

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук»**

На правах рукописи



Швыдкин Сергей Анатольевич

**ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНОГО АВТОСАМОСВАЛА
ПО КРИТЕРИЮ ЖИВУЧЕСТИ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
Герике Борис Людвигович

Кемерово – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1. АНАЛИЗ ПРОСТОЕВ И ТРУДОЁМКОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ.....	11
1.2. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ	16
1.3. СРАВНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	19
1.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	23
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ	24
2.1. ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПРИ СОПРОВОЖДЕНИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ	24
2.2. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНОГО АВТОСАМОСВАЛА.....	28
2.3. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	38
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА	39
3.1. СИСТЕМА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ АВТОСАМОСВАЛОВ.....	39
3.2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА.....	41
3.3. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	45

ГЛАВА 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА	46
4.1. ПРОГРАММА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА УЧАСТКА РАМЫ КАРЬЕРНОГО АВТОСАМОСВАЛА	46
4.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНОГО АВТОСАМОСВАЛА	49
4.3. ДИАГНОСТИКА УЧАСТКА РАМЫ И ОПИСАНИЕ ОБНАРУЖЕННЫХ ДЕФЕКТОВ	53
4.4. КОРРЕКТИРОВКА КРИТЕРИЕВ ЖИВУЧЕСТИ ПО ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	70
4.5. ФАКТОРЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА РАЗВИТИЕ ДЕФЕКТОВ	72
4.6. ИНТЕГРАЦИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА В СИСТЕМУ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА	76
4.7. СХЕМА РАССТАНОВКИ ДАТЧИКОВ ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ МОНИТОРИНГЕ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ	82
4.8. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	85
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	88
ПРИЛОЖЕНИЕ А	110
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. При открытом способе разработки полезных ископаемых наиболее трудоёмким и дорогостоящим процессом является перемещение горной массы с использованием карьерных автосамосвалов. Затраты на транспортировку составляют от 40 до 50 % себестоимости добычи полезного ископаемого.

Анализ общего временного фонда причин простоев карьерного автотранспорта на разрезах Кузбасса показал, что доля простоев из-за отказов основных несущих металлоконструкций составляет 20-25 %. Количество отказов узлов автосамосвала зависит от возникновения и развития в них трещин, которые образуются, главным образом, в элементах рамы, кузова и подвески карьерного автосамосвала [1].

Систематически возникающие случаи трещинообразования могут привести к разрушениям рам и финансовым потерям как из-за снижения объемов транспортирования полезного ископаемого, так и из-за большой стоимости ремонта крупногабаритных узлов и конструкций. Затраты на устранение последствий отказов металлоконструкций автосамосвалов могут достигать 80% затрат на текущие ремонты [2].

Для предотвращения аварийных отказов, а также для сохранения ресурса автосамосвала, необходимо уметь не только своевременно обнаруживать дефекты, но и оценивать живучесть металлоконструкций, то есть их способность выполнять свои функции несмотря на имеющиеся повреждения с учётом постоянно меняющихся эксплуатационных факторов. Из-за влияния негативных факторов скорость развития дефектов рамы автосамосвала может составлять до 500 мм за полгода эксплуатации, поэтому нередко отказ наступает до очередного запланированного обследования.

Применяемые сегодня методы неразрушающего контроля, не могут решить поставленную задачу, а значит, не могут обеспечить безаварийную эксплуатацию автосамосвала.

Таким образом, разработка и реализация методов диагностирования, позволяющих своевременно обнаруживать дефекты, отслеживать их развитие и оценивать живучесть в режиме онлайн мониторинга с учётом воздействия эксплуатационных факторов, а также позволяющих на основе этих данных оперативно принимать управленческие решения, направленные на сохранение ресурса металлоконструкций и предотвращение аварийных отказов, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследований

Вопросами изучения особенностей эксплуатации карьерного транспорта занимались такие ученые и исследователи, как В.В. Аксенов, Л.И. Андреева, А.А. Альшанская, С.А. Арефьев, Т.В. Астахова (Т.В. Донцова), Ю.Н. Барышников, Б.У. Бусел, Г.Д. Буялич, А.Ю. Воронов, Б.Л. Герике, А.С. Довженок, С.В. Доронин, М.Ю. Дрыгин, С.Н. Зарипова, И.В. Зырянов, С.А. Испеньков, М.Ю. Насонов, В.С. Квагинидзе, Д.А. Клебанов, В.Б. Корецкий, И.Л. Кравчук, Т.И. Красникова, И.В. Кузнецов, Ю.А. Лагунова, В.В. Москвичев, А.В. Менчугин, С.Н. Найден, И.А. Паначев, А.А. Ракицкий, С.С. Сайдуллозода, А.С. Фурман, А.А. Хорешок и др.

Большой вклад в развитие метода акустической эмиссии внесли российские ученые В. М. Баранов [3], О.В. Башков [4], Г.А. Бигус [5], С. И. Буйло [6], С. П. Быков [7], В. А. Грешников [8], Ю. Б. Дробот [9], В. И. Иванов [10], В.А. Барат [9], А.Я. Недосека [12], С.В. Панин [13], Н.А. Семашко [14], А. Н. Серьезнов [15], Г.Д. Стенин [16], Л. Н. Степанова [17-18], В. А. Стрижайло [19], А. С. Трипалин [20], В.В. Шемякин [21] и др. Из зарубежных исследователей, прежде всего, необходимо выделить работы Н. L. Dunegan [22], К. Ono [23], М. Otsu [24], А. Pollock [25-26], С. В. Scruby [27], Н. N. G. Wadley [28] и другие.

Метод акустической эмиссии (АЭ) является диагностическим видом неразрушающего контроля, он позволяет выявлять развивающиеся дефекты конструкции с использованием акустических волн, вызванных релаксацией механического напряжения, возникающих при зарождении и развитии дефектов. Разрушение материала вызывает генерацию коротких волновых импульсов, которые преобразуются первичными преобразователями в электрические сигналы акустической эмиссии [29-30]. Анализируя интенсивность процесса и его энергетические параметры, возможно определить стадию развития и степень опасности выявленного дефекта.

Целью работы является разработка системы технической диагностики для обеспечения безаварийной эксплуатации несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов с учетом критерия живучести.

Идея работы состоит в обеспечении постоянного мониторинга развития и оценки возникновения эксплуатационных дефектов металлоконструкций автосамосвалов посредством применения АЭ, что позволяет повысить надежность и эффективность их эксплуатации.

Объектом исследования являются несущие элементы металлоконструкций карьерного автосамосвала.

Предметом исследования является интенсивность сигналов АЭ, излучаемых развивающимися дефектами несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов.

Задачи исследования:

- обосновать метод диагностики для обнаружения и оценки эксплуатационных дефектов металлоконструкций автосамосвалов;
- исследовать живучесть несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов с помощью метода акустической эмиссии и обосновать критерий живучести;

- разработать методику проведения АЭ мониторинга (акустико-эмиссионного мониторинга) для определения технического состояния металлоконструкций автосамосвалов;

- выполнить опытно-промышленную апробацию разработанной системы АЭ мониторинга.

Научная новизна:

- разработана методика проведения АЭ мониторинга для диагностики металлоконструкций автосамосвалов;

- разработана система АЭ мониторинга с поочерёдной регистрацией данных с каналов на основе универсальной платы аналогового ввода;

- установлено, что с учетом критерия живучести ($K_{\text{жив}} < 4$) увеличение интенсивности сигналов АЭ характеризует переход от равномерного развития дефекта к ускоренному.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научное значение работы состоит в установлении взаимосвязи интенсивности АЭ сигналов и параметров трещиноподобных дефектов, в определении и практическом подтверждении критерия живучести несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанная система технической диагностики несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов позволяет автоматизировать процесс диагностики и получать достоверную и актуальную информацию о техническом состоянии металлоконструкций.

Методы исследований: в работе использован комплекс методов исследования, включающий анализ литературных источников и методов научного обобщения, статистический анализ отказов оборудования парка автосамосвалов, экспериментальные исследования на реальных действующих механизмах,

статистический анализ эксплуатационных дефектов и мест выявленных зон повышенной активности сигналов АЭ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Наиболее объективным признаком, характеризующим зарождающиеся дефекты и позволяющим оценить степень опасности развивающихся дефектов несущих металлоконструкций автосамосвала, является сигнал акустической эмиссии.

2. Разработанный критерий живучести металлоконструкций автосамосвалов позволяет противостоять развитию критических отказов и сохранять работоспособность в условиях воздействия различных негативных факторов.

3. Управление живучестью металлоконструкций автосамосвалов осуществляется по критерию живучести, чем определяется максимально допустимый уровень повреждений, при котором металлоконструкция сохраняет свою функциональность и безопасность в данных условиях эксплуатации.

Достоверность научных результатов подтверждается:

- соответствием теоретических результатов АЭ контроля экспериментальным данным, полученным с использованием разработанной системы диагностики;
- применением проверенных методов математической обработки и статистической проверки результатов;
- использованием измерительно-регистрирующей аппаратуры с погрешностью, не превышающей $\pm 1-2$ дБ по амплитуде сигнала акустической эмиссии;
- положительными результатами апробации разработанной методики на разрезах АО «УК «Кузбассразрезуголь».

