО оказалась высокой 2168 мч, как и MTTR 51,64 ч, доля же простоев составила 16,43%. Наиболее часто разрушаются опорные катки, траки, в меньшей степени - ролики поддержки гусеничной ленты и система ее натяжения.

MTBF ЭО у дизельных КГЭ наивысшая 2756,1 мч, при небольшом количестве отказов 22, общей продолжительностью 993,5 ч и MTTR - 45,16 ч. В целом, доля простоев оказалась наименьшей 14,37%, а КГ - 0,9839.

По категории «Другое», отмечено 60 отказов с продолжительностью простоев 1573 ч (22,75% в общей доле), связанных с заменами ДВС, системы ее охлаждения и вентиляции, кондиционирования кабины оператора.

Проведены исследования работы 2-х КГЭ типа РС 5500Е на железорудном карьере ОАО «Карельский Окамыш». Регистрация отказов их компонентов осуществлялась по 17 категориям и 143 их элементам.

КГЭ РС 5500 №1 и №2 за период наблюдения отработали 12432 и 10968 мч, имели 13206 и 17324 простоя, а удельные наработки на один отказ соответственно составили 0,941 и 0,633 мч. Конкретные значения наработок на отказ и количество простоев по каждому исследуемому компоненту КГЭ РС 5500 отмечены на структурных блок-схемах (рис. 3).

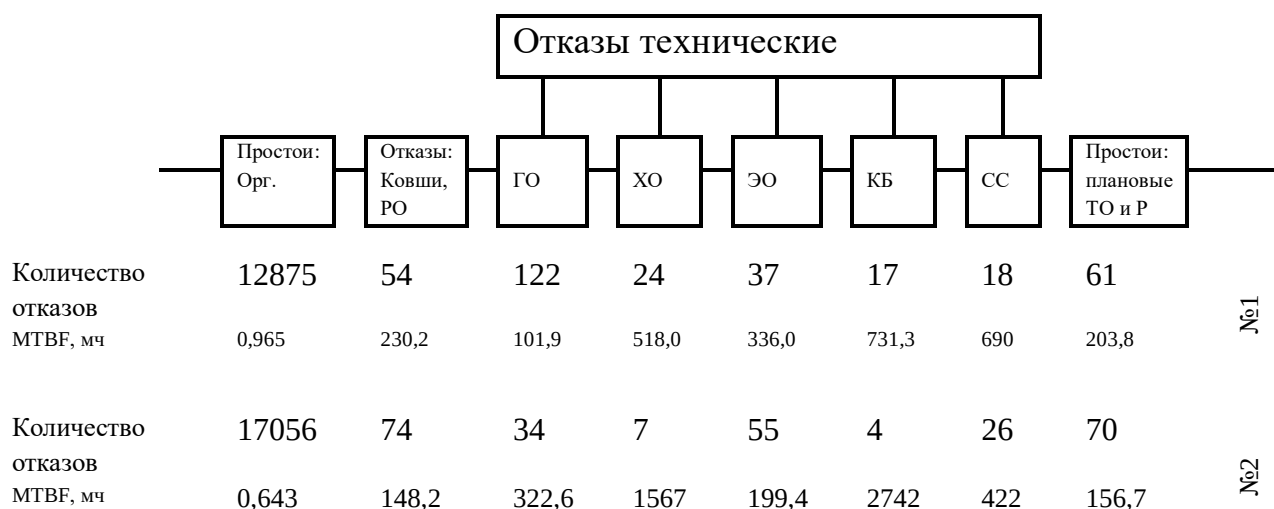


Рис. 3. Структурные блок-схемы и показатели надежности экскаваторов РС 5500Е №1 и №2

В категории «Организационные» причины зафиксировано наибольшее количество отказов 12875 и 17056, суммарной длительностью 1942,3 ч (49,44%) и 1602,6 ч (58,74%), и соответствующие наработки на отказ 0,965 и 0,43 мч, имевшие место по причинам не относящимся к их физическому со-

стоянию (перечень установлен регламентом компании KMG и контрактом с ОАО «КО»): отсутствие электроснабжения и транспорта для погрузки, задержки доставки запчастей, горно-технологические и климатические неблагоприятные факторы, внешние управленческие ошибки и др.

В категории «Технические» простои (по экскаватору в целом): количество отказов 216 и 121; их длительности 961,17 ч (22,3%) и 304,3 ч (11,17%) и МТБФ 57,56 и 90,64 мч. Учитывались отказы: ГО, ХО, ЭО, металлоконструкций, опорно-поворотного круга, системы смазки, кабельного барабана и др.

В категории восстановительных простоев «Ковши и РО», учтены: количество отказов 54 и 74; их длительность 155,83 ч (3,94%) и 214,13 ч (7,84%) и МТБФ 230,3 и 148,2 мч, в результате разрушения ковшей; шарниров стрел и рукоятей, их пальцев, втулок, креплений и др. В категории «Плановые ТО и Р»: количество отказов 61 и 70; их длительности 876,85 ч (22,17%) и 607,08 ч (22,25%) и МТБФ 203,8 и 156,7 мч затраченные на: плановое обслуживание и инспекцию узлов машины, осуществление модификации, капитального ремонта, модернизации и др.

Гистограмма частоты распределения наработок на отказ гидравлических компонентов КГЭ РС 5500Е (рис. 4,а), подтверждает экспоненциальный их характер при уровнях безотказности работы не ниже 0,975, что выше, чем у машины в целом 0,95. Равномерный характер распределения отказов по интервалам всех систем в целом (рис. 4,б), отмечен у РС 8000.

Аналогичные данные были получены и при эксплуатации 5-ти РС 5500 на карьерах Hope Down, West Angelas и Yandicoogina в Австралии.

