

Решение проблемы аварийности горных машин с использованием Отчета «Тойота» АЗ

Любиша Папич¹, Ирина В. Гадолина^{2*}, Милорад Пантелич³, Неда Папич⁴

¹Исследовательский центр по управлению качеством и надежностью (DQM), г. Чачак, Сербия. ²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; ³Предприятие «Колубара Метал», г. Лазаревац, Сербия. Технический факультет, Крагуевацкий университет, г. Чачак, Сербия; ⁴Бакалавр наук по специальности «Промышленная инженерия», студент магистратуры по специальности «Промышленная инженерия». Факультет технических наук, Университет в г. Нови Сад, г. Нови Сад, Сербия
*gadolina@mail.ru



Любиша Папич



Ирина В. Гадолина



Милорад Пантелич



Неда Папич

Резюме. Целью статьи явилась демонстрация преимуществ применения отчета «Тойота» АЗ как стандартного способа обмена информацией. Необходимо отметить, что в настоящее время метод еще не нашел подobaющего распространения. Он заслуживает большего. Показывая на конкретном примере аварии крупной горной машины, каким образом заполняется отчет, авторы статьи надеются, что данная информация поможет внедрить эту систему на других предприятиях. Это, возможно, будет способствовать решению многих вопросов, связанных с промышленным менеджментом. Для предприятий, эксплуатирующих горнодобывающую технику, данный материал будет особенно полезным. **Метод** заключается в представлении материала на листе бумаги формата АЗ, который требуется для отражения всей информации, необходимой для решения возникшей проблемы. Почему формат АЗ? Формат АЗ – это максимальный размер листа бумаги, который можно отправить по факсу. До появления персональных компьютеров он был наиболее распространенным средством связи между заводами компании «Тойота Моторс». В рассмотренном примере применения отчета «Тойота» АЗ, содержатся такие принципиально важные разделы, как обслуживание и безотказность горных машин, информация о проводившихся ранее исследованиях в этом направлении, применение метода «5 почему?» и рассмотрение влияния человеческого фактора. В примере, рассмотренном в статье, в отчете содержится описание обстоятельств аварии экскаватора SRs 1200 24/4 (G2), произошедшей 6 апреля 1995 г. на угольном разрезе «Открытая разработка D» рудного бассейна «Колубара» компании «Электропромышленность Сербии». Отчет также включает оценку последствий и анализ причин аварии. **Результаты** заключаются в представлении методологического подхода к решению проблем, краткого формата представления информации, документирования и фиксации сведений, с которыми другие участники рабочего процесса могут ознакомиться; обеспечение возможности составить представление о рабочих процессах и результатами решения проблем. При этом обеспечивается общий язык для общения внутри компании, и создается культура бережливого производства в компании. Отчет АЗ – это процесс обучения и основа для будущих изменений в организации производства. **Выводы.** Отчет «Тойота» АЗ выполняет две основные функции: внесение предложений и ведение отчетности по одобренным мероприятиям согласно указанным предложениям. Он позволит конкретизировать проблему и перейти непосредственно к мероприятиям, направленным на улучшение ситуации. Внедрение отчета в практику взаимодействия отделов внутри предприятий и с предприятиями-поставщиками позволит оперативно и целенаправленно решать вопросы управления. Первоначально разработанный в Японии на предприятиях Тойота, в настоящее время метод находит все большее применение на предприятиях Сербии и других стран.

Ключевые слова: авария, решение проблемы, горные машины, угольный разрез, Отчет «Тойота» АЗ, безотказность и безопасность, Цикл Деминга, «5 Почему?», человеческий фактор, модель «швейцарский сыр», Черный лебедь.

Для цитирования: Любиша Папич, И.В. Гадолина, Милорад Пантелич, Неда Папич. Решение проблемы аварийности горных машин с использованием Отчета «Тойота» АЗ // Надежность. 2019. № 4. С. 32-44. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-32-44>

Поступила 23.05.2019 г. / После доработки 09.11.2019 г. / К печати 14.12.2019 г.

1. Введение

В основе современного промышленного производства лежат природные ресурсы. Около 70% всех природных ресурсов приходится на минеральное сырье. Сегодня в мире более триллиона долл. США тратится на сырье (металлические и неметаллические руды, уголь, глина, камень, песок и гравий), которое для многих стран является основными статьями экспорта и импорта.

Во многих странах горнодобывающая промышленность является основой развития и оказывает значительное влияние на национальную экономику в целом. Приведенные ниже данные [1] весьма красноречиво показывают влияние горнодобывающей отрасли на экономику страны (Сербия):

- цены на железо, кокс (каменный уголь) и руду – влияют на 80-90%;
- цены на цветные металлы, руду и электроэнергию – на 90%;
- цены на электроэнергию и уголь – на 60%;
- цена на уголь, стоимость обслуживания горной техники на угольных разрезах – на 35-40% и т.д.

Решение проблем в горнодобывающей промышленности представляет собой, прежде всего, интеллектуальную задачу. Как документировать наиболее важную информацию и решения на каждом этапе проведения работ таким образом, чтобы можно было обмениваться данными внутри коллектива, включать в рабочий процесс новых сотрудников и вносить предлагаемые исправления? Процессы документирования сложных процессов, связанных с решением проблемных ситуаций, часто сопряжены с накоплением большого количества бумажной документации или, учитывая современную специфику, цифровых данных. Компания «Тойота Моторс» со своей стороны отдает предпочтение более простому методу с использованием карандаша, ластика и листа бумаги. Этот метод работы часто называют Отчетом «Тойота» А3. Почему формат А3? Данный формат использовался в «Тойота» изначально, поскольку значительная часть информационного обмена между структурными подразделениями «Тойота» в Японии и ее заводами за рубежом осуществлялась по факсу, а А3 (297 x 420 см) – самый крупный формат, совместимый с соответствующей аппаратурой.

Метод решения проблем с использованием Отчета «Тойота» А3 был разработан для того, чтобы обеспечить максимально четкое описание предлагаемых улучшений. Отчет «Тойота» А3 имеет две основные функции: внесение предложений и ведение отчетности по одобренным мероприятиям согласно указанным предложениям. Суть метода А3 заключается в том, чтобы обеспечить визуализацию предложений на одном листе бумаги формата А3 [2]. Эффективность Отчета «Тойота» А3 обусловлена тем, что он позволяет сводить большие объемы данных в формат, который легко читать и понимать. Это действенное средство оптимизации процессов управления в компаниях, в которых сотрудники выполняют несколько

функций, например, на бережливых производствах. Они слишком сильно ограничены во времени, чтобы читать большое количество документов, чтобы понять конкретную проблему или ситуацию.

Преимущества использования Отчета «Тойота» А3 при решении проблем заключаются в следующем:

- методологический подход к решению проблем;
- краткий формат представления информации или ведения отчетности;
- документирование и фиксация сведений, с которыми другие участники рабочего процесса могут ознакомляться; обеспечение возможности ознакомления с процессами управления и результатами решения проблем;
- общий язык для общения внутри компании;
- создание культуры бережливого производства в компании;
- создание основ для будущих изменений.

Как правило, в большинстве компаний информация находится в общем доступе, но логически не структурирована. В результате значительное время затрачивается на разговоры и попытки достичь понимания, наведение порядка, изучение и анализ данных. При этом крайне широко используются портативные компьютеры, а описания методик работы и принципов бережливого производства [3] пылятся на книжных полках, и на то, что их когда-то будут читать, надежды мало. Отчет «Тойота» А3 устроен таким образом, чтобы его не только читали работники, но и использовали в работе, например, при решении некоторых проблем.