Личный вклад автора заключается:

- в разработке системы АЭ мониторинга, включая разработку датчиков акустической эмиссии, магнитных держателей для датчиков и предварительных усилителей;

- в обработке экспериментальных данных и получении зависимостей интенсивности АЭ сигналов, излучаемых дефектами, от различных эксплуатационных факторов;
- в теоретических и экспериментальных исследованиях, направленных на изучение влияния условий эксплуатации карьерных автосамосвалов на рост дефектов и характеристики сигналов акустической эмиссии;
- в обосновании критерия живучести рамы карьерных автосамосвалов;
- в разработке методики проведения АЭ мониторинга, позволяющей оперативно оценивать опасность обнаруженных дефектов несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов.

Реализация работы

Результаты работы использованы в условиях филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» для получения сведений о дефектах, необходимых для проведения ремонта. Разработанная методика проведения диагностики несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов используется для подготовки горных инженеров при чтении лекций по диагностике горного оборудования и выполнении дипломных проектов.

Апробация работы

Основные научные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XI, XII и XIV международных научно-практических конференциях «Современные тенденции и инновации в науке и производстве» (Междуреченск, 2022, 2023, 2025); VIII международной научно-практической конференции «Перспективы инновационного развития угольных регионов России» (Прокопьевск, 2022); III международной научно-практической конференция «Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении» (Кемерово, 2022); ежегодных конференциях молодых ученых ФИЦ УУХ СО РАН «Развитие» (Кемерово, 2022, 2023, 2024, 2025); международных научно-практических конференциях «Наукоемкие технологии разработки и использования

минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 2022, 2023, 2025); 16-ой международной научной школы молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 2023); XXIII Международная научно-техническая конференция «Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности», сборник трудов конференции (Екатеринбург, 2025); Материалы международной научно-практической конференции МИАР-2025-VIII (Санкт-Петербург, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 113 страниц машинописного текста, включая 57 рисунков, 6 таблиц, 143 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и 2 Приложения.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю д.т.н., проф. Б.Л. Герике, д.т.н. В.В. Аксенову, Г.Д. Стенину, И.М. Фридману, А.И. Ефремову, Е.С. Ковалеву, А.Г. Медведеву, В.В. Нестерову за поддержку данного направления работы, ценные научные консультации и практическую помощь при проведении исследований, а также руководству и работникам АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» за оказанную помощь в предоставлении подвижного состава, допуска на производство, организации и проведении технических работ, сотрудникам ООО «Кузбассвязьуголь» за оказанную помощь в проведении экспериментальных исследований. Отдельная благодарность А.С. Ефимову за участие в разработке системы АЭ мониторинга, разработку программного обеспечения сбора и передачи данных.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ простоев и трудоёмкость восстановления карьерных автосамосвалов

Представленный в работах [31-32] анализ причин ремонтных простоев карьерных автосамосвалов (таблица 1) показывает, что доля простоев, связанных с проведением сварочных работ основных несущих элементов металлоконструкций, составляет от 5 до 10%. Это значимая часть простоев, которая требует обратить на себя внимание. К основным несущим элементам металлоконструкций автосамосвала прежде всего относятся рама и корпуса мотор-редукторов (РМК).

Таблица 1. Причины и удельный вес отказов в работе автосамосвалов на предприятиях АО «УК «Кузбассразрезуголь»

Причина	Кедровский		Моховский		Бачатский		Калтанский	
	моточас	%	моточас	%	моточас	%	моточас	%
ДВС	7986,2	11,38	1623,3	12,65	19265,6	24,91	9165,0	26,58
Электропривод	10032,4	14,29	0,0	0,00	13998,3	18,10	2896,0	8,39
Рулевое управление	856,1	1,22	356,6	2,78	2489,0	3,22	359,0	1,04
Тормозная система	2165,6	3,08	523,1	4,07	2389,1	3,09	679,0	1,97
Шиномонтажные работы	15798,0	22,51	1165,3	9,08	8698,0	11,24	2157,0	6,25
Сварочные работы	7234,3	10,31	800,2	6,24	4111,1	5,31	3548,4	10,30
РМК	18286,7	26,05	5855,7	45,63	23100,8	29,86	10977,4	31,83
Прочие трансмиссии	7837,2	11,16	2509,6	19,55	3300,4	4,27	4704,6	13,64
Итого:	70196,5	100	12833,8	100	77352,3	100	34486,4	100

Рама автосамосвала, является особо нагруженной несущей конструкцией машины. По состоянию рамы можно оценить общее техническое состояние карьерного автосамосвала. Постоянно возникающие дефекты и вынужденные остановки на внеплановый ремонт, значительно ухудшают как производительность, так финансовое положения предприятия. Поэтому,

необходимость постоянно следить за техническим состоянием несущих элементов, а в особенности рамы, является весьма актуальной задачей.

В процессе эксплуатации самосвала, в раме под воздействием динамических нагрузок развиваются дефекты, для выявления которых периодически проводится диагностика. И, хотя участки, на которых происходит наиболее интенсивное развитие дефектов давно известны [33-39], тем не менее отказы, связанные с разрушением элементов металлоконструкций, происходят. Проблема усталостных разрушений в элементах рам является на сегодняшний день одной из основных [40]. Развитие дефектов в металлоконструкциях зависит от большого количества факторов, например, горно-геологических условий (крепость пород, трещиноватость, разрыхленность), технологии отработки месторождений, качества ремонтных работ, соблюдения правил технической эксплуатации, качества дорожного покрытия [41-44], навыков вождения автосамосвала водителем, температурного режима эксплуатации [45-49], сезонности, уровня организации работ и др. Рассчитать время, которое автосамосвал может проработать в безотказном режиме, с учетом указанных факторов довольно сложно. Поэтому, для уменьшения количества отказов, необходимо вместо периодической применять постоянную диагностику на основе дистанционных методов контроля, что позволит перейти от ремонта по пробегу, к ремонту по техническому состоянию.

Практика показывает, что за промежуток времени между ремонтами, дефекты могут достигать критических значений. Это не только увеличивает время на восстановительные работы, но и приводит к росту простоев, связанных с приобретением запасных частей и ожиданием ремонта. Постоянные возникновения трещин в раме могут привести к разрушениям, затраты на устранение которых могут достигать 80% затрат на текущие ремонты [2].

Что касается простоев, связанных с выходом из строя редуктора мотор-колеса, то они занимают лидирующую позицию в списке простоев, их доля составляет от 26 до 45%. Основная причина аварийных поломок редукторов мотор-

колёс карьерных автосамосвалов заключается в их интенсивном износе. В целях его своевременного обнаружения и, следовательно, сокращения незапланированных простоев автосамосвалов в ремонтах, целесообразно применять дистанционную техническую диагностику состояния отдельных узлов и агрегатов. Современные методы диагностики позволяют не только обнаружить неисправный агрегат или узел, но и установить причину неисправности, а также отслеживать его состояние.

На горных предприятиях техническое состояние редукторов мотор-колёс карьерных автосамосвалов в процессе эксплуатации в основном определяется: внешним осмотром; на слух (шумность работы) и вибрацию; по степени нагрева корпуса агрегата. Внешним осмотром, по протечкам масла, можно выявить износ или повреждение манжет, а также появление пор и трещин в корпусе, крышке или ступице мотор-колеса. При появлении вибрации или повышенного уровня шума при работе могут быть выявлены случайные поломки или ослабление крепления деталей. По степени нагрева можно определить нарушение регулировки подшипников или изменение уровня масла в редукторе [50-52].

Данная работа посвящена разработке системы технической диагностики несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов. Большие сложность и трудоемкость сварочных работ по устранению трещин, а также работ по усилению наиболее нагруженных мест рамы обусловлены:

- особенностью конструкции лонжеронов и поперечин коробчатого сечения;
- необходимостью проведения работ непосредственно на автомобиле, часто в труднодоступных местах;
- высокими требованиями к качеству работ, от которого зависит не только работоспособность машины, но и безопасность работ.

Доля расходов на карьерный транспорт в общей стоимости добычи полезного ископаемого в настоящее время составляет до 50%. Одной из основных статей затрат горнодобывающего предприятия, эксплуатирующего автомобильный

транспорт, являются затраты на поддержание автомобилей в технически исправном состоянии и восстановление их после отказов.

В работе [53] было проведено исследование влияния различных эксплуатационных показателей парка карьерных самосвалов на величину затрат на техническое обслуживание и ремонт. Показатель «Трудоёмкость» характеризует затраты трудовых ресурсов, которые были привлечены к устранению отказов. Примерно в 80% случаев трудозатраты принимают значение от 0 до 350 чел·ч (рисунок 1), при среднем значении трудоёмкости 410 чел·ч. Удлиненная правая часть гистограммы соответствует трудозатратным ремонтам от 2000 до 6000 чел·ч. К таким ремонтам относятся внеплановые ремонты по замене двигателей внутреннего сгорания, редукторов мотор-колёс и тому подобное. Разброс значений трудоёмкости довольно большой и составляет 491 чел·ч.