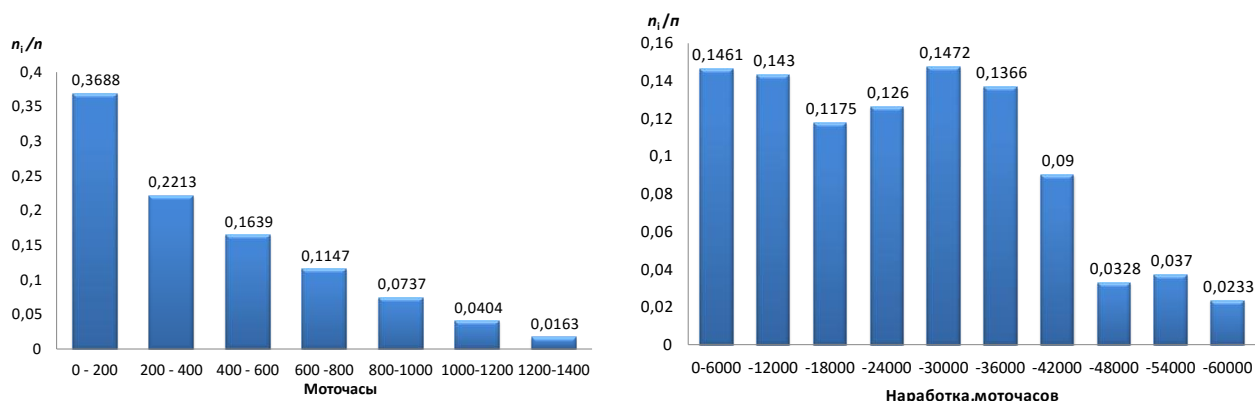


Рис. 4. Гистограмма процентного распределения частоты: а - наработки на отказ гидравлического оборудования экскаватора РС 5500; б - отказов экскаватора РС 8000

По результатам эксплуатации 10-ти КГЭ типа РС 8000 на карьерах Drummond и Cerrejon в Колумбии, были зарегистрированы свыше 20 тыс. отказов, и построены графики (рис. 5): K_T ; МТБФ; МТТР и производительности, из которых следует, что изменения K_T ; МТБФ и МТТР, а как следствие и произво-

длительности, в пределах первого периода эксплуатации (0...2 тыс. мч) сопровождаются достаточно большой флуктуацией, характерной для периода приработки оборудования, устранения дефектов сборки и др.

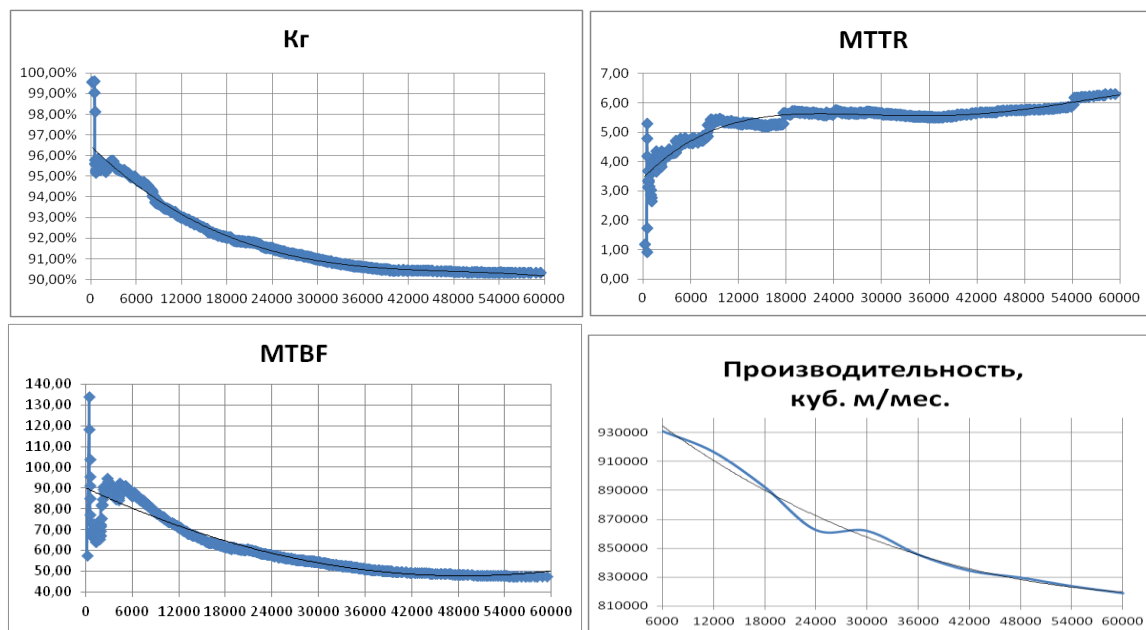


Рис. 5. Графики изменения коэффициента готовности K_g , наработки на отказ MTBF (мч), времени восстановления MTTR (ч) и месячной производительности ($\text{м}^3/\text{мес.}$) экскаваторов РС 8000 за период наработки 60 тыс. мч

Установлены еще три характерных периода изменения потока отказов: 2...6 тыс. мч - период снижения его до уровня режима нормальной эксплуатации, как результат осуществления регламентных замен изнашивающихся компонентов и стабилизации сервисного обслуживания; 6...18 тыс. мч – режим стабильной эксплуатации, с увеличивающимся потоком отказов, преимущественно по гидравлическому, рабочему и ходовому оборудованию, до значений предельных по износу их главных компонентов, что определяет первую временную границу их крупной плановой замены; 18...36 тыс. мч - продолжение режима устойчивой эксплуатации, с последующим равномерным увеличением потока отказов, как следствие естественного старения оборудования. Далее, вплоть до окончания выбранного срока эксплуатации КГЭ, должно осуществляться периодическое повторение плановых замен компонентов, обеспечивающих его эксплуатацию с высоким уровнем готовности, несмотря на дальнейшее увеличение потока отказов вследствие естественного старения оборудования.