2. Обслуживание и безотказность горных машин

Техническое обслуживание многоковшовых экскаваторов при эксплуатации в условиях карьеров непосредственно зависит от реализованной эффективности (безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности) как на уровне проекта, так и в процессе эксплуатации [4]. Правильно избранная концепция технического обслуживания для систем BWECD (система «экскаватор – ленточный конвейер – откидывание земли») и BWECL (система «экскаватор – ленточный конвейер – погрузка угля»), а также хорошо обученный персонал и высокое качество управления обслуживанием способствуют улучшению финансовых показателей эксплуатации карьеров.

Многоковшовый экскаватор является источником значительного риска, связанного с возможными отказами и авариями, которые представляют эксплуатационную и экологическую опасность. Безотказность многоковшовых экскаваторов, которые проектируются для успешного выполнения целевой функции, определяет продолжительность интервала времени, в течение которого они будут работать без отказов. Изыскания [5], направленные на повышение уровня безотказности и качества управления безотказностью в течение жизненного цикла многоковшовых экскаваторов, имеют своей

целью сформировать систему мер безопасности для экономически эффективной эксплуатации и обеспечения соответствия комплексным нормам экологической и технической безопасности в эксплуатации и в более широком смысле.

Практика разработки угольных месторождений открытым способом показала, что такие системы непрерывного действия как BWECD и BWECL обеспечивают максимальную результативность с технической и экономической точек зрения. Многоковшовые экскаваторы должны обладать высокими показателями безотказности. В этой связи возникает необходимость определения среди прочего количественных показателей безотказности, которые лежат в основе концепции технического обслуживания многоковшового экскаватора [6].

3. Ранее проводившиеся исследования безотказности и безопасности горных машин

В течение последних нескольких десятилетий было проведено множество исследований с целью определения производительности, безотказности и эффективности эксплуатации горных машин в составе систем типа BWECD и BWECL, а также вспомогательных горных

машин на карьерах в Сербии [1, 4]. В работах [7, 8, 9] проведен анализ большого объема данных, собранных и обработанных для определения рабочих характеристик горных машин при эксплуатации в условиях карьеров на территории Сербии. Результаты исследований, систематизированных в монографии [5], относятся к полным системам типа BWECD (BWECL). Эти данные показывают число отказов многоковшового экскаватора, самоходного транспортера, ленточного конвейера с резиновой лентой и разгрузочным устройством на карьерах рудного бассейна «Колубара» в г. Лазаревац в Сербии, как показано на рисунке 1.

Как правило, наибольшее время простоя приходится на многоковшовые экскаваторы, хотя на конвейерах с длинными лентами продолжительные простои также могут иметь место. Следующий пример касается одной системы типа BWECD, которая эксплуатируется на карьере «Тамнава» рудного бассейна «Колубара», которая состоит из многоковшового экскаватора SchRs 700, челночной вагонетки, конвейера с тремя резиновыми лентами длиной от 1 тыс. до 1,2 тыс. м и отвалообразователя. Структура времени простоя показывает, что на отказы многоковшового экскаватора приходится 60% простоев, отказы конвейерных лент – 27% простоев, отказы отвалообразователя – 4% простоев. С другой стороны, струк-

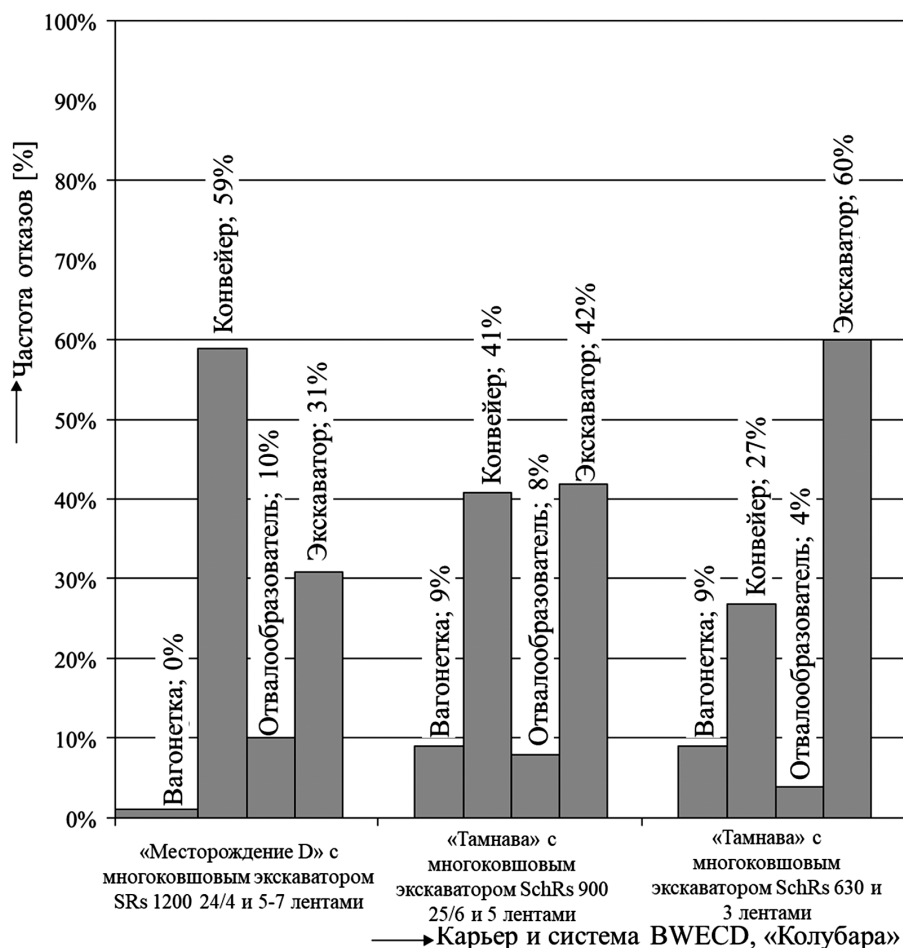


Рисунок 1- Частота отказов для некоторых систем BWECD на карьерах рудного бассейна «Колубара» в г. Лазаревац в Сербии. [5]

тура времени простоя системы типа BWECD на карьере «Тамнава», которая включает в себя многоковшовый экскаватор SchRs 900 25/6 с пятью ленточными конвейерами, показывает, что соотношение отказов экскаватора и конвейерной ленты примерно равно. На карьере «Месторождение D», где система типа BWECD включает в себя многоковшовый экскаватор SRs 1200 24/4, имеющем от 5 до 7 конвейерных лент, на конвейерные ленты в силу их значительной длины приходится почти вдвое большая доля отказов, чем на многоковшовый экскаватор [1].

Приведенные результаты показывают, что поломки системы BWECD были в основном вызваны отказами в многоковшовом экскаваторе (за исключением случаев, когда речь идет о длинных ленточных транспортерах, поскольку их длина обусловлена технологическими условиями). Из этого следует, что увеличение безотказности многоковшового экскаватора приведет к повышению общей безотказности системы BWECD [1].

Многоковшовый экскаватор представляет собой очень сложную техническую систему, состоящую из большого числа объектов (подсистем, узлов, элементов). Каждый объект представляет собой потенциальный источник причины простоя в случайный момент времени и случайной продолжительности. Последствия возникновения отказов на многоковшовых экскаваторах включают в себя снижение производительности экскаватора, которое приводит к снижению экономического эффекта эксплуатации карьера. В связи с этим, рассмотренные в [5] подсистемы экскаватора были классифицированы по приоритетности с точки зрения безотказности. В исследовании рассматривались следующие элементы многоковшового экскаватора:

- подсистема ротора,
- подсистема транспортировки материала на экскаваторе,
- подсистема вращения надстройки,
- подсистема движения экскаватора.

Результаты исследований показали, что наибольшее число поломок на многоковшовых экскаваторах произошло в силу отказа подсистемы ротора (до 51%), что показано на рисунке 2. Повышение безотказности отдельных элементов многоковшового экскаватора позволяет повысить общую безотказность экскаватора. При этом приоритет следует отдавать тем элементам экскаватора, безотказность которых является самой низкой.