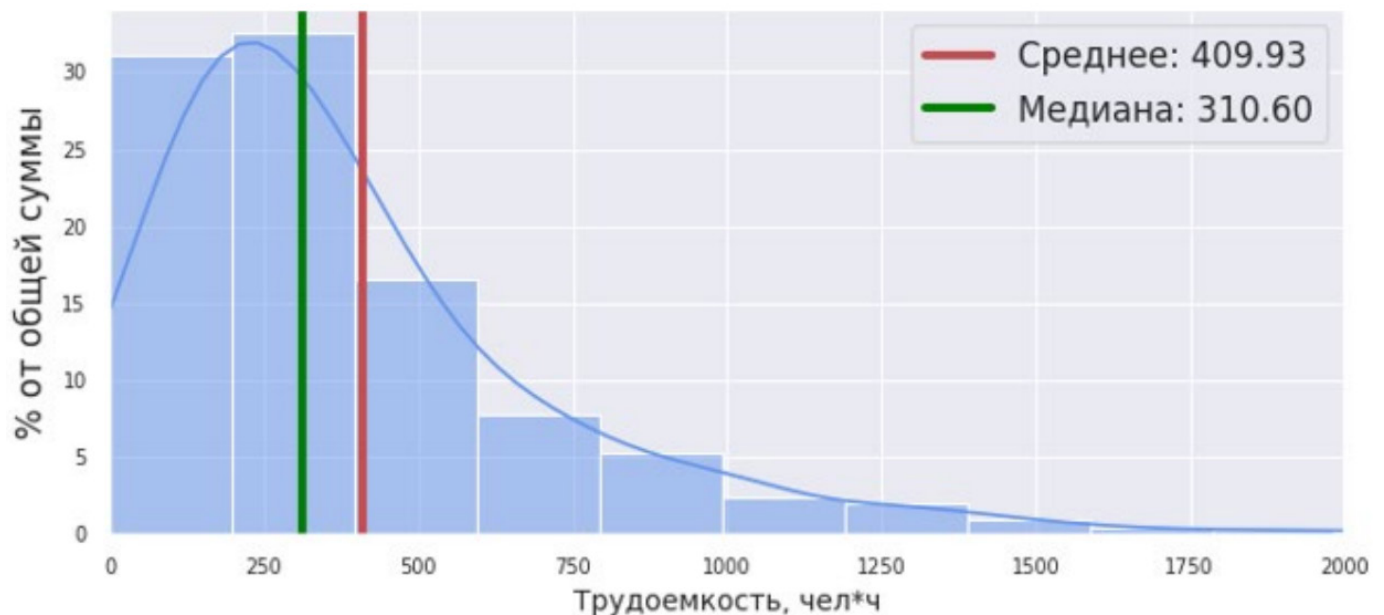


Рисунок 1. – Гистограмма распределения значений показателя «Трудоёмкость»

Продуктивность перемещения горной массы зависит от выбора стратегии технического обслуживания, формирующей стоимость транспортной услуги. Какой бы совершенной не была техника, создаваемая горными машиностроителями, в первую очередь от потребителя зависит эффективность ее

эксплуатации. Эволюция карьерных самосвалов происходит одновременно с развитием системы их обслуживания. Усложнение техники повышает требования к своевременному, рациональному поддержанию и восстановлению работоспособного состояния машин, то есть системы профилактики отказов.

Действующая на горнодобывающих предприятиях система основана на «Положении о техническом обслуживании, диагностировании и ремонте карьерных самосвалов БелАЗ», регламентирует период и набор определенных технических воздействий на узлы и детали конструкции машины независимо от их технического состояния в данный момент времени, то есть, основана на жестком директивном подходе.

Исследования показали, что карьерные автосамосвалы 20-30% календарного времени находятся в техническом обслуживании и ремонте, а трудозатраты на эту работу достигают 50-60% общих трудовых затрат на транспорт. По мере расходования ресурса техническое состояние самосвалов и показатели их использования ухудшаются.

В то же время оптимальные системы профилактики, обеспечивающие наименьшие экономические затраты и максимальный коэффициент готовности машин в данных конкретных условиях, могут строиться только на принципах учета технического состояния деталей, узлов и машины в целом в каждый рассматриваемый момент времени. Однако такой подход может быть реализован лишь с помощью эффективных диагностических средств. Наиболее перспективно направление по созданию и применению бортовых диагностических систем [54], основанных на дистанционных методах диагностики, с помощью которых можно не только оценивать состояние узлов и деталей машин, но и управлять их надежностью.

1.2. Методы неразрушающего контроля и функциональной диагностики несущих элементов карьерных автосамосвалов

В руководстве по ремонту карьерного самосвала БелАЗ-75306 для обнаружения дефектов рекомендуется использовать следующие методы неразрушающего контроля: визуально-измерительный контроль [55-57], метод цветной дефектоскопии [58-61], магнитный метод [62-66] и ультразвуковой контроль [67-71]. Из-за большого объема работы при обследовании самосвала, наличия труднодоступных мест, большого интервала между обследованиями, а также влияния человеческого фактора, часть дефектов не удаётся своевременно обнаружить. Применение указанных методов помогает значительно снизить количество отказов оборудования, но полную гарантию на безаварийную работу не даёт, особенно на самосвалах большой грузоподъёмности [72]. Практика показывает, что применяемые методы неразрушающего контроля, в целом не позволяют оценить техническое состояние металлоконструкций автосамосвала [73]. Нередки случаи, когда дефекты достигают значительных размеров и в дальнейшем приводят к аварии.

Поэтому для повышения качества обследования подключаются методы функциональной диагностики, позволяющие дистанционно получать информацию о техническом состоянии автосамосвала.

К методам функциональной диагностики можно отнести:

- тензометрический контроль [74];
- ультразвуковую дефектоскопию на фазированных решетках [75, 76];
- контроль состава вещества [77];
- тепловизионный контроль [78];
- шумовой контроль (акустический);
- вибрационный контроль;

– акустико-эмиссионный (АЭ) контроль.

Из перечисленных методов, для обнаружения дефектов во время непосредственной работы автосамосвала в карьере, наиболее подходят последние три, относящиеся к функциональным методам, поэтому рассмотрим их подробнее.

Шумовой контроль. Метод шумовой диагностики основан на регистрации и анализе акустических шумов, которые позволяют судить о возникновении и развитии дефектов.

На рисунке 2 представлен простой пример анализа шумов, когда техническое состояние работающего насоса определялось на основе оценки субъективных ощущений обслуживающего персонала. Сегодня оценка технического состояния на основе прослушивания все еще широко используется, поскольку субъективные ощущения человека отражают особо важные признаки неисправностей.

Современные цифровые приборы (рисунок 3) позволяют более точно определять характеристики шумов и проводить анализ в различных частотных диапазонах.

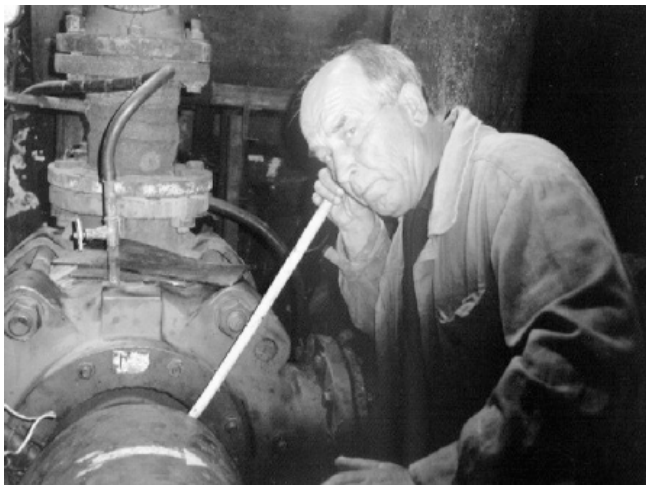


Рисунок 2. – Прослушивание шумов работающего сетевого насоса



Рисунок 3. – Прослушивание шумов работающего электродвигателя

Путём сравнения характеристик шума от исправного и неисправного оборудования вполне возможно определять техническое состояние мотор-

редукторов (рисунок 4) [50, 51, 79-80] и подшипников электродвигателей автосамосвала.

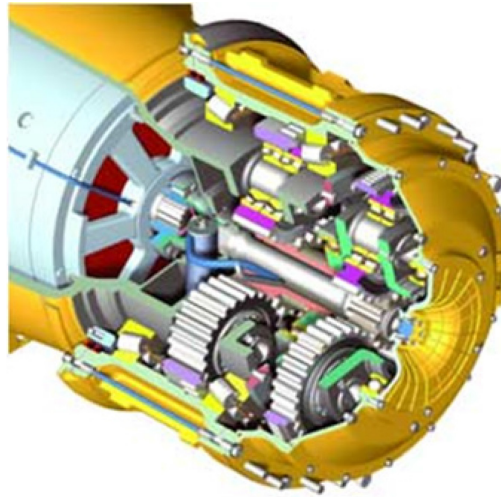


Рисунок 4. – Редуктор мотор-колеса (РМК) самосвала

Вибродиагностика позволяет оценить степень отклонения параметров технического состояния от нормы по косвенным признакам, а именно, по изменению свойств виброакустических процессов, зависящих от характера взаимодействия комплектующих узлов и деталей. Вибродиагностика позволяет обследовать объект без вывода из эксплуатации, выполнять контроль качества изготовления и ремонта машинного оборудования. Исключение сборочно-разборочных работ не только экономит время на ремонт, но и предотвращает нанесение механизму повреждений, связанных с переборками, нарушающими приработку деталей. На автосамосвалах вибродиагностический метод применяется в основном для оценки состояния редуктора мотор-колеса [81-85].