Зависимость старения оборудования от наработки (количества лет эксплуатации), должна учитываться при определении расходов на заменяемые компоненты и на сопутствующие им трудозатраты, введением поправочного коэффициента Y . Он представляет собой параметр, зависящий от отношения

средних значений MTTR к MTBF за выбранный период времени, значение которого, в конкретном году X_i , аппроксимируется уравнением вида $Y_i = AX_i + B$, где A и B , зависят от качества компонентов машины, условий ее эксплуатации, а также от типа привода насосной станции.

$$\begin{array}{ll} \text{Для} & \text{PC 5500E} & Y_i = 0,0367X_i + 0,0247, & R^2 = 0,9243; \\ \text{для} & \text{PC 3000D} & Y_i = 0,0379X_i + 0,0733, & R^2 = 0,8324. \end{array}$$

Произведена группировка основных компонентов механических и гидравлических систем КГЭ производства компании КМГ в комплекты с одинаковой наработкой до отказа (ресурсу), на основе которой разработана исходная техническая база заменяемых компонентов экскаватора, устанавливающая их сроки службы и нормы трудовых затрат на замену и обслуживание, по которой, для любого экскаватора компании, составляются технологические карты (табл. 2 и 3) замен компонентов, средней часовой стоимости запчастей и трудозатрат сервисного персонала необходимых для осуществления превентивного обслуживания машины.

Таким образом, реализовано 2-ое научное положение, состоящее в разработке комплекта технической базы КГЭ и технологических карт периодической замены его изнашивающихся компонентов на основе их систематизации на сбалансированные по ресурсу группы с учетом установленных законов распределения наработок на отказ, обеспечивающих достижение заданного уровня готовности и выбранного срока службы экскаватора до заданных пределов.

В четвертой главе разработаны рекомендации по стратегическому планированию замен выработавших свой ресурс модулей КГЭ и предложена математическая модель оценки стоимости его эксплуатации и технического обслуживания в соответствие с рекомендуемой стратегией замен изнашивающихся компонентов, позволяющая выбрать оптимальный срок службы КГЭ при сохранении высокого уровня его технической готовности.

Надежность КГЭ зависит от частоты его отказов, MTBF и MTTR. Коэффициент технической готовности $K_{ТГ}$ определяется выражением

$$K_{ТГ} = 1 / (1 + T_{ПР} \lambda_{ПР} + \sum_{i=1}^n T_{Pi} \lambda_{Pi}) \rightarrow \max ,$$

где $T_{ПР}$ и T_{Pi} - средние продолжительности профилактики и ремонта, ч; $\lambda_{ПР}$ и λ_{Pi} - интенсивности потоков требований по профилактике и ремонту, ч⁻¹; n - количество логически последовательно соединенных элементов оборудования.

Таблица 2. Технологическая карта распределения часовой стоимости (Евро/час) и сроков замен компонентов экскаватора PC 3000FS/D при его эксплуатации 60 тыс. мч

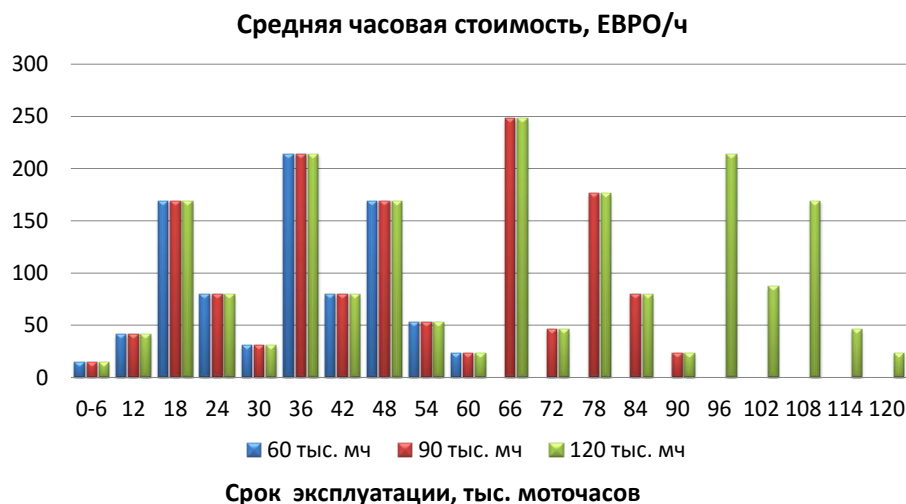
PROJECT: Moscow Mining University					PC3000 FS/D		50% Замененные части		6000 Кол. часов в год		10 лет эксплуатации		Всего часов: 60 000									
Название компонента	новый номер узла	Ожидаемый срок службы	рейс. цена Jan-15	Замены программы	Кол.	O	P	E	R	A	T	I	N	G	-	H	O	U	R	S	Среднее Евро/ч	
Поворотный круг	898 104 40	30 000	132 073		1						1										2,20	
Набор монтажных инструментов	787 928 73	30 000	28 180		1						1										0,47	
Редуктор поворота	944 872 40	20 000	115 271	да	1				1			1									3,22	
Мотор поворота	959 308 40	12 500	13 248	да	1				1			1		1							0,74	
Муфта	655 545 40	15 000	30 277		1				1			1		1							1,51	
Редуктор Насосной блока	915 376 40	30 000	101 348	да	1						1										1,41	
Главный насос	7082000014	15 000	56 292		3				3			3		3							8,44	
Насос вентилятора	7081000020	12 500	12 549		1				1			1		1							0,84	
Пилотный насос	70512 351 40	12 500	1 724		1				1			1		1							0,11	
Насос смазки редуктора	70521 362 40	10 000	2 158		1				1			1		1							0,18	
Рadiator	928 700 40	30 000	54 080		1						1										0,90	
Охладитель масла	950 189 40	10 000	11 534		4				4			4		4							3,84	
Мотор вентилятора	907 486 40	10 000	2 342		2				2			2		2							0,39	
Блок клапанов	977 992 40	30 000	22 879		1						1										0,38	
Блок клапанов	977 993 40	30 000	23 240		1						1										0,39	
Блок клапанов	977 998 40	30 000	21 896		1						1										0,36	
Насос гудриков	788 884 73	10 000	10 892		2				2			2		2							1,83	
Узел вращателя Rotary Joint	659 008 40	15 000	25 921	да	1				1			1		1							1,09	
Комплект трасс (1000 мм)	788 880 73	20 000	240 163		2				2			2									16,01	
Редуктор ходовой	898 108 40	20 000	170 492	да	2				2			2		2							9,52	
Мотор ходовой	654 891 40	15 000	15 300	да	2				2			2		2							1,28	
Звездочка ведущая (ср. ов.)	886 287 40	15 000	37 135		2				2			2		2							3,71	
Колесо направляющее Idler	970 766 40	20 000	43 776		2				2			2		2							2,52	
Опорные катки	970 767 40	15 000	9 686		14				14			14		14							6,78	
Поддерживающий ролик	972 214 40	15 000	8 808		6				6			6		6							2,64	
Цилиндр натяжной	953 895 40	20 000	11 186		4				4			4									1,49	
Цилиндр стрелы	973 813 40	15 000	87 757	да	2				2			2		2							7,35	
Цилиндр рукояти	979 540 40	15 000	81 676	да	2				2			2		2							6,84	
Цилиндр ковша	979 535 40	10 000	76 696	да	2				2			2		2							10,71	
Цилиндр челюсти	973 840 40	7 500	41 358	да	2				2			2		2							8,08	
Шланги высоконапорные			83 937			0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700	0,700						9,69	
Плоские и Вкладыши			160 685			0,100	0,200	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300						7,23	
Генеральный ремонт			411 792			0,075	0,175	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225	0,225						13,97	
Фильтры	Wilo Oil Managem		49 343			1,00	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96						7,93	
Стоимость в час:						25,74	78,68	189,00	252,29	45,28	279,89	256,52	184,77	80,73	41,06							144,40
аккумулятивирован						52,21	97,81	136,43	118,20	145,15	161,06	164,02	155,88	144,40								F