Исследования [1, 5] по оценке безотказности многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) в период с 01.01.2006 по 31.12.2006 проводились с использованием отчетности компании «Электроэнергетика Сербии» по карьерам «Месторождение D» и «Зеоке» рудного бассейна «Колубара». В результате исследований были получены данные о видах, последствиях и причинах отказов, а также сведения о возникновении условий неисправности и простоя. Исследования показали, что наиболее безотказными узлами многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) являются: механизм подъема стрелы ротора (МПСП) и несущая стальная конструкция (НСК), затем – механизм кругового движения (МКД), механизм транспортировки экскаватора (МТЭ), механизм транспортировки материала (МТМ) и механизм ротора (МР), см. также гистограмму на рисунке 3.

Безотказность и безопасность элементов многоковшового экскаватора не всегда находятся в прямой корреляции. Другими словами, высокой безотказности

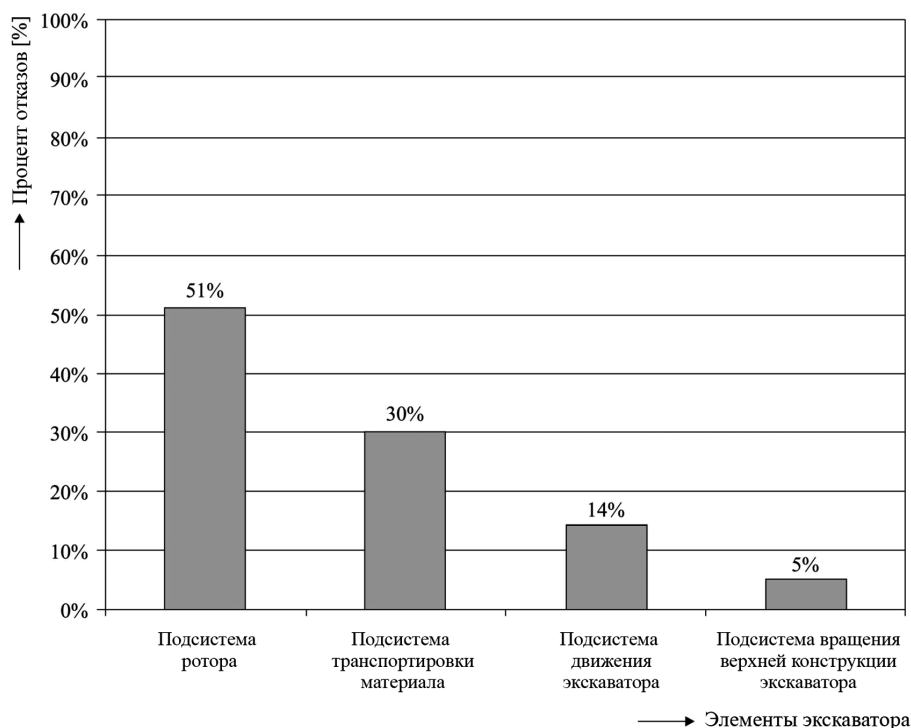


Рисунок 2 – Частота отказов многоковшового экскаватора. [5]

не всегда соответствует низкая критичность работоспособности и наоборот. Критичность отказа элемента многоковшового экскаватора является показателем безопасности функционирования экскаватора. Например, некоторые элементы многоковшового экскаватора могут обладать высокой безотказностью, но, в то же время, низкой безопасностью (т.е. высокой критичностью), что было показано в результате исследования [1, 5]. Это касается следующих узлов и агрегатов: механизм подъема стрелы ротора (МПСР) и несущая стальная конструкция (НСК). На практике это означает, что все виды отказов этих агрегатов происходят редко, но, когда они происходят, это приводит к серьезным последствиям для функционирования многоковшового экскаватора, а значит, и всей системы BWECD. При определении безотказности наряду с длительностью периода времени безотказной работы важную роль играет частота возникновения отказов, при определении безопасности – уровень критичности.

Таким образом, учет последствий отказов, а также своевременное устранение их причин обеспечивает стабильную безопасность многоковшовых экскаваторов.

Коэффициент готовности представляет собой важный комплексный показатель безотказности и ремонтпригодности восстанавливаемых систем, используемый при анализе безотказности и риска. В [10] предложен способ оценки изменчивости коэффициента готовности на основе статистических методов с повторной выборкой. Метод был применен к подсистемам многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) с использованием статистических данных по отказам, собранных на рудном бассейне «Колубара» в районе г. Лазаревац, Сербия. Использование методов с повторной выборкой, т.е. метода складного ножа и бутстрепа, позволило провести оценку изменчивости коэффициента готовности подсистем экскаватора.

За исключением подсистемы МР безотказность и ремонтпригодность подсистем соответствует требованиям к безотказности сложных технических объектов. Нижний квартиль распределения коэффициента готовности достигает 0,9977 для наиболее ответственной подсистемы МПСР без учета выбросов, что соответствует довольно высокой безотказности даже при том, что оценка интервала проводилась с использованием размножения выборок [10]. Согласно оценке, полученной с использованием разработанного метода [10], 90-процентный доверительный интервал коэффициента готовности системы в целом достигает [0,81; 0,94] со средним значением 0,90.

Недостаточно высокую надежность показывает в ряде случаев система, связанная с копанием породы. Причина кроется в преждевременном износе рабочих частей. Для уточнения инженерной формулы для оценки износа в [11] было проведено уточнение известной ранее формулы с учетом разных режимов эксплуатации. Применение этой формулы поможет спланировать профилактические ремонты и осмотры.

Для анализа отказов экскаватора, как сложной системы, может быть применен метод бэта-фактора [12]. Он является наиболее простым с точки зрения моделирования зависимых отказов и проведения дальнейших расчетов. При этом он не лишен некоторых ограничений. Для сложной системы, которой является экскаватор, обеспечение надежности должно осуществляться с самых ранних стадий жизненного цикла на основе последовательного выполнения определенных конструкторских, технологических и производственных процедур [13]. Отчет «Тойота» АЗ может внести некоторую ясность при решении данной проблемы.

4. Авария многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) 6 апреля 1995 года и ее последствия

Многоковшовый экскаватор SRs 1200 24/4 (G2) был собран и введен в эксплуатацию в 1968 г. на карьере «Месторождение D» рудного бассейна «Колубара» и получил внутреннюю маркировку G2 («Grinding Machine 2», т.е. «Дробилка 2»), рисунок 4.

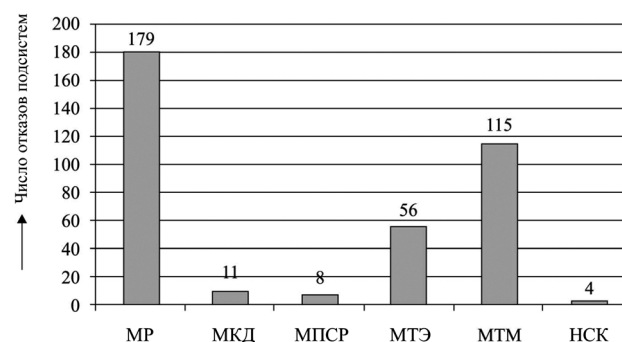


Рисунок 3 – Частота отказов подсистем многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2). [5]

Авария многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) (рисунок 5) привела к значительному ущербу, в связи с которым было необходимо провести диагностику и оценку отказов, что и было сделано экспертами рудного бассейна «Колубара» и компании «Колубара Металл». Некоторые части поврежденной машины были перевезены на сборочную площадку в г. Зеоке, а некоторые – в металлические мастерские г. Колубары.