Метод акустической эмиссии основан на регистрации и анализе акустических волн, возникающих в объекте под воздействием нагрузки во время роста дефектов. Без нагрузки нет и эмиссии, а при эксплуатации самосвала в качестве нагрузки выступают динамические воздействия на несущие элементы металлоконструкций, возникающие при движении самосвала по неровной дороге. Кроме этого, АЭ метод также позволяет проводить анализ шумов в ультразвуковом

диапазоне, поэтому с его помощью вполне возможно будет определять техническое состояние мотор-редукторов и подшипников электродвигателей.

Как правило, данные АЭ интерпретируются совместно с технологическими параметрами контролируемого объекта, которые позволяют соотнести интенсивность и энергетические характеристики процесса АЭ с изменением нагруженности контролируемого объекта.

1.3. Сравнение метода акустической эмиссии с другими методами неразрушающего контроля

По характеру получаемой информации методы неразрушающего контроля можно разделить на дефектоскопические (тестовые) и диагностические (функциональные). Дефектоскопические методы контроля, направлены на определение формы, размеров, ориентации дефектов. Данные методы неразрушающего контроля проводятся на остановленном оборудовании.

Диагностические методы контроля напротив, предназначены для выявления по косвенным признакам зоны расположения характерного дефекта и определение степени его опасности по отношению к контролируемому элементу. Диагностические методы проводятся на работающем по технологическому регламенту оборудовании.

Ни один из методов НК не универсален, поэтому при определении фактического состояния оборудования очень важен не только правильный выбор метода контроля, но и комбинирование ряда методов.

Для количественной оценки результатов требуется четкое представление о рациональных границах чувствительности каждого метода. Главными критериями при контроле является выявляемость дефектов данным методом, стоимость и производительность контроля [86].

Из диагностических методов неразрушающего контроля метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из самых эффективных способов обнаружения

дефектов на ранних этапах развития. Он получил широкое распространение в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, нефтегазовой, металлургической промышленности, а также на объектах газораспределения и потребления. Использование АЭ контроля привело к повышению скорости проведения и качества выполнения диагностики, уменьшению временных и экономических затрат.

В 2003 году, была сделана попытка перенести опыт применения АЭ контроля, полученный в химической и металлургической отраслях, на объекты угольной промышленности. Одной из основных причин простоев шагающих экскаваторов являлись работы, связанные с ремонтом стрелы [87], поэтому для оценки её технического состояния был использован АЭ контроль [88-93].

В результате данных работ [88-93] была доказана возможность проведения АЭ контроля на экскаваторах (рисунок 5) в производственных условиях, а также обнаружены дефекты, впоследствии подтверждённые другими методами неразрушающего контроля.



Рисунок 5. – Шагающий экскаватор

Однако по прошествии времени, можно констатировать, что в угольной отрасли, применение АЭ контроля до сих пор остаётся крайне редким. Такая ситуация сложилась из-за особенности эксплуатации оборудования в непрерывных циклах, с редкими и короткими остановками на техническое обслуживание (ТО). А при необходимом условии невмешательства в производственный процесс, применение АЭ контроля становилось экономически неэффективным, то есть использование АЭ метода приводило либо к простоям оборудования, либо к «простоям» специалистов, ожидающих очередного ТО оборудования. Поэтому и возникла необходимость в создании системы диагностики, которая могла бы выполнять диагностику на постоянной основе.

АЭ метод позволяет в реальном времени следить за образованием и развитием дефектов и контролировать весь объект целиком, поэтому он является наиболее предпочтительным для диагностики металлоконструкций карьерных автосамосвалов.

Метод АЭ не имеет альтернатив при непрерывном мониторинге динамического оборудования. Это единственный метод контроля, который благодаря возможности дистанционного контроля и высокой чувствительности к обнаружению трещин позволяет при многоканальном исполнении в режиме реального времени контролировать объекты, предотвращая развитие внезапных аварийных ситуаций. Опыт применения метода АЭ показывает, что дефекты надёжно обнаруживаются преимущественно на конечных стадиях разрушения, когда количество импульсов АЭ возрастает более, чем на порядок. В тоже время, раннее обнаружение дефектов на стадии их стабильного роста является сложной задачей, требующей проведения фундаментальных научных исследований, поскольку методология акустико-эмиссионного контроля в настоящее время активно развивается, а диагностические модели, методы и алгоритмы не имеют законченных обоснованных решений [94].

Основными отличиями метода акустической эмиссии от других методов неразрушающего контроля является то, что

- источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник;
- метод АЭ обнаруживает развивающиеся, т.е. наиболее опасные дефекты;
- метод АЭ является дистанционным, он не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов, а только правильного размещения датчиков на поверхности объекта для осуществления локации источника АЭ.

Основные отличия метода АЭ представлены в следующей таблице (таблица 2).

Таблица 2. Сравнение акустико-эмиссионного метода с другими методами неразрушающего контроля

Сравнение АЭ с другими методами НК	
Метод акустической эмиссии	Другие методы неразрушающего контроля
Обнаруживает движение/рост дефектов	Обнаруживают геометрическую форму дефектов
Требуется нагружения	Не требуют нагружения
Каждое нагружение уникально	Контроль воспроизводим
Чувствителен к структуре материала	Менее чувствительны к материалу
Менее чувствителен к геометрии дефекта	Более чувствительны к геометрии
Требуется меньших усилий при проведении контроля продукции/процессов	Требуют больших усилий при проведении контроля продукции/процессов
Требуется доступ только в местах установки датчиков	Требуют доступ ко всей поверхности объекта
Контролирует конструкцию за один цикл нагружения	Постепенное сканирование участков конструкции
Основные проблемы: сильное влияние шума	Основные проблемы: сильное влияние геометрии

1.4. Выводы по главе 1

В результате проведенного анализа сформулирована цель работы, которая состоит в необходимости разработки системы технической диагностики для обеспечения безаварийной эксплуатации несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи:

- обосновать метод диагностики для обнаружения и оценки эксплуатационных дефектов металлоконструкций автосамосвалов;
- исследовать живучесть несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов с помощью метода акустической эмиссии и обосновать критерий живучести;
- разработать методику проведения АЭ мониторинга для определения технического состояния металлоконструкций автосамосвалов;
- выполнить опытно-промышленную апробацию разработанной системы АЭ мониторинга.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЖИВУЧЕСТИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

2.1. Лабораторные механические испытания образцов при сопровождении акустико-эмиссионного контроля

В процессе эксплуатации карьерных автосамосвалов под воздействием динамических нагрузок в металлоконструкциях образуются дефекты, которые в дальнейшем развиваются по усталостному типу. Наличие дефектов приводит к необходимости оценки живучести металлоконструкций. Под живучестью [95] понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов.

Современные оценки живучести сводятся в основном к определению критериев, характеризующих переход от стабильного развития дефекта к его критической стадии, т.е. к внезапному разрушению. Критерий живучести – это признак или показатель, который позволяет оценить, насколько система способна сохранять свою работоспособность и выполнять свои функции в условиях воздействия различных негативных факторов.

Этапы развития методов оценки живучести представлены на схеме (рисунок 6) и вся дальнейшая работа будет проходить согласно этой схемы.

Этапы разработки критериев живучести на основе АЭ метода

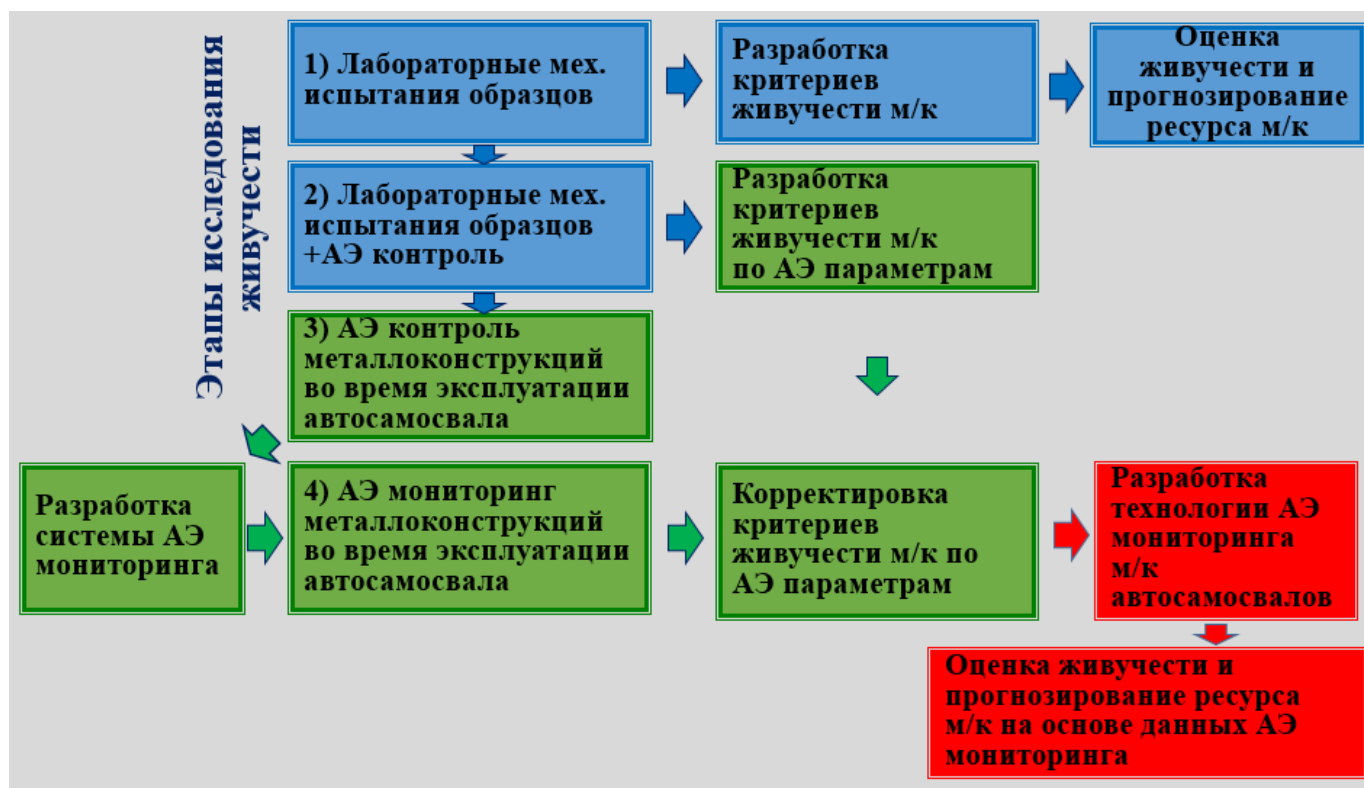


Рисунок 6. – Этапы развития методов оценки живучести.