Таблица 3. Технологическая карта распределения трудозатрат (чел.час) и сроков замен компонентов экскаватора PC 3000FS/D при его эксплуатации 60 тыс. мч (10 лет)

PC3000 FS/D	предпол.	время замены	кол.	механизмов	кол. чел. часов	PROJECT: Moscow Mining University										период эксплуатации		10 лет			Сумм. кол. часов эксплуат.		60 000																	
	сроки службы	компонента	компонентов		на компонент	O	P	E	R	A	T	I	N	G	-	H	O	U	R	S	суммарное чел. часов																			
	[ч]	[ч]	кол.	кол.	[ч]	≤ 6 000	12 000	18 000	24 000	30 000	36 000	42 000	48 000	54 000	60 000																									
Поворотный круг	30 000	60	1	4	240						240										240																			
Редуктор поворота	20 000	8	1	2	16				16			16									32																			
Мотор поворота	12 500	3	1	2	6			6		6		6		6							24																			
Муфта	15 000	2	1	2	4			4			4		4								12																			
Редуктор насосной станции	30 000	16	1	3	48						48										48																			
Главный насос	15 000	5	3	2	10			30			30		30								90																			
Насос вентилятора	12 500	1	1	1	1			1		1		1		1							4																			
Пилотный насос	12 500	1	1	1	1			1		1		1		1							4																			
Насос смазки редуктора	10 000	1	1	1	1		1		1		1		1		1						5																			
Радиатор	30 000	8	1	2	16						16										16																			
Охладитель масла	10 000	6	4	2	12			48		48		48		48							240																			
Мотор вентилятора	12 500	1	2	1	1			2		2		2		2							8																			
Блок клапанов	30 000	5	3	2	10						30										30																			
Насос гудриков	10 000	1	2	1	1		2		2		2		2		2						10																			
Узел вращателя	15 000	6	1	2	12			12			12		12								36																			
Ходовой комплект трактов	20 000	4	2	4	16				32			32									64																			
Ходовой редуктор	20 000	12	2	2	24				48			48									96																			
Ходовой мотор	15 000	2	2	1	2			4			4		4								12																			
Звездочка (ср. ов.)	15 000	8	2	2	16			32			32		32								96																			
Ведущий ролик	20 000	4	2	2	8				16			16									32																			
Каток опорный	15 000	2	14	2	4				56			56		56							168																			
Поддерживающий ролик	15 000	3	6	2	6				36			36									108																			
Цилиндр натяжения хода	20 000	6	4	2	12				48			48									96																			
Цилиндр стрелы	15 000	6	2	3	18				36			36		36							108																			
Цилиндр рукояти	15 000	6	2	3	18				36			36		36							108																			
Цилиндр ковша	10 000	4	2	3	12		24		24		24	24		24							120																			
Цилиндр челюсти	7 500	3	2	2	6		12	12	12		12	12	12	12							84																			
Двигатель	15 000	20	1	4	80				80			80		80							240																			
Вкладыш опоры стрелы	20 000	26	4	3	78				312			312									624																			
Вкладыш Стрела-Рукоять	20 000	20	4	3	60				240			240									480																			
Вкладыш Рукоять-Ковш	15 000	10	4	2	20				80			80		80							240																			
Вкладыш Ковш-Челюсть ПЛ	15 000	8	4	2	16				64			64		64							192																			
Вкладыш цилиндра Стрелы	15 000	8	4	3	24				96			96		96							288																			
Вкладыш цилиндров Рукояти	10 000	8	4	3	24			96		96		96		96							480																			
Вкладыш цилиндров Ковша	10 000	6	4	2	12			48		48		48		48							240																			
Вкладыш цилиндров Челюсти ПЛ	10 000	6	4	2	12			48		48		48		48							240																			
Переливные клапаны давления	7 500	1	24	1	1		24	24	24		24	24	24	24							168																			
Профилактическое обслуживание																																								
250 ч		4,5		2	9	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108							1 080																		
500 ч		5		2	10	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60							600																		
1000 ч		8		4	32	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64							540																		
2000 ч		10		4	40	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80							800																		
3000 ч		12		4	48	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96							960																		
Суммарное количество часов																						408	711	1 020	1 423	418	1 611	1 433	1 010	721	408									9 163

Нами предложено использовать такую стратегию обслуживания КГЭ производства КМГ, когда назначается период наработки агрегатов и узлов с равным ресурсом, при достижении, которого, они и все элементы, связанные с ними в цепи с близким к намеченному ресурсом или имеющие меньший нормативный срок эксплуатации заменяется превентивно новыми, что позволяет отказаться от капитального ремонта в традиционном исполнении, характерного для канатных карьерных экскаваторов.