Оценка последствий подразумевает анализ прямых и косвенных убытков, которые могут быть вызваны тем или иным исходом (конечным состоянием). Если оценка убытков, связанных с определенным неблагоприятным событием, была произведена в различных единицах измерения, они должны быть сведены в единый ущерб. Кроме того, конечные состояния могут иметь текущий или отложенный эффекты. Так, например, при аварии многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) на «Месторождении D» рудного бассейна «Колубара» анализ затрат [1] показал наличие двух видов затрат, а именно:

1. Прямые издержки, которые включают:

- проектирование;
- демонтаж поврежденного многоковшового экскаватора;
- транспортировку поврежденного многоковшового экскаватора;
- изготовление и восстановление деталей многоковшового экскаватора (агрегатов, узлов, элементов);
- сборку многоковшового экскаватора;
- ввод в эксплуатацию.

Прямые издержки (расходы) составили 7 500 000,00 Евро.

2. Косвенные издержки ввиду простоя производственных мощностей карьера в период до возобновления работы многоковшового экскаватора в размере 157 000 000,00 Евро.

Данные были получены исходя из издержек от простоя элемента экскаватора (BWECД или BWECЛ) стоимостью 4500,00 Евро.

Продолжительность неработоспособности:

9 лет x 12 месяцев x 30 дней x 24 часа x 0,45 = 35,000 нормо-часов.

Размер косвенных издержек:

35,000 норм-часов x 4,500 Евро / час = 157 000 000,00 Евро.



Рисунок 4- Вид многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) до аварии.

5. Анализ причины аварии многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2)

5.1 Применение метода «5 Почему?» для определения основных причин аварий

В основе подхода к определению причин недостаточного качества в компании «Тойота» лежит вопрос «Почему?», заданный пять раз во время обнаружения про-

блемы. Метод называется «5 Почему?». Если на вопрос «Почему?» удалось ответить пять раз, то основная причина и путь решения проблемы ясны. Анализ основных причин проблем технического обслуживания основан на пятикратном повторении вопроса «Почему?» Данный подход внедрен в систему технического обслуживания компании «Тойота» (Бережливая система технического обслуживания) [14]. Метод «5 Почему?» стремится к детальному исследованию проблем и обстоятельств, которые приводят к основным причинам указанных проблем. Метод «5 Почему?» обычно используется в «Тойота» для поиска источника проблем обслуживания. Он описывает способ мышления, необходимый для достижения уровня, необходимого для предотвращения повторения проблем технического обслуживания. Возможно, это будет не основная причина, но, по крайней мере, на этом уровне корректирующие меры могут предотвратить повторение проблемы. В случае аварии многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2), применение метода «5 Почему?» описывает способ мышления (см. рисунок 6), необходимый для предотвращения повторных аварий.



Рисунок 5- Вид многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) после аварии 6 апреля 1995 г.

Согласно данным [4], значительная доля всех видов отказов на сложных горных машинах была вызвана человеческим фактором. Они происходили на этапах проектирования, изготовления, контроля качества, сборки, эксплуатации и обслуживания системы с участием сотрудников любого уровня образования, квалификации, компетентности и опыта. Ошибки обслуживающего персонала состоят в неправильном выполнении инструкций по техническому обслуживанию технических систем и вызваны их психофизическим состоянием (усталость, стресс и др.), неправильно организованным рабочим местом по причине отсутствия системы организации труда 5s [15], ошибками в эргономических расчетах, наличием шума на рабочем месте, недостаточной освещенностью рабочего места и др.

В последнее время в Сербии было проведено значительное число исследований с целью выяснения причин

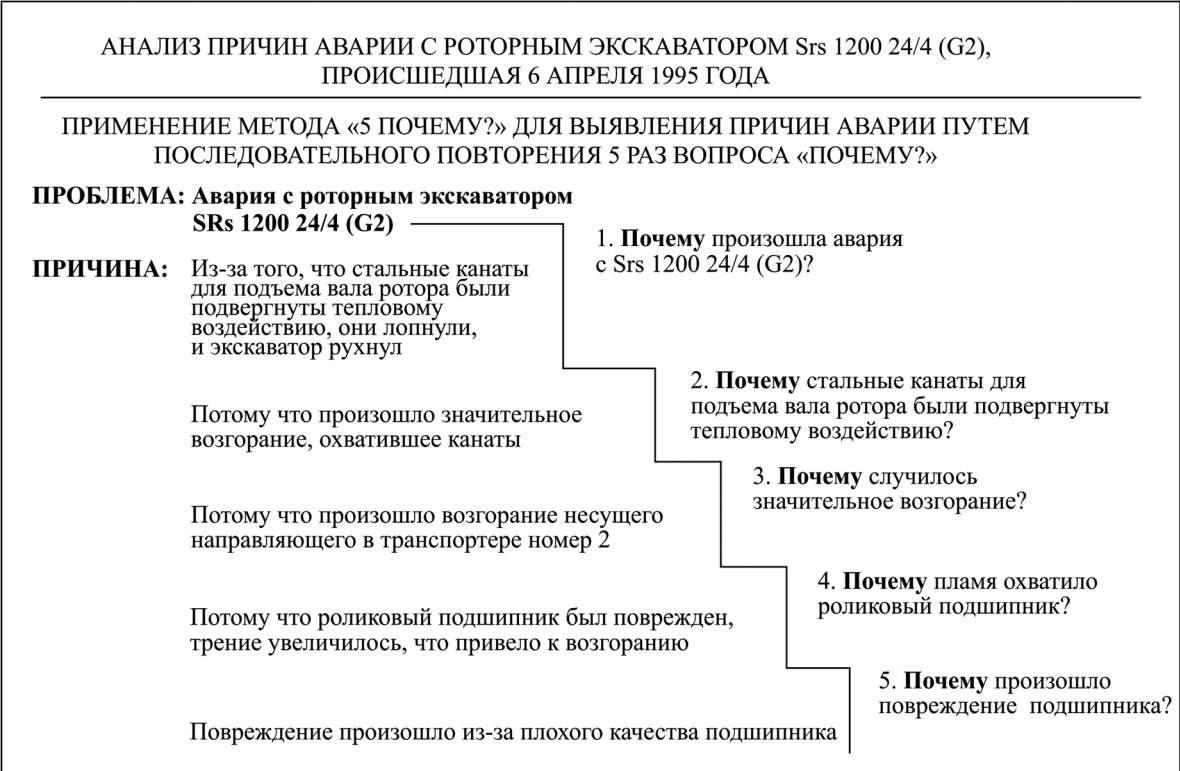


Рисунок 6 – Применение метода «5 Почему?»: Выявление основной причины аварии путем пятикратного повторения вопроса «Почему?».

отказов оборудования, эксплуатируемого на угольных разрезах. Один из отчетов опубликован в работе [5]. Исследования показывают, что ошибки персонала (операторов, специалистов по техническому обслуживанию) играют ключевую роль в возникновении аварий, что подтверждается данными таблицы 1.

Анализ этих данных показывает, что на человеческий фактор приходится 87% причин аварий горной техники. Исходя из этого, на основе рисунка 6 мы можем заключить, что «плохое качество подшипника» опорного ролика также связано с человеческим фактором, т.е. ошибкой персонала при окончательном контроле качества, входном контроле или даже с неверным выбором поставщика подшипников.

5.2 Исследование влияния человеческого фактора на плохое качество подшипника в составе многоковшового экскаватора

Исследование влияния человеческого фактора на возникновение проблемы низкого качества подшипника на многоковшовом экскаваторе SRs 1200 24/4 (G2) проводилось в режиме коллективного обсуждения сотрудниками компании «Колубара Метал». При этом коллектив работал в соответствии со всеми рекомендациями по организации «мозговой атаки» [16]. Основные рекомендации касались состава коллектива, порядка его работы, обязанностей его руководителя. Коллектив вырабатывал

идеи относительно причин проблем технического обслуживания, которые требуют решения.