На рисунке 6 синим цветом обозначена работа, выполненная другими авторами, зеленым - выполненная при участии автора, а красным – работа, которую ещё предстоит выполнить.

Традиционно критерии живучести разрабатывались в результате лабораторных механических испытаний образцов с надрезами, а также промышленных испытаний, в которых исследуется влияние различных эксплуатационных факторов на скорость развития дефектов и определяются критические размеры дефектов.

В результате механических испытаний [96] образцов с надрезами были получены зависимости критериев, характеризующих стадию внезапного разрушения, от таких параметров, как раскрытие трещины, её длина, уровень приложенной нагрузки, расположение в пространстве, температура окружающей среды и др. Результаты этих испытаний используются при проектировании

металлоконструкций автосамосвалов и проверке качества деталей. Однако, оценка живучести металлоконструкций карьерных автосамосвалов на основе классических инженерных методов усталостной прочности не учитывает того момента, что при наличии дефектов естественные усталостные процессы протекают во много раз быстрее [97], приводя к преждевременным разрушениям несущих конструкций.

Кроме этого, чтобы на производстве применить полученные в лабораторных испытаниях критерии живучести, необходимо сначала своевременно обнаружить дефекты. Но, практика показывает, что с помощью визуально-измерительного контроля не все дефекты удаётся найти. Связано это как с человеческим фактором, так и с тем, что осмотр проводится в основном, по пробегу автосамосвала, то есть довольно редко. Поэтому несмотря на проделанную работу, на производстве происходят аварии, связанные с разрушением несущих элементов металлоконструкций автосамосвалов, а применяемые методы диагностики не позволяют оценить техническое состояние автосамосвала в целом.

В качестве альтернативы визуально-измерительному контролю для обнаружения дефектов автором диссертационной работы было предложено использовать метод акустической эмиссии (АЭ), позволяющий проводить диагностику непосредственно во время эксплуатации автосамосвала в карьере. Также была поставлена задача разработки критериев живучести на основе сигналов акустической эмиссии, излучаемых дефектами в процессе эксплуатации.

Нами были изучены результаты работ [8, 98-99], в которых описывались *лабораторные механические испытания в сопровождении АЭ контролем*. Отмечалось, что с помощью АЭ контроля вполне возможно, как отслеживать развитие усталостных трещин, так и оценивать степень их опасности. При проведении испытаний с циклическими изгибами надрезанных образцов, стало возможным по параметрам сигналов АЭ определять момент перехода от равномерного роста трещины, к ускоренному. Как видно из графика (рисунок 7),

при возрастании интенсивности сигналов АЭ в 4 раза и более, можно говорить о наступлении этапа ускоренного роста дефекта.

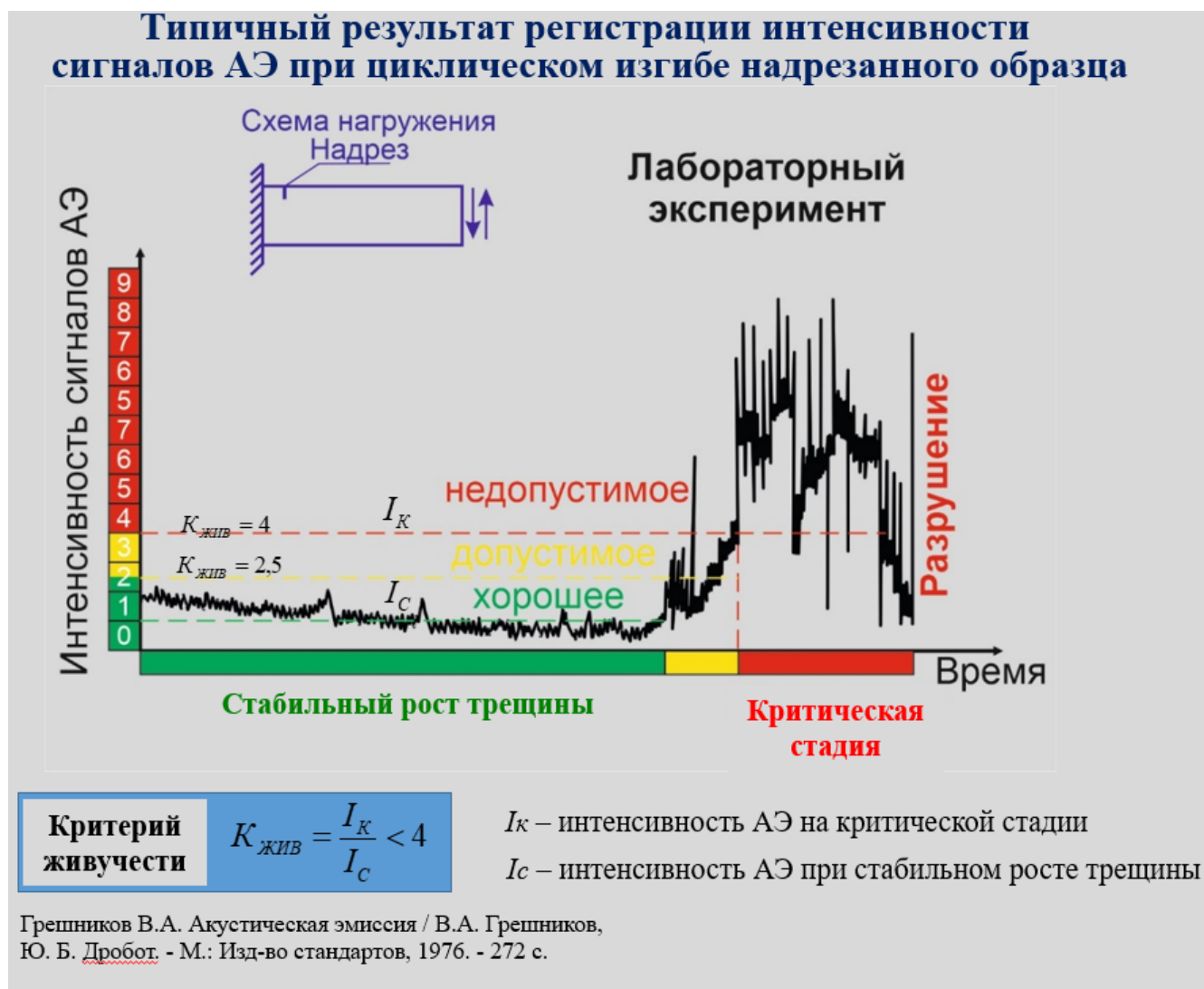


Рисунок 7. – Испытания с АЭ контролем при циклическом изгибе надрезанного образца [8]

Ещё одним примером, подтверждающим возможность определения этапа ускоренного роста дефектов по АЭ сигналам, является лабораторный эксперимент [100], в котором было проведено испытание балки ведущего моста большегрузного автомобиля при циклическом нагружении (рисунок 8). В результате оказалось, что

интенсивность сигналов АЭ на этапе ускоренного роста дефектов (17,4 имп./с) выше в 4,6 раза, чем при равномерном росте (3,8 имп./с), что также подтверждает выводы предыдущих испытаний (рисунок 7).



Рисунок 8. – АЭ контроль балки ведущего моста большегрузного автомобиля при циклическом нагружении [95]

Таким образом, в ходе лабораторных экспериментов были получены новые критерии оценки живучести на основе изменения интенсивности АЭ сигналов при росте дефектов. На следующем этапе необходимо было подтвердить возможность выполнения АЭ контроля на карьерном автосамосвале.

2.2. Акустико-эмиссионный контроль металлоконструкций карьерного автосамосвала

Для проверки возможности проведения АЭ контроля на автосамосвале в производственных условиях была проведена серия испытаний по диагностике корпусов мотор-редукторов (РМК) на автосамосвале БелАЗ 75131 (рисунок 9),

грузоподъёмностью 130 т. В работе использовалась 8-ми канальная система АЭ контроля Vulcan (рисунок 10).



Рисунок 9. – Карьерный
автосамосвал
БелАЗ 75131



Рисунок 10. – Система АЭ контроля
Vulcan

Автосамосвал, предоставленный для диагностики, ранее уже был в аварии, связанной с разрушением корпусов РМК (рисунок 11), в результате которой пришлось восстанавливать картер заднего моста (рисунок 12) и установить новые корпуса РМК.