а)



б)

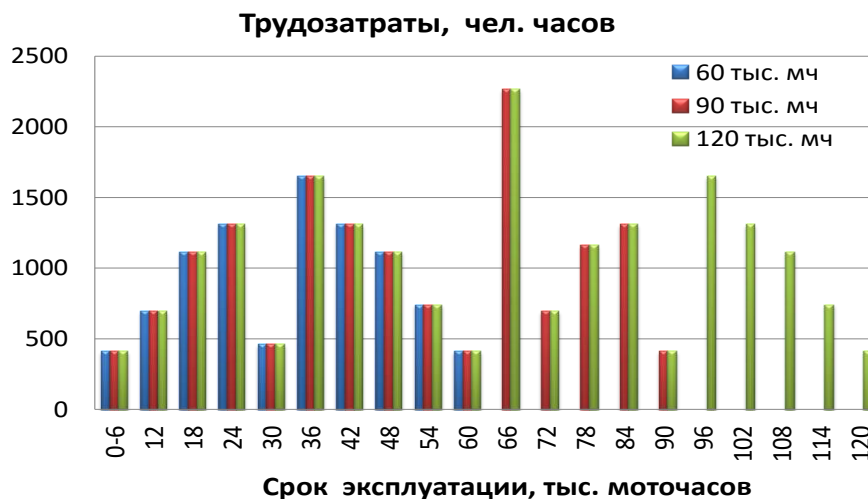


Рис. 6. Гистограммы изменения: а - средней часовой стоимости заменяемых компонентов (ЕВРО/час); б - трудозатрат по замене компонентов и превентивному обслуживанию (чел. часов) КГЭ РС 3000FS/D при сроках его эксплуатации, соответственно, 60, 90 и 120 тыс. мч (10, 15 и 20 лет).

Разработаны технологические карты периодических замен компонентов с оценкой, как средней часовой стоимости запчастей (табл. 2), так и трудозатрат сервисного персонала (табл.3), необходимых для производства превентивного

обслуживания машины за период наработки 60...120 тыс. мч (ориентировочный срок службы 10...20 лет). Усредненные стоимости заменяемых компонентов и соответствующие трудозатраты для КГЭ РС 3000 при наработке им, например 60 тыс. мч достигают максимальных значений в интервалах 3-го, 6-го и 8-го годов эксплуатации (рис. 6), на которые приходятся плановые ремонты, регламентные замены изнашивающихся компонентов, модернизация и др., повышающие готовность оборудования к эксплуатации.

С увеличением типоразмера машины - мощности, массы и вместимости ковша, увеличении сроков эксплуатации машин, например с 60 до 90 тыс. мч, относительные трудозатраты в процентном отношении снижаются соответственно с 23 до 20%, что подтверждает целесообразность продления сроков их наработки, по крайней мере, до 90 тыс. мч (15 лет).

Сравнительный анализ месячной производительности отнесенной к 1 м³ вместимости ковша (м³ в мес./м³) 111-ти КГЭ с ковшами 10...42 м³ и 20-ти ККЭ с ковшами 10...33 м³ (рис. 7) показал, что КГЭ после наработки ими 60 тыс. мч, превышал таковую у ККЭ на 16,5%, а темпы снижения производительности с увеличением наработки у них сохранялись постоянными и одинаковыми, в результате их старения.

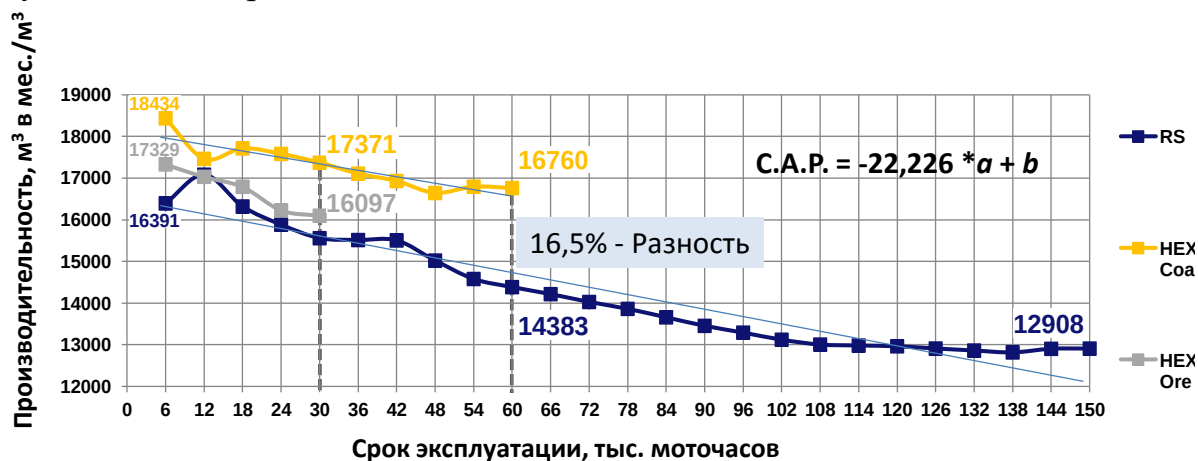


Рис. 7. График изменения удельной месячной производительности экскаваторов м³ отнесенной к 1 м³ вместимости ковша в соответствии с их наработкой тыс. мч: гидравлических (HEX), соответственно, на угольных (Coal) разрезах и железорудных (Ore) карьерах, в сравнении с канатными (Rs) экскаваторами