Таблица 1. Процентное распределение причин аварий экскаваторов

Причина аварии	Процентная доля
Плохая подготовка пути движения экскаватора (человеческая ошибка)	27
Ошибка при изготовлении деталей и при сборке экскаватора на угольном разрезе (человеческая ошибка)	22
Ошибка оператора	18
Ошибка специалиста по техническому обслуживанию	13
Усталость материалов, износ оборудования и коррозия	8
Ошибки в проектировании (человеческая ошибка)	7
Прочие факторы	5

В этих исследованиях применялось правило, которое может быть использовано для составления исходной (общей) причинно-следственной диаграммы, и это правило применимо для большинства реальных ситуаций. Правило состоит в том, что почти всегда существует некоторое число категорий возможных причин определенных последствий (нежелательных результатов) процесса. В процессе решения конкретной проблемы,

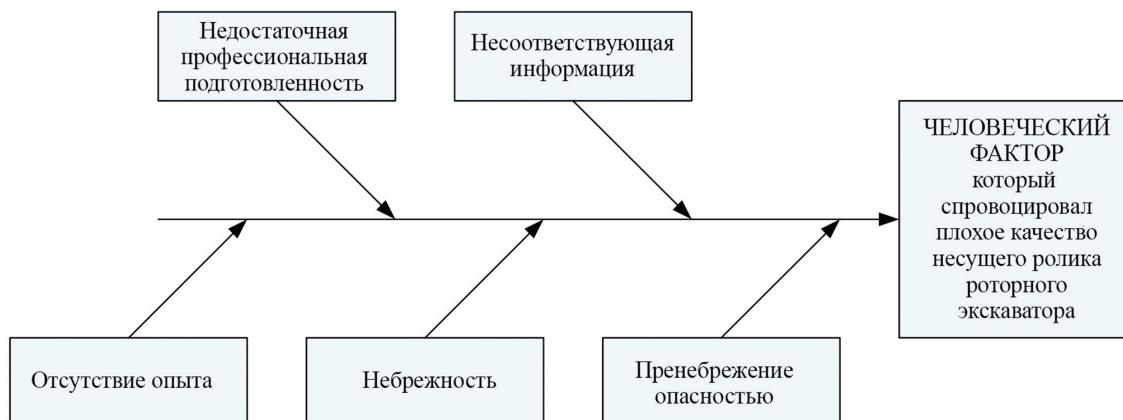


Рисунок 7 – Причины человеческой ошибки. [6]

связанной с аварией многоковшового экскаватора, исследователи установили, от каких факторов (причин) и в какой степени зависит нежелательный результат или последствие: «*Человеческая ошибка, с которой связано низкое качество подшипника опорного ролика на многоковшовом экскаваторе SRs 1200 24/4 (G2)*».

В исследованиях было, прежде всего, проведено определение и обобщение пяти примеров, как показано на рисунке 7:

- отсутствие подготовки;
- недостоверная информация;
- отсутствие опыта;
- неосторожность;
- пренебрежительное отношение к опасности.

Эта проблема может быть в дальнейшем решена за счет определения причин человеческих ошибок второго и более высоких порядков.

6. Человеческий фактор при моделировании аварий

6.1 Модель типа «швейцарский сыр» причин, вызванных человеческой ошибкой

В большинстве случаев ответственность за аварии и техногенные катастрофы возлагают на отдельные (личные) человеческие ошибки. Но в своей книге «Управление риском организационных аварий» [17] профессор психологии Манчестерского университета Джеймс Ризон подробно исследует вопрос о том, может ли одна человеческая ошибка вызвать аварию, исключая случаи явного саботажа или террористической деятельности. Доказано, что условием возникновения аварии служит целый спектр скрытых и вовремя не обнаруженных ошибок. Культура безопасности и проблемы, которые приводят к указанным ошибкам, обычно, называются «человеческим фактором» [18]. Ведь именно в виду человеческого фактора оператор или специалист по техническому обслуживанию системы принимает неверные решения.

Почему происходят аварии, какие условия их вызывают, какие факторы способствуют их возникновению? Аварии, как правило, происходят не в результате какой-то отдельной ошибки, а являются следствием скрытых, своевременно не выявленных повреждений и отказов, которые накладываются друг на друга и могут привести к ряду нежелательных событий. Следовательно, большинство аварий и инцидентов является следствием целого ряда событий.

Такой атрибут аварии лучше всего описывается моделью «швейцарского сыра», разработанной Джеймсом Ризоном [19] и иллюстрирующей различные виды человеческого «участия» в аварии технических систем. Модель Ризона «швейцарский сыр» объясняет, каким образом люди способствуют нарушению работоспособности сложных и взаимосвязанных технических систем, вызывая, таким образом, аварии.

Если состояние определенной технической системы представить в виде ломтика сыра с отверстиями, то в зависимости от времени проявления виды отказов могут быть следующие:

- скрытые отказы (дефекты);
- активные отказы (дефекты).

Скрытые дефекты (скрытые отказы, скрытые условия, сроки, режимы) представляют собой результат решений или рабочих процессов, который были реализованы задолго до наступления аварии. Эти дефекты и их последствия могут оставаться необнаруженными в течение длительных периодов времени (многих лет). Такие ошибки (виды отказов) обычно происходят на уровне принятия решений и определения правил и положений, либо на уровне оперативного управления, т.е. совершаются лицами, далекими от произошедшей аварии, как во времени, так и в пространстве. Например, решение об объединении обслуживающего персонала двух разных карьеров (двух предприятий) без обучения стандартизированным процедурам обслуживания горных машин представляет собой наглядный пример скрытого дефекта (скрытого отказа).

Активные дефекты (активные отказы, активные ошибки) представляют собой ошибки или нарушения, которые немедленно (без задержки) оказывают неблаго-

приятное воздействие. Такие ошибки обычно совершаются операторами или специалистами по техническому обслуживанию горных машин. Когда оператор или специалист по техническому обслуживанию вместо вращения экскаватора осуществляет подъем его надстройки, являются показательным примером такого рода ошибок (отказов).

7. Теория риска событий типа «Черный лебедь»

7.1 «Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости» [19]

Математик и экономист Нассим Николас Талеб в своей книге 2007 года «Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости» [19] предложил концепцию «черного лебедя», т.е. неожиданного (непредсказуемого) и значительного (всеобъемлющего) явления, которое существенно меняет ход истории. Эта концепция включает в себя войны, экономические кризисы, появление интернета и т. д. Предсказать их невозможно, но мы должны знать, как с ними жить.

«Черные лебеди» по своей природе непредсказуемы, поскольку подобных событий раньше никогда не происходило. Однако то, как компании и люди, пережившие определенные катастрофические события, справились с их последствиями, изучать можно. Такой анализ мог бы подготовить компанию к разработке стратегии возобновления нормальной работы после чрезвычайных ситуаций (в частности техногенных, например аварий

горной техники) в кратчайшие возможные сроки и с минимальными потерями.

Нассим Талеб предложил теорию риска «Черный лебедь», которая рассматривает события, которые трудно предсказать, и редкие события, которые имеют значительные последствия. «Черный лебедь» – метафора, описывающая неожиданные события, влекущие значительные последствия.

«Если вы всю жизнь видели только белых лебедей, это не значит, что черных лебедей не существует», – пишет Нассим Талеб в своей книге «Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости» [19].

7.2 Критерии событий типа «Черный лебедь» и аварий многоковшовых экскаваторов

Авария многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2), которая произошла 6 апреля 1995 года, имеет все указанные характеристики, т.е. удовлетворяет критериям события типа «Черный лебедь». То, что Нассим Талеб называет «Черным лебедем» – это событие, которое имеет три следующие характеристики:

- событие происходит неожиданно;
- событие имеет значительные последствия;
- впоследствии находится разумное объяснение события так, будто оно было ожидаемо.

До аварии 6 апреля 1995 года указанный многоковшовый экскаватор произвел выемку 160 млн. м³ вскрыши. То, как авария экскаватора отразилась на выработке, видно из цифр годовой отчетности, которые показывают падение с 5 до 7 млн. м³ вскрыши (рисунок 8).