Рисунок 11. – Разрушенный корпус РМК



Рисунок 12. – Картер заднего моста после ремонта

Изначально были проведены исследования затухания акустического сигнала на корпусах РМК, которые показали, что для проведения АЭ диагностики необходимо установить на каждый корпус по 4-е преобразователя АЭ (рисунок 13). Для наглядности, рядом со схемой расположения АЭ преобразователей представлена фотография нового корпуса РМК (рисунок 14).

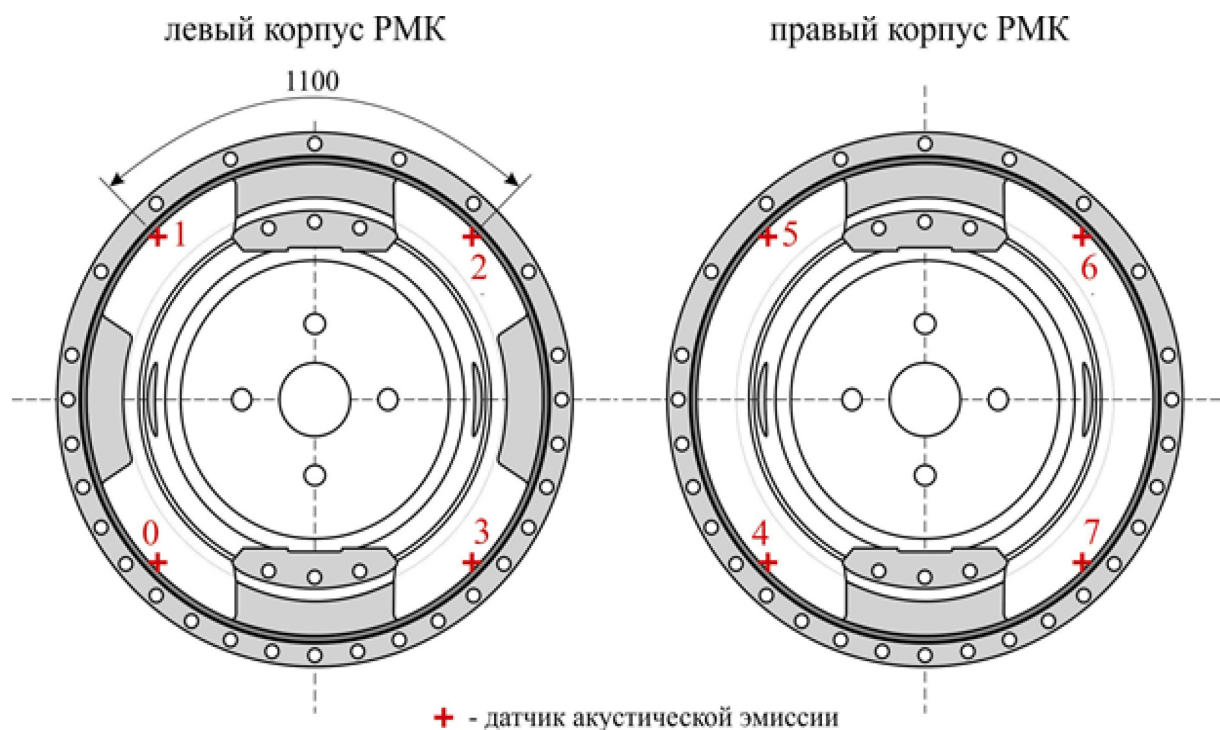


Рисунок 13. – Схема расположения АЭ преобразователей



Рисунок 14. – Корпус РМК

После установки датчиков был выполнен замер уровня шумов на неработающей машине (таблица 3), а также при движении автосамосвала (таблица 4).

Исходя из данных (таблица 4) был определён порог дискриминации сигналов АЭ на уровне 60 дБ и все дальнейшие исследования проводились при этом пороге.

Основным источником шумов, усложняющих проведение АЭ контроля, являются потоки выхлопных газов, протекающих по трубам и каналам кузова автомобиля. Выхлопные газы используются для обогрева днища кузова и в процессе работы, особенно при повышенных оборотах двигателя, отработанные газы с большой скоростью проходят через каналы кузова и создают акустический шум, затрудняющий проведение АЭ контроля. Поэтому для выполнения контроля в данных условиях необходимо применение высокочастотных датчиков акустической эмиссии.

Таблица 3. Уровень шумов
на неработающей машине

Amp	дат-0	дат-1	дат-2	дат-3	дат-4	дат-5	дат-6	дат-7
100	0	0	0	0	0	0	0	0
99	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0
-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	1	0	0	0	3
25	0	2	0	49	0	0	0	51
24	3	85	0	358	1	0	0	271
23	123	550	1	911	12	48	25	909
22	745	1169	52	1163	275	732	809	2104
21	1534	1015	889	949	1321	1603	1841	663
20	1636	1114	2996	609	2432	1658	1366	39
19	0	105	103	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 4. Уровень шумов
при движении автосамосвала

Amp	дат-0	дат-1	дат-2	дат-3	дат-4	дат-5	дат-6	дат-7
100	0	0	0	0	0	0	0	0
99	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	1	0	0	0	1
63	0	0	0	1	0	1	0	0
62	0	0	0	3	0	7	0	0
61	0	0	0	2	0	3	0	1
60	2	1	0	2	0	7	1	2
59	2	0	0	5	2	15	1	4
58	2	2	0	12	3	15	3	1
57	4	5	1	11	2	23	4	12
56	13	1	5	18	10	31	8	10
55	15	10	1	35	15	60	17	18
54	19	14	15	61	22	85	17	36
53	57	28	22	92	40	134	41	67
52	78	52	37	144	85	172	85	117
51	170	106	78	210	160	235	157	162
50	231	173	152	286	236	243	247	254
-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	6986	5735	6176	6103	6760	5752	6196	7165
22	6491	6874	6945	5159	6737	6966	7382	9331
21	8843	6855	7074	4436	8970	6999	8101	1558
20	5633	4716	6135	895	15146	3937	6105	812
19	0	32	1	0	2	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0

После проведения предварительных измерений, на БелАЗ была установлена 8-ми канальная система акустической эмиссии Vulcan 8SM. Системный блок располагался в кабине водителя, кабели до предварительных усилителей были проложены параллельно с кабелями питания мотор-колеса, датчики АЭ были установлены на магнитных держателях.

При проведении АЭ контроля на начальном этапе оператор присутствовал в кабине автосамосвала для настройки аппаратуры, а в дальнейшем АЭ контроль проводился без участия оператора в автоматическом режиме.

В результате проведённого АЭ испытания на левом корпусе РМК была обнаружена одна зона повышенной активности АЭ сигналов (Зона-1 на рисунке 15).

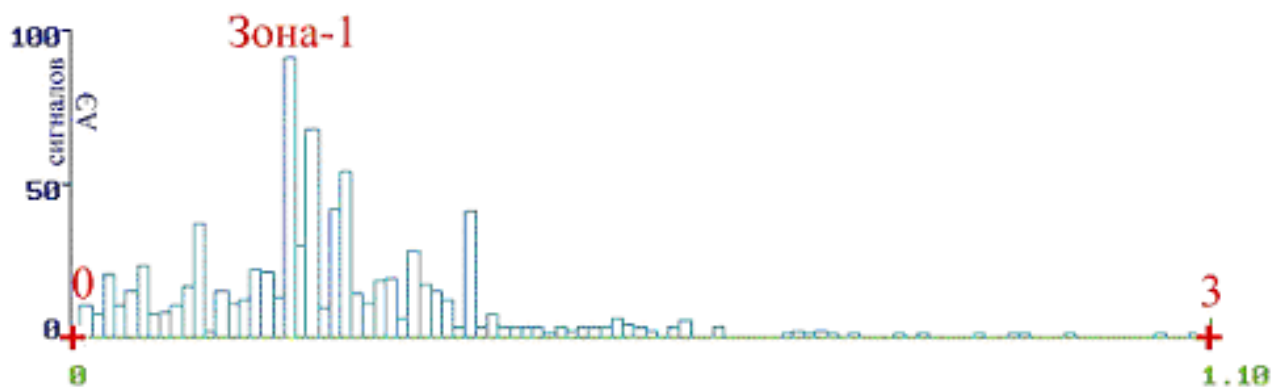


Рисунок 15. – График линейной локации левого корпуса РМК

Для того, чтобы более точно определить координаты дефектов левого корпуса РМК, были переустановлены датчики № 1 и 2 ближе к расположению Зоны-1 (рисунок 16), после чего был выполнен очередной АЭ контроль на работающей машине.