Градиент снижения производительности с достаточной точностью аппроксимируется линейным уравнением

$$C.A.P. = - 28,226 * a + b,$$

где a – планируемый срок службы (тыс. мч); b - среднемесячная удельная производительность (отнесенная к 1 м³ вместимости ковша) отсчитываемая начиная с 6 тыс. мч эксплуатации

Таким образом, реализовано третье научное положение, заключающееся в установлении закономерности снижения базового уровня надежности КГЭ с увеличением срока эксплуатации машины, обуславливающая снижение текущих показателей МТБФ и увеличение МТТР по сравнению с нормативными. Предложено понятие временного фактора старения оборудования, позволяющего учесть повышение расходов на заменяемые компоненты и соответствующие трудозатраты и обоснованно определить стратегию выбора рациональных сроков службы КГЭ на горных предприятиях.

Процесс оптимизации технического обслуживания КГЭ как способ повышения его готовности, требует использования математической модели, позволяющей учитывать временные изменения стоимостных показателей эксплуатации КГЭ, осуществляемой в соответствии с предлагаемым алгоритмом замен изнашивающихся компонентов, обеспечивающим заданный высокий уровень его готовности к работе и оптимизацию расходов на эксплуатацию в течение выбираемого срока службы до списания, с учетом ставки дисконтирования, минимизации себестоимости 1 м^3 отгружаемого продукта (у.е./ м^3), и фактора снижения надежности оборудования в результате его старения.

Такая модель, позволяет эксплуатационнику, на стадии приобретения КГЭ, запланировать необходимую длительность его жизненного цикла с учетом конкретного срока отработки предназначенного для него горного участка месторождения и финансовых возможностей предприятия, а также предусмотреть систему поставок и плановых замен необходимых компонентов.

Математическая модель оценки стоимости эксплуатации и ТО КГЭ представляется выражениями

$$NPV = X_J - P_0; \quad C_j = \sum_{i=1, k=1}^{n, m} [(N_i + M_k) k_{hi} + L_i C_M],$$

$$NPV = - P_0 + \sum_j^g \{ Q_{\text{Э}} * k_{cj} * C_{\text{пс}j} - \sum_{i=1, k=1}^{n, m} [(N_i + M_k) k_{hi} + L_i C_M] \} / (1 + \delta)^j + P_{\text{Л}} / (1 + \delta)^g,$$

где: NPV - чистая приведенная стоимость, принимаем $NPV = 0$, т.е. 0 дохода; X_J - прибыль в j -м году; P_0 - полная стоимость КГЭ на месте эксплуатации; $Q_{\text{Э}}$ - среднегодовая эксплуатационная производительность КГЭ, $\text{м}^3/\text{год}$; $C_{\text{пс}j}$ - текущая себестоимость 1 м^3 отгружаемого материала, у.е/ м^3 ; k_{cj} - коэффициент, учитывающий снижение производительности КГЭ в каждом году эксплуатации; C_j - расходы на эксплуатацию в j -м году, у.е; δ - ставка дисконтирования; $P_{\text{Л}}$ - остаточная ликвидационная стоимость КГЭ, у.е; g - планируемый срок эксплуатации, лет; N_i - стоимость i -го компонента/запчасти, у.е; M_i - стоимость замены и обслуживания i -го компонента/запчасти, у.е; k_{hi} - коэффициент временного снижения надежности отнесенный к стоимости запасных частей, отражающий увеличение эксплуатационных затрат в каждом году эксплуатации; L_i - трудозатраты на обслуживание/замену i -го компонента, час; C_M - ставка механика, у.е/ч; m - количество обслуживаемых систем; n - количество обслуживаемых и заменяемых компонентов экскаватора.

Для гипотетического КГЭ класса РС 3000D с ковшом 15 м^3 и при исходных данных $P_0 = 3,9$ млн. Евро; $Q_{\text{э}} = 6$ млн. $\text{м}^3/\text{год}$; $T_y = 6$ тыс. мч; $C_{\text{ч}}$ и T_3 в соответствие с (табл. 2 и 3) или (рис. 6); $C_M = 35$ Евро /ч; $P_{\text{л}} = 273$ тыс. Евро; $\delta = 0,15$; $k_{\text{сj}} = 0,011164$; $k_{\text{ни}} = 0,0379g + 1,0733$; неизменности величин $C_{\text{ч}}$, T_3 и C_M в течение выбранного срока эксплуатации $g = 20$ лет, были определены следующие характеристики эксплуатации: минимально допустимую величину ежегодно получаемой прибыли X_j для обеспечения возврата банковского кредита при ставке дисконтирования δ , - динамику роста суммарных расходов на замену компонентов и сопутствующих трудозатрат по мере увеличения срока эксплуатации экскаватора (рис. 8,а); минимально допустимую производственную себестоимость погрузки 1 м^3 (Евро/ м^3) для получения нулевой прибыли (рис. 8,б).