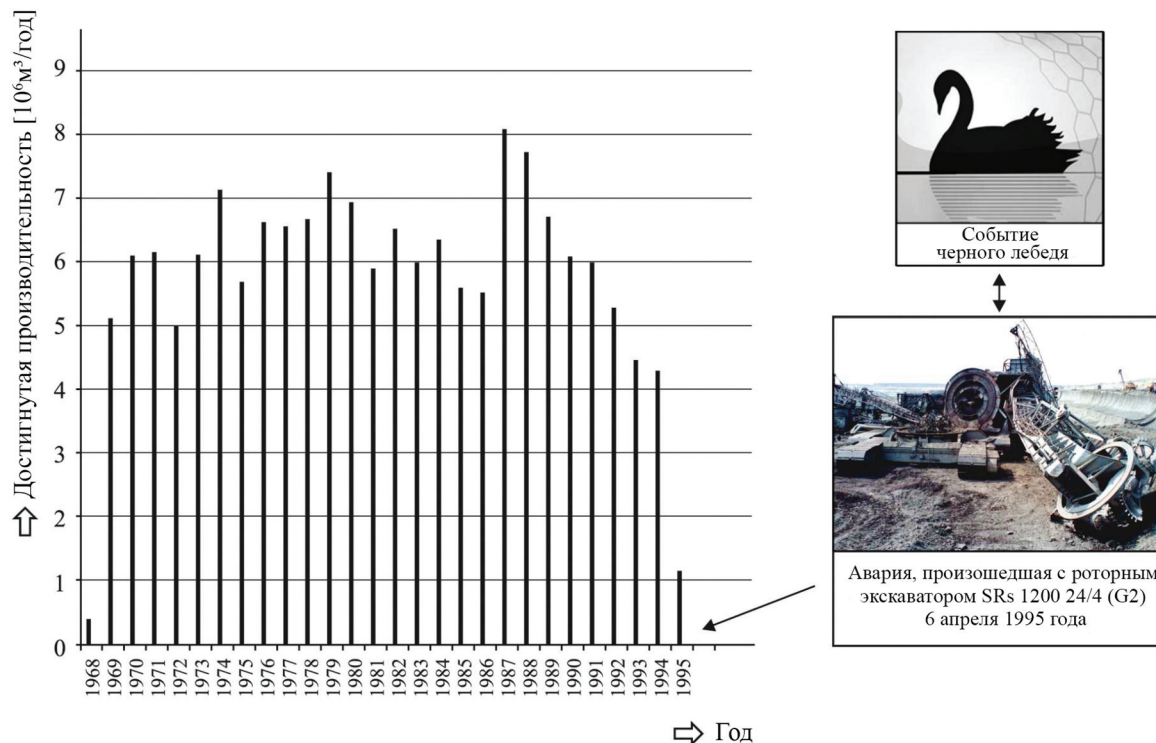


Рисунок 8 – Авария многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) – типичный «Черный лебедь».

Поскольку такие аварии непредсказуемы, задачей владельца опасного объекта является принятие мер по снижению влияния отрицательных последствий на персонал, население и окружающую среду. В этой связи перед государством стоит цель побудить владельцев соответствующих объектов строго выполнять указания и положения нормативных правовых документов отделами техники безопасности [21].

По мере роста безотказности и сложности технических систем влияние «человеческого» фактора также становится более значительным. Следовательно, важнейшими задачами теории и практики обеспечения безопасности технических систем остается развитие культуры безопасности и создание некарательной производственной среды.

8. Отчет «Тойота» АЗ как инструмент решения задач

Составлению Отчетов «Тойота» АЗ обучают всех сотрудников компании «Тойота», в первую очередь руководителей низшего звена. Существует универсальный набор состояний и рекомендаций, которые используются при обучении для решения проблем и формирования Отчета «Тойота» АЗ. Ниже приведены выдержки из данного документа [22].

А. Рекомендации по решению проблем:

- оценивайте ситуацию исходя из фактов;
- отслеживайте (контролируйте, наблюдайте) проблему;
- сосредоточьтесь на одной проблеме (одна проблема на один Отчет «Тойота» АЗ);
- следите за изменениями в месте появления проблемы;
- детально изучите причину и проанализируйте все факты и данные;
- при необходимости примите временные меры для обнаружения места возникновения проблемы;
- определите основную причину;
- разработайте корректирующие меры, дайте указания и определите сроки выполнения.

Б. Рекомендации по формированию Отчета «Тойота» АЗ:

- распределите время таким образом, чтобы иметь возможность оценить ситуацию в целом (используйте широкий круг сведений, опирайтесь на факты, а не мнения, учитывайте отдаленные последствия);
- ориентируйтесь на конкретных людей; учитывайте их потребности и понимание ситуации;
- подготавливайте наглядные материалы в соответствии с ценностями и философией компании;
- избегайте использования большого количества слов, отдавайте предпочтение схемам, графикам и другим формам ясного представления информации;
- все слова должны относиться к сфере профессиональной деятельности; используйте точные выражения и избегайте жаргонизмов;

- оценивайте ясность изложения материала; обеспечивает ли оформление отчета четкое понимание изложенной информации?

Интересная аналогия может быть проведена с организацией рабочего пространства на основе принципов «Метода 5S» [15] на заводах «Тойота» при составлении Отчета «Тойота» АЗ. На бережливом производстве не допускается перегружать рабочее место излишками предметов снабжения, поскольку это влечет за собой убытки [22]. Рациональное использование пространства является залогом создания добавленной стоимости. Присутствие ненужных предметов снижает безопасность, создает беспорядок и мешает обнаруживать отклонения от нормального режима работы. Аналогичным образом при составлении Отчета «Тойота» АЗ важно не допускать потерь: лишних слов, пространных объяснений, ненужных схем, которые мешают понять суть изложенного. Таким образом, обеспечивается максимальная эффективность в создании добавленной стоимости. Недостатки документации затрудняют понимание информации и зачастую приводят к тому, что люди теряют из вида ключевой момент.

Отчет «Тойота» АЗ и способ его подготовки обеспечивают четкость и оперативность информационного взаимодействия. Использование Отчета «Тойота» АЗ способствует положительным изменениям. Так, если использование Отчета «Тойота» АЗ приводит к изменениям в стандартах или росту объема имеющихся знаний, то база данных обновляется. Бережливое мышление [23] требует извлечения уроков из решенных задач (а не только исправления сложных ситуаций), и использование Отчета «Тойота» АЗ этому способствует.

9. Отчет «Тойота» АЗ и цикл Деминга

Стремление компании «Тойота» к экспериментам лежит в основе всех стандартизированных операций и процессов, которые являются частью повседневной работы. Компания «Тойота» преобразовала цикл Деминга (планирование – выполнение – проверка – воздействие), т.е. процесс постоянного совершенствования рабочего процесса, который широко применяется в различных областях хозяйства, в уникальную методологию – Отчет «Тойота» АЗ. Это отражает культуру «Тойота» [24], где умение решать проблемы считается важнейшим качеством сотрудника, которое формируется с самого начала его карьеры и постоянно совершенствуется в процессе обучения.