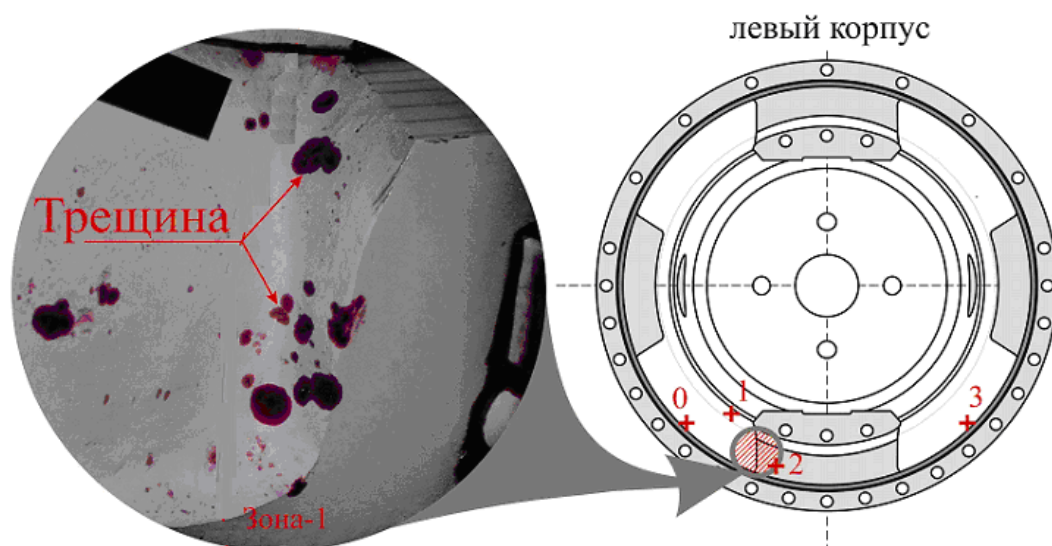


Рисунок 16. – Расположение дефектов на левом корпусе РМК

В результате этого испытания на плоскостной локационной картине (рисунок 17) было получено более точное расположение Зоны-1.

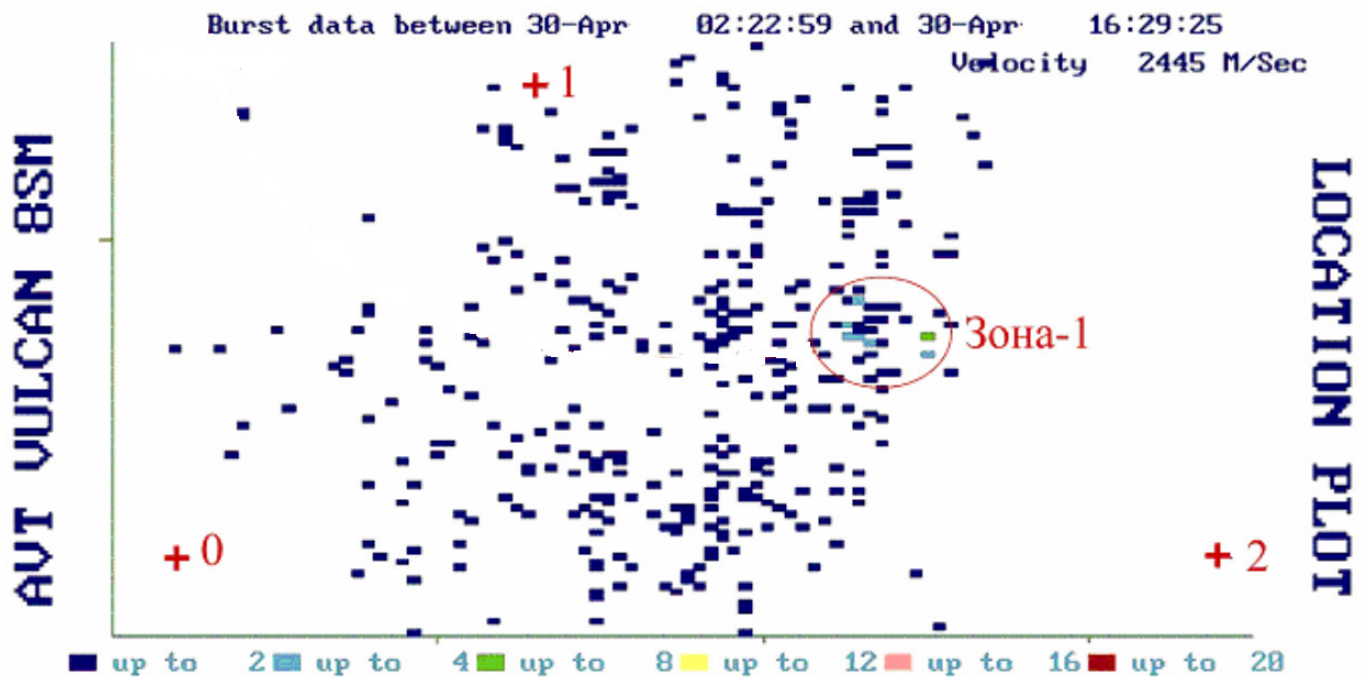


Рисунок 17. – График плоскостной локации левого корпуса РМК

Затем в месте расположения Зоны-1 был проведен визуальный осмотр и выполнена цветная дефектоскопия, которые показали наличие большого количества поверхностных дефектов литья. В течении года периодически проводился повторный АЭ контроль и данные, полученные на первом этапе контроля, каждый раз подтверждались. Обнаруженные дефекты развивались довольно медленно, поэтому ремонт был проведён в удобный для Заказчика период.

Левый корпус РМК был демонтирован (рисунок 18), произведена выборка (рисунок 19, рисунок 20) и заварка обнаруженных дефектов металлоконструкции.



Рисунок 18. – Демонтированный корпус РМК



Рисунок 19. – Поверхность корпуса РМК после выборки дефектов

Чтобы убедиться, что дефект выбран полностью, в ходе работы применялся капиллярный контроль (рисунок 20).

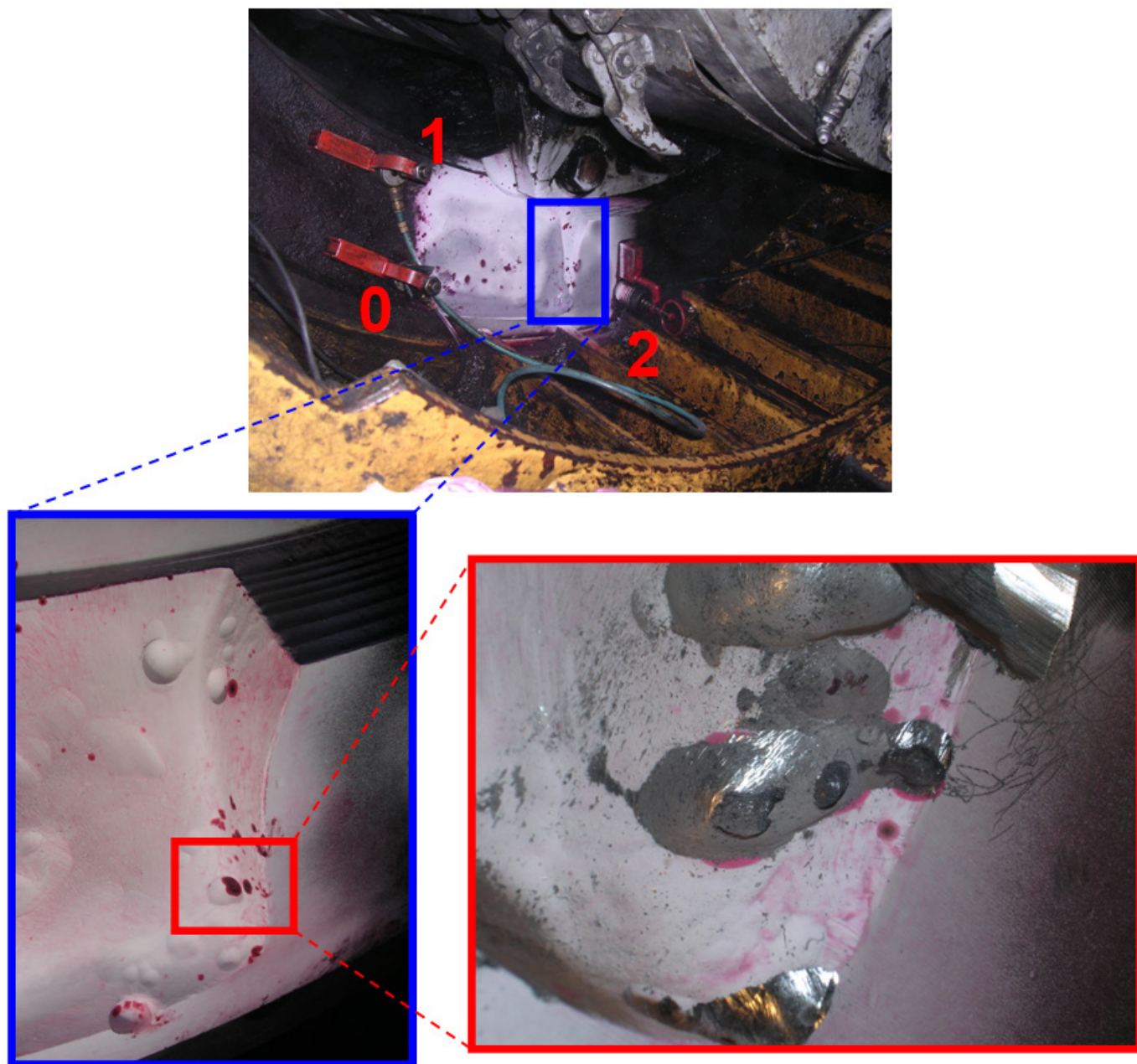


Рисунок 20. – Дефекты на левом корпусе РМК, обнаруженные при выборке

После проведённого ремонта был выполнен повторный проверочный АЭ контроль, при котором развивающихся дефектов обнаружено не было. Таким

образом, была подтверждена возможность выполнения АЭ диагностики корпусов РМК на автосамосвале на рабочем режиме, что позволило провести АЭ диагностику на работающем автосамосвале. Кроме автосамосвалов [101-104] и шагающих экскаваторов есть и другие примеры использования АЭ диагностики, например, на кранах [105], самолётах [106].