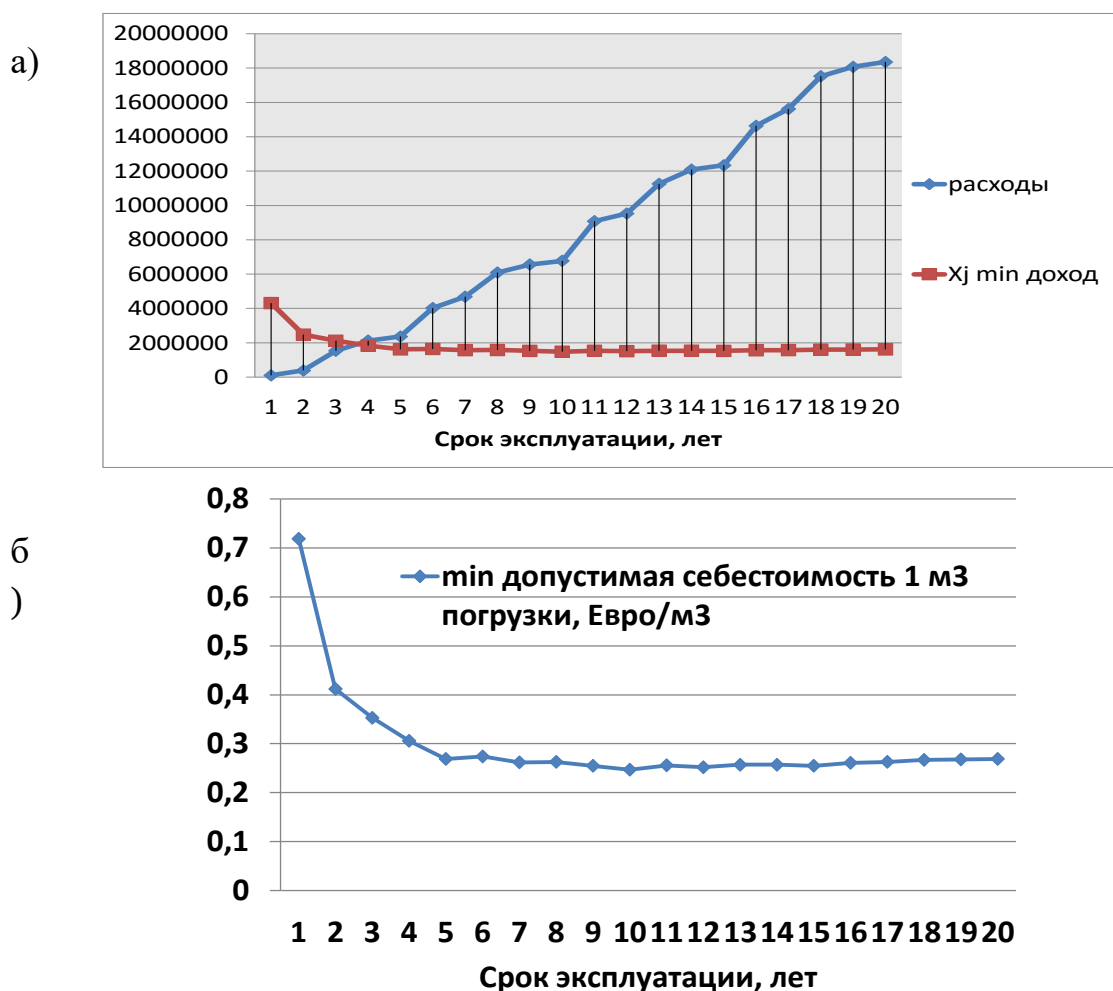


Рис. 8. а - сравнительная диаграмма изменения минимальной потребной величины ежегодного дохода X_j и величин доходов по годам и накопленных суммарных расходов (Евро) на замену компонентов и сопутствующих трудозатрат; б - график минимально изменения допустимой производственной себестоимости погрузки 1 м^3 (Евро/ м^3) для получения нулевой прибыли при ставке дисконтирования 15%.

На 10-м году эксплуатации, как потребная величина дохода X_J , так и минимально допустимая текущая производственная себестоимость 1 м^3 отгружаемого материала достигают абсолютных минимальных значений и составляют соответственно 1479556 Евро и 0,247 Евро/ м^3 . При продлении срока службы, последующие минимальные значения вышеупомянутых величин отмечаются в 12-м и 15-м годах, соответственно, после чего имеет место постоянный, хотя и не очень интенсивный их рост. Уменьшение ставки дисконтирования δ приводит к соответствующему снижению и допустимой производственной себестоимости 1 м^3 отгружаемого материала.

Установлено, что на временном отрезке эксплуатации КГЭ 7...15 лет, разница по величинам необходимых доходов (рис. 8) не превышает 4%. В тоже самое время, после пятого года эксплуатации, отмечается стабильный рост суммарных расходов на замену компонентов и сопутствующих трудозатрат, и по отношению к начальной стоимости владения экскаватора равной, в 7-м, 10-м, 12-м и 15-м годах, он, соответственно, составляет в 1,2; 1,73; 2,44 и 3,16 раз, достигая 4,7 раз в 20 году.

Таким образом, реализовано 4-е научное положение, заключающееся в разработке математической модель оценки стоимости эксплуатации и технического обслуживания экскаватора в соответствие с технологическими картами замены компонентов, отличающейся учетом ставки дисконтирования и временного фактора снижения надежности оборудования в результате его старения, позволяющей определить границу нулевого дохода, установить минимально допустимую производственную стоимость 1 м^3 отгружаемого материала, а также обосновать выбор целесообразного срока работы экскаватора до списания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОоды ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи повышения эксплуатационной надежности и долговечности КГЭ за счет реализации экономически обоснованной стратегии превентивной замены его изнашивающихся компонентов по программе, базирующейся на статистических показателях их наработки на отказ, обеспечивающей как высокий уровень технической готовности экскаватора к работе, так и выбранный предприятием срок его эксплуатации до списания, что имеет важное значение для расширения области применения КГЭ на горных предприятиях РФ.

Научные и практические результаты выполненных исследований состоят в следующем:

1. Систематизированы и распределены по функциональным группам, сбалансированным по ресурсу, основные компоненты КГЭ компании KMG, что с

учетом модульности их конструкции, позволяет унифицировать номенклатуру запчастей, установить рациональные сроки их плановых замен и нормативы сопутствующих трудозатрат, улучшающих ремонтпригодность, сократить ремонтные циклы и расходы на обслуживание.

2. Разработана универсальная структурная блок-схема КГЭ типа РС, позволяющая оперативно и наиболее достоверно производить с учетом последовательности функционального взаимодействия всех его компонентов оценку показателей надежности его систем и готовности машины в целом в конкретных условиях эксплуатации.