Акио Мацубара, бывший исполнительный директор по управлению персоналом, а позже президент Toyota Gosei North America Corporation говорит [24]:

"Все сотрудники развивают в себе навык решения проблем, который лежит в основе рабочих процессов в компании «Тойота». Философия компании «Тойота» такова: решая проблему, сотрудник вносит свой вклад в реализацию корпоративной политики, ориентированной на удовлетворение потребностей клиентов. Мы говорим

ИНСТРУМЕНТ TOYOTA A3 REPORT

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

АВАРИЯ, ПРОИСШЕДШАЯ С ЭКСКАВАТОРОМ SRs 1200 24/4 (G2) 6 АПРЕЛЯ 1995 ГОДА
НА ОТКРЫТОЙ УГОЛЬНОЙ РАЗРАБОТКЕ ПОЛЕ D, КОЛУБАРА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА СЕРБИИ

План

Мероприятия, Контроль, Действия

ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ВИД ЭКСКАВАТОРА SRs 1200 24/4 (G2)
ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДО АВАРИИ



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСКАВАТОРА
SRs 1200 24/4 (G2) ДО АВАРИИ

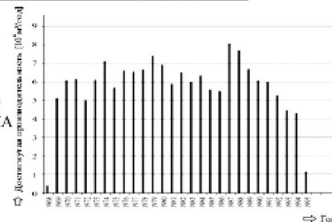
Характеристики	Величина
Теоретическая производительность	3,456 м³/ч
Мощность двигателя	400 кВт

ОПИСАНИЕ СИТУАЦИИ

ВИД РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА SRs 1200 24/4 (G2)
ПОСЛЕ АВАРИИ ПРОИСШЕДШЕЙ 6 АПРЕЛЯ 1995 ГОДА



ФАКТИЧЕСКАЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ
ДОБЫЧИ ЭКСКАВАТОРА ПО
ГОДАМ С МОМЕНТА ЗАПУСКА
В 1968 ГОДУ ДО МОМЕНТА
АВАРИИ В 1995 ГОДУ



ЦЕЛЬ

ЦЕЛЬ РЕВИТАЛИЗАЦИИ РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА SRs 1200 24/4 (G2)

Цель программы ревитализации роторного экскаватора SRs 1200 24/4 (G2), поврежденного в процессе аварии 6 апреля 1995 года: восстановить роторный экскаватор, привести его в состояние готовности добывать как вскрышные породы, так и уголь

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ

ПОВРЕЖДЕНИЕ ИЗ-ЗА ПРОИЗОШЕДШЕЙ АВАРИИ РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Прямые потери из-за аварии	Непрямые потери из-за аварии
Создание проекта, разборка, транспортировка экскаватора, производство и восстановление элементов, сборка, запуск в эксплуатацию 7.500.000,00 евро	Потери из-за не выработки порока на поле открытой разработки и в процессе ревитализации в течение 9 лет: 157.000.000,00 евро

АНАЛИЗ ПРИЧИН АВАРИИ С РОТОРНЫМ ЭКСКАВАТОРОМ SRs 1200 24/4 (G2), ПРОИСШЕДШЕЙ 6 АПРЕЛЯ 1995 ГОДА.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «ПОЧЕМУ?» ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЧИН АВАРИИ ПУТЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОПРОСИТЕЛЬНОГО ПОИСКА «ПОЧЕМУ?»

ПРОБЛЕМА: Авария роторного экскаватора SRs 1200 24/4 (G2)

ПРИЧИНА: Из-за того, что стальная конструкция верхнего вала ротора была повреждена в результате аварии, произошло нарушение работы экскаватора.

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

Потому что произошло повреждение стальной конструкции верхнего вала ротора?

МЕРЫ ПО ПРЕОДОЛЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ

ТЕНДЕР НА РЕВИТАЛИЗАЦИЮ РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА SRs 1200 24/4 (G2)

С момента ввода в эксплуатацию в 1968 года экскаватор выкопал более 160 миллионов м³ вскрышных пород. Отметив необходимость компенсации этой мощности, нехватка которой еще больше поставила под угрозу производство на карьерном месторождении D электроэнергетики Сербии, было принято решение об открытии международного тендера на активизацию работы роторного экскаватора SRs 1200 24/4 (G2), с помощью льготного кредита от немецкого правительства. Для реализации данного проекта был предоставлен кредит от KfW bank на сумму 7,588,641,00 евро.

РЕВИТАЛИЗАЦИЯ ЭКСКАВАТОРА УЧАСТНИКИ

В качестве основного подрядчика на тендере работу по восстановлению роторного экскаватора SRs 1200 24/4 (G2) получила немецкая компания FAM из Магдебурга, которая нашла основных субподрядчиков:

- для механической части, включая инженерное проектирование, ревитализацию, изготовление и сборку
- Компания по обработке металлов Колубара и компания из Угосе,
- для проектирования, производства и надзора за монтажом электрических деталей – компания ABB от Сопбас.

ПРОЦЕСС РЕВИТАЛИЗАЦИИ ЭКСКАВАТОРА

Процесс ревитализации экскаватора развивался в двух основных направлениях: активизация существующего оборудования и строительства, которое было оценено как пригодное для использования, в цехах компании "Колубара металл", изготовление нового оборудования в соответствии с базовым инженерингом FAM и ABB для электрооборудования.

ПРОЦЕСС СБОРКИ ЭКСКАВАТОРА

Процесс сборки экскаватора имел несколько ключевых этапов:

- установка радиально-осевого подшипника на движущийся станок карусель,
- вращение платформы,
- подъем и установка столба массой более 800 т и при этом использовались 4 подъемника, один из которых имел грузоподъемность 300 т,
- поднимающий вал противовеса вместе с электрическими контейнерами со встроенным электрооборудованием общей массой более 110 т,
- поднимать и ограничивать вала ротора,
- установка 14 ковшей Ротора,
- установка лебедок для подъема вала ротора и опорных канатов,
- усиление и обеспечение надежности перепускного устройства электрооборудования, кабелей и поддерживающей конструкции были встроены на ковшовый экскаватор во время установки.

 Около 115 тонн электрического оборудования, проводов и вспомогательных деталей было загружено на роторный экскаватор при его установке.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭФФЕКТА

РЕВИТАЛИЗАЦИЯ РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА SRs 1200 24/4 (G2) (год 2004)



ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ОТ РЕВИТАЛИЗАЦИИ ЭКСКАВАТОРА

Основные характеристики восстановленного экскаватора SRs 1201 24/4 (G2)

Характеристики экскаватора	Величины
Теоретическая производительность	4100 м³/ч
Мощность ротора	630 кВт
Тройной привод вращательного движения верхней конструкции	
Полностью новая стальная конструкция верхней части	
Впервые в Сербии был применен контейнерный принцип для реализации электрооборудования	
Двигатель настраиваемый по частоте/приводе	
Актуальные решения по секции управления	

ФУНКЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

ЦИКЛ ДЕМИНГА ПО НЕПРЕРЫВНОМУ УЛУЧШЕНИЮ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА

Цель: производительность экскаватора 5-10 м³/год



Рисунок 9 – Отчет «Тойота» А3 как инструмент решения проблем: Авария многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2), произошедшая 6 апреля 1995 года.

нашим людям, что умение решать проблемы необходимо для достижения успеха в «Тойота»."

Отчет «Тойота» АЗ читается сверху вниз, слева направо и используется для решения проблем, обновления сведений и внесения предложений. Отчет «Тойота» АЗ построен в соответствии с циклом непрерывного совершенствования Деминга.

10. Отчет «Тойота» АЗ о решении проблем в связи с аварией многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2)

10.1 Практическое решение проблемы

Процесс решения проблем, возникших в процессе работы, может быть описан логической последовательностью цикла непрерывного совершенствования Деминга, а Отчет «Тойота» АЗ включает в себя следующие семь этапов: исходная информация, текущее состояние, цель, причинно-следственный анализ, корректирующие меры, подтверждение действия, дальнейшие действия. Этот процесс основан на наблюдениях, проведенных в компании «Тойота» и опубликованных в [2].

Окончательный вид Отчета «Тойота» АЗ по аварии многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2), произошедшей 6 апреля 1995 года на угольном разрезе «Месторождение D» рудного бассейна «Колубара» компании «Электроэнергетика Сербии», которая ранее была частично проанализирована в [26], показан на рисунке 9.

11. Выводы

Отчет «Тойота» АЗ – гибкое средство решения проблем, возникающих в ходе работы – был адаптирован к нуждам эксплуатации горных машин (экскаваторов, транспортеров и др.) на карьерах. Учитывая большой объем имеющихся данных и сведений о таких сложных процессах, как процесс добычи угля и вскрышных работ на карьере, их сбор, возможно, потребует большого количества времени. По этой причине документирование с использованием Отчета «Тойота» АЗ имеет большое значение для ускорения коммуникации и сокращения потери времени при работе. Это представляет собой важный шаг в реализации концепции бережливого производства и системы Кайдзен на карьере рудного бассейна «Колубара» в г. Лазаревац компании «Электроэнергетика Сербии».

Отчет «Тойота» АЗ имеет потенциальные недостатки, связанные с решением конкретной проблемы аварии многоковшового экскаватора SRs 1200 24/4 (G2). Кажется, что он перегружен информацией и переусложнен. Это нормальная реакция, учитывая сложность документа и то, как много информации (данных) изложено на небольшом листе. Безупречных Отчетов «Тойота» АЗ не

существует. Каждый раз, когда возникает необходимость в составлении такого отчета, существует способ улучшить его содержание или форму.

Библиографический список

1. **Papic L.** Implementation Methodology for Risk Minimization into Maintenance Process of Production System at Coal Mines, Report of Contract No. 4617 (In Serbian) [Text] / L. Papic, M. Pantelic. – DQM Research Center – Kolubara Metal Company, 2009.
2. **Sobek II Durward K.** Understanding A3 Thinking. A Critical Component of «Toyota»'s PDCA Management System [Text] / K. Sobek II Durward, A. Smalley. – CRC Press, Taylor and Francis Group, 2008.
3. **Krafcik J.F.** Triumph of the Lean Production System [Text] / J.F. Krafcik // Sloan Management Review. – 1988. – Vol. 30. – P. 41-52.
4. **Dhillon B.S.** Mining Equipment Reliability, Maintainability and Safety [Text] / B.S. Dhillon. – Springer, 2008.
5. **Pantelic M.** Maintainability and Safety Engineering of Excavator Units (In Serbian) [Text] / M. Pantelic, L. Papic, J. Aronov. – DQM Research Center, 2011.
6. **Papic L.** Safety Based Maintenance Concept [Text] / L. Papic, J. Aronov, M. Pantelic // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. – 2009. – Vol. 16. – № 6. – P. 1-17.
7. **Papic L.** Statistical Safety Analysis of Maintenance Management Process of Excavator Units [Text] / L. Papic, M. Pantelic, J. Aronov // International Journal of Automation and Computing. – 2010. – Vol. 7. – № 2. – P. 146-152.
8. **Papic L.** Maintenance-Oriented Safety Control Charts [Text] / L. Papic, M. Pantelic // International Journal of Systems Assurance Engineering and Management. – 2014. – Vol. 5. – № 2. – P. 149-154.
9. **Papic L.** System Safety Analysis Via Accident Precursors Selection [Text] / L. Papic, M. Pantelic, J. Aronov // Dynamics of Information Systems. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. – 2014. – Vol. 105. – P. 179-204.
10. **Папич Л.** Интервальная оценка коэффициента готовности многоковшового экскаватора на основе бутстреп-моделирования [Текст] / Л. Папич, И.В. Гадолина, Р.И. Зайнетдинов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 6. – С. 55-62.
11. **Гадолина И.В.** Уточнение инженерной методики оценки скорости износа элементов рабочих органов экскаваторов [Текст] / И.В. Гадолина, П.А. Побегайло, Д.Ю. Крицкий и др. // Надежность. – 2019. – Т.19, № 1. – С. 18-23.
12. **Антонов А.В.** Исследование модели учета отказов по общей причине бета-фактора [Текст] / А.В. Антонов, В.А. Чепурко, А.Н. Черняев // Надежность. – 2019. – Т.19, № 2. – С. 9-17.
13. **Похабов Ю.П.** Проблемы надежности и пути их решения при создании уникальных высокоответствен-

ных систем [Текст] / Ю.П. Похабов // Надежность. – 2019. – Т.19, № 1. – С.10-17.

14. **Weigand B.** Lean Maintenance System, Zero Maintenance Time – Full Added Value [Text] / B. Weigand, R. Langmaack, T. Baumgarten. – Lean Management Institut, 2005.

15. **Hirano H.** 5S for Operators: 5 Pillars of the Visual Workplace [Text] / H. Hirano. – New York: Productivity Press, 1996.

16. **Dale B.G.** Managing Quality [Text] / B.G. Dale. – Oxford: Blackwell Publishers Ltd., 1999.

17. **Reason J.** Managing the Risks of Organizational Accidents [Text] / J. Reason. – Manchester: University of Manchester, 1997.

18. **Dhillon B.S.** Safety and Human Error in Engineering Systems [Text] / B.S. Dhillon. – Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2013.

19. **Reason J.** Human Error [Text] / J. Reason. – Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

20. **Taleb N.N.** The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable [Text] / N.N. Taleb. – New York: Random House, 2007.

21. **Aronov J.** Reliability and Safety Management of Engineering Systems Through the Prism of Black Swan Theory [Text] / J. Aronov, L. Papic // System Reliability Management, Solutions and Technologies. – 2018. – P. 103-112.

22. **Morgan J.M.** The «Toyota» Product Development System. Integrating People, Process and Technology [Text] / J.M. Morgan, J.K. Liker. – New York: Productivity Press, 2006.

23. **Womack J.P.** Lean Thinking. Banish Waste and Create Wealth in your Corporation [Text] / J.P. Womack, D.T. Jones. – New York: Free Press, 2003.

24. **Liker J.K.** «Toyota» Culture. The Heart and Soul of the «Toyota» Way [Text] / J.K. Liker, M. Hoseus. – New York: McGraw Hill, 2008.

25. **Osono E.** Extreme «Toyota», Radical Contradictions That Drive Success at the World's Best Manufacturers [Text] / E. Osono, N. Shimizu, H. Takeuchi and others. – New York: John Wiley and Sons Inc., 2008.

26. **Papic L.** A3 Report as an Effective Tool for Excavator Accident Problem Solving (In Serbian) [Text] / L. Papic, M. Pantelic // Proceedings of 21st DQM International Conference on Dependability and Quality Management. – 2018. – P. 3-13.

Сведения об авторах

Любиша Папич – доктор технических наук, профессор, директор Исследовательского центра по управлению качеством и надежностью (DQM), Чачак, Сербия, e-mail: dqmcenter@mts.rs

Ирина В. Гадолина – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, e-mail: gadolina@mail.ru

Милорад Пантелич – доктор технических наук, директор предприятия «Колубара Метал», г. Лазаревац, Сербия, доцент на Техническом факультете Чачак, Крагуевацкий университет, Сербия.

Неда Папич – бакалавр наук по специальности «Промышленная инженерия», студент магистратуры по специальности «Промышленная инженерия». Факультет технических наук, Университет, г. Нови Сад, Сербия.

Вклад авторов в статью

Любиша Папич

Обоснована целесообразность и необходимость применения отчета А3 в задачах управления предприятий, связанных с горнодобывающей промышленностью. На конкретном примере анализа аварии роторного экскаватора продемонстрированы этапы выполнения анализа.

Ирина В. Гадолина

Более детальная проработка информации о текущем состоянии надежности экскаватора, касающаяся вопросов вариабельности коэффициента готовности, построены доверительные интервалы для данной характеристики.

Пантелич Милорад

Осуществлял оперативный контроль за ходом работ по восстановлению экскаватора после аварии. Проводил сбор информации от отказах рабочих органов экскаватора и его подсистем. Организовал предоставление графиков выполнения ремонтных работ.

Папич Неда

Обеспечила представление информации в подобающем для написания статьи виде. Обеспечила дизайн и верстку статьи.