3. Определен необходимый объем статистических данных о наработке не менее 60 тыс. мч, из условия получения количественных оценок показателей надежности с доверительной вероятностью $\gamma \geq 0,9$ и относительной ошибкой $\sigma \leq 0,2$, определены доверительные границы для оценок наработок до отказа МТBF и среднего времени восстановления MTTR, позволившие установить наиболее вероятные ($\gamma = 0,9$ для совокупности гидроэлементов и $\gamma = 0,8$ отдельных гидроэлементов) интервалы изменения средних оценок показателей надежности.

4. Установлено, что наибольшее количество отказов приходится на гидрокоммуникации, преимущественно РВД до 35%, гарнитуры гидроцилиндров до 25%, гидромоторы привода вентиляторов систем охлаждения РЖ до 10%, насосы системы смазки до 8%), гидромоторы хода и вращения до 11%, главные насосы до 5%, блоки золотниковых распределителей и предохранительных клапанов до 4%. Свыше 85% всех отказов составляют частичные и лишь около 10% - полные отказы.

5. Выявлены четыре периода проявления интенсивности потока отказов при эксплуатации КГЭ: 0...2 тыс. мч эксплуатации сопровождаются достаточно большой их флуктуацией, вызванной организационно-техническими причинами при становлении службы эксплуатации, обучении персонала и отработкой применения экскаватора как части технологической цепочки; 2...6 тыс. мч - период снижения интенсивности потока отказов до уровня режима нормальной эксплуатации, как результат осуществления регламентных замен изнашивающихся компонентов и стабилизации сервисного обслуживания; 6...18 тыс. мч - режим стабильной эксплуатации с увеличивающимся потоком отказов преимущественно по гидравлическому, рабочему и ходовому оборудованию, до значений, предельных по износу их главных компонентов, что определяет первую временную границу их крупной плановой замены; 18...36 тыс. мч - продолжение режима устойчивой эксплуатации, с последующим равномерным увеличением потока отказов, как следствие естественного старения оборудования. Далее, вплоть до окончания выбранного срока эксплуатации КГЭ, осуществляется пе-

риодическое повторение плановых замен компонентов, что обеспечивает нормальную его эксплуатацию с высоким уровнем готовности.

6. Установлена закономерность уменьшения МТBF и увеличения МТTR, с увеличением срока эксплуатации машины, что приводит к увеличению удельных эксплуатационных расходов на заменяемые компоненты и на соответствующие трудозатраты, что должно учитываться введением временного фактора старения оборудования.

7. Разработан комплект технической базы КГЭ и технологические карты для периодических замен компонентов с оценкой средней часовой стоимости запчастей и трудозатрат сервисного персонала, что позволяет достичь заданного уровня его готовности к эксплуатации и продлить срок службы машины до наработки 60...120 тыс. мч (срок службы 10...20 лет).

8.. Предложена и реализована комбинированная стратегия обслуживания КГЭ производства КМГ, обеспечивающая заданный уровень готовности его к работе, устанавливаемый срок его службы до списания и отказ от капитального ремонта путем одновременной превентивной замены с обоснованной периодичностью однотипных по ресурсу его компонентов, достигших установленного срока наработки. Это позволяет горным предприятиям еще на стадии приобретения КГЭ, выбрать необходимую длительность его жизненного цикла. с учетом запланированного срока отработки предназначенного ему горного участка месторождения и финансовых возможностей предприятия, а также предусмотреть систему поставок и плановых замен необходимых компонентов.

9. Разработана математическая модель, описывающая текущие изменения эксплуатационной стоимости заменяемых компонентов и трудозатрат по их осуществлению, стоимостных показателей эксплуатации КГЭ, позволяющая оптимизировать расходы на эксплуатацию в течение устанавливаемого срока его работы до списания с учетом ставки дисконтирования, темпа снижения надежности оборудования в результате его старения.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах, опубликованных:

в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Булес П. К вопросу о надежности мощных гидравлических экскаваторов Komatsu Mining Germany в экстремальных условиях эксплуатации // Маркшейдерский вестник, № 6, 2013, с. 20-23.
2. Подэрни Р.Ю., Булес П. Сравнительный анализ гидравлических и механических экскаваторов с прямой лопатой // Горный журнал, 2015, № 1, с. 55-61.
3. Подэрни Р.Ю., Булес П. Эффективность применения мощных гидравличе-

ских экскаваторов – результат повышения их надежности //Горная промышленность. 2015, № 1. С. 46-51.

4. Подэрни Р.Ю., Булес П. Экономико-вероятностная модель оценки стоимости эксплуатации, технического обслуживания и оптимального срока службы карьерного гидравлического экскаватора (КГЭ). //Горная промышленность. 2015, № 6. С. 52-54.

в научных сборниках и других изданиях:

1. Булес. П. .Применение мощных гидравлических экскаваторов - фактор надежности в развитии горных предприятий.// Материалы конференции «Машины и оборудование для открытых горных работ» В рамках 18-й Международной выставки «Горное оборудование, добыча и обогащение руд и минералов», 9 апреля 2014, Москва, С. –5-7.

2. Слесарев Б.В., Булес П. Исследование условий и параметров экскавации мощных карьерных экскаваторов.//. Материалы конференции «Машины и оборудование для открытых горных работ» В рамках 19-й Международной выставки «Горное оборудование, добыча и обогащение руд и минералов», 21 апреля 2015, Москва, С. 3-4.

3. Подэрни Р. Ю., Булес П. Методика оценки стоимости эксплуатации, технического обслуживания и оптимального срока службы карьерного гидравлического экскаватора.// Материалы конференции «Машины и оборудование для открытых горных работ» В рамках 20-й Международной выставки «Горное оборудование, добыча и обогащение руд и минералов», 26 апреля 2016, Москва, С. –2-7.