Однако подготовка к проведению АЭ контроля на карьерных автосамосвалах, при условии невмешательства в текущий производственный процесс предприятия, потребовала значительных временных затрат, поэтому разовый АЭ контроль металлоконструкций автосамосвала не нашёл широкого применения на производстве. С учётом этого, единственным, подходящим для данных условий, вариантом применения АЭ метода является постоянный мониторинг [107-119].

2.3. Выводы по главе 2

1. Выполнен анализ работ по механическим испытаниям образцов с использованием АЭ контроля, позволившим установить количественные оценки критерия живучести.

2. Оценки критерия живучести для испытанных образцов с АЭ контролем, характеризующие переход от этапа равномерного развития дефекта к ускоренному, показали, что его величина $K_{\text{жив}} < 4$.

3. Доказана возможность и целесообразность проведения диагностики несущих элементов металлоконструкции карьерного автосамосвала с использованием системы АЭ контроля Vulcan 8SM во время непосредственной работы автосамосвала в карьере.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА

3.1. Система акустико-эмиссионного мониторинга для диагностики металлоконструкций автосамосвалов

АЭ мониторинг позволяет в автоматическом режиме обнаруживать дефекты, отслеживать их развитие, оценивать живучесть элементов и передавать эти данные по сети интернет в соответствующие службы. Если имеется возможность наблюдать АЭ поведение объекта с самого начала в течение всего срока эксплуатации, то повышается возможность предотвратить разрушение и прогнозировать состояние объекта [120].

Наряду со всеми вышеуказанными преимуществами у АЭ мониторинга есть один существенный недостаток – это высокая стоимость оборудования. Высокая цена оборудования объясняется использованием высокопроизводительных аналого-цифровых процессоров на каждом канале, а также тем, что АЭ система – это узкоспециализированное оборудование, которое производят в относительно небольших объёмах.

В качестве компромиссного варианта было предложено разработать систему АЭ мониторинга на основе универсальной платы аналогового ввода L-502 (рисунок 21) компании L-CARD.

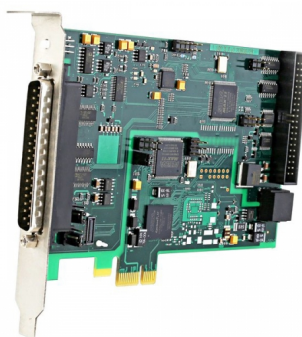


Рисунок 21. – Многофункциональная плата L-502 АЦП / ЦАП для шины PCIe

Техническое описание: L-502 - универсальная плата ввода / вывода аналоговых и цифровых сигналов в ПК через интерфейс PCI Express с возможностью их цифровой обработки в реальном времени. На плате установлен двухканальный 16-битный ЦАП с возможностью синхронного вывода с частотой до 1 МГц на каждый канал.

Переключение каналов АЦП при многоканальном режиме сбора данных - автоматическое, с произвольным порядком выборки канала, с заданным поддиапазоном измерения и коэффициентом усреднения отсчётов АЦП по каждому каналу.

Устанавливаемый в L-502-Р мощный сигнальный процессор Blackfin (ADSP-BF523), работающий на тактовой частоте 530 МГц с подключенной SDRAM 32 Мбайт, позволяет низкоуровневому программисту реализовать собственные алгоритмы, работающие в реальном времени и не зависящие от операционной системы.

Технические характеристики: АЦП: 16 бит; 16/32 каналов; $\pm 0,2$ В...10 В; 2 МГц ЦАП: 16 бит; 2 канала; ± 5 В; 1 МГц Цифровые входы/выходы: 18/16 TTL 5 В Интерфейс: PCI Express [121]. Более подробные характеристики указаны в *Приложении А*.

Подобные платы выпускаются большими партиями, имеют относительно низкую цену, ну и конечно, значительно меньшие возможности по сравнению с профессиональными. Однако этого вполне достаточно для выполнения задач АЭ мониторинга. На данный момент, уже есть примеры использования подобных плат для выполнения акустико-эмиссионной диагностики. Так в работах [122-124] для сбора АЭ данных применяются модули АЦП E20-10 и E-502, произведённые компанией L-CARD (г. Москва).

3.2. Технические характеристики разработанной системы акустико-эмиссионного мониторинга

В результате проведённого исследования, была собрана 4-х канальная система АЭ мониторинга (рисунок 22) с возможностью поочерёдной регистрации данных с каналов.



Рисунок 22. – Системы АЭ диагностики

Её основные технические характеристики представлены в таблице (таблица 5).

Таблица 5. Основные характеристики системы АЭ мониторинга

ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ	
Интерфейс передачи данных блоков сбора и обработки данных	Ethernet, Wi-Fi
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ	
Разрядность АЦП, бит	16
Максимальная частота преобразования АЦП, МГц	2
Номинальный диапазон рабочих частот, кГц	от 30 до 450
Уровень собственных пиковых шумов, приведенных ко входу измерительного канала (в диапазоне частот от 30 до 450 кГц), дБ	45
Максимальная измеряемая амплитуда импульса АЭ, дБ	100
Динамический диапазон измерения амплитуды импульса АЭ, дБ, не менее	55

Продолжение таблицы 5

Диапазон установки порога регистрации импульса АЭ, дБ	от 45 до 100
Минимальная измеряемая длительность импульса АЭ, мкс, не более	1
Максимальная измеряемая длительность импульса АЭ, мкс, не менее	65 000
Минимальное регистрируемое число выбросов в импульсе АЭ, шт.	1
Максимальное регистрируемое число выбросов в импульсе АЭ, шт., не менее	32000
Дискретность времени регистрации импульса АЭ, мкс	1
ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ	
Питание от сети переменного тока: - напряжение, В - частота, Гц	от 180 до 260 от 47 до 63
Питание от сети постоянного тока: - напряжение, В	от 20 до 28
Максимальная мощность, потребляемая от сети переменного тока, кВт, не более	0,15
УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ	
Рабочие условия измерений: - температура окружающего воздуха, °С	от +5 до +40

У разработанной системы есть определенные недостатки, ограничивающие её применение. Система разработана на основе платы аналогового ввода с одним АЦП, что позволило удешевить систему, однако привело к ограничениям на её использование:

- при регистрации сигнала АЭ с амплитудой порядка 100 дБ, на соседних каналах возникают помехи порядка 45 дБ, поэтому проведение испытания объектов возможно только при уровне порогов дискриминации сигнала не ниже указанного значения;

- систему можно использовать только на тех объектах, где испытание можно повторить многократно.

Также, на основе приобретённых пьезоэлектрических дисков (рисунок 23) автором были изготовлены преобразователи АЭ (рисунок 24).

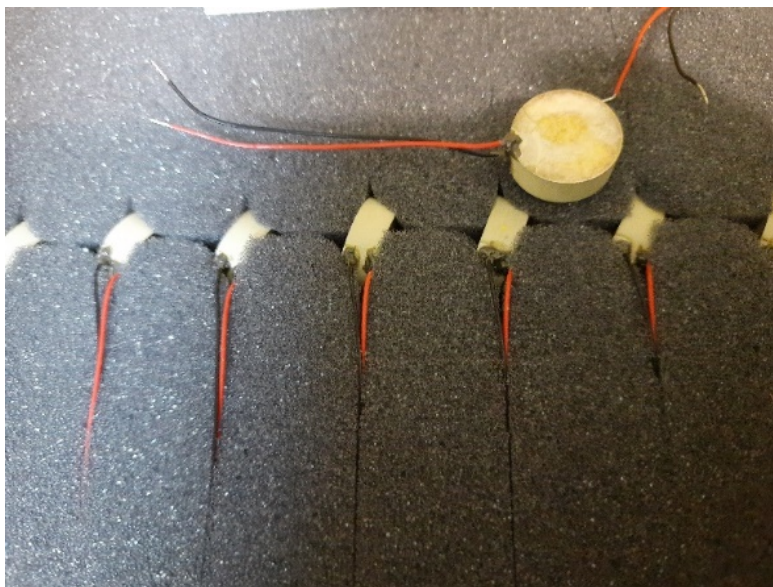


Рисунок 23. – Пьезоэлектрические диски



Рисунок 24. – Преобразователи акустической эмиссии

Для крепления датчиков и предварительных усилителей (коэффициент усиления 40 дБ) к раме автосамосвала также были изготовлены магнитные держатели (рисунок 25), в которых были использованы неодимовые магниты с характеристиками, указанными в таблице (таблица 6).



Рисунок 25. – Магнитные держатели для предусилителей и датчиков

Таблица 6. Характеристики магнитов

Габаритные размеры, Д×Ш×В, мм	40x20x10
Сила сцепления макс., Н	203.2
Сила сцепления на сдвиг макс., Н	101.6
Масса, г	59
Мин. рабочая температура, °С	-60
Макс. рабочая температура, °С	80
Срок размагничивания, прибл.	1% в 10 лет
Материал	Nd ₂ Fe ₁₄ B сплав неодима, железа и бора

Для увеличения силы сцепления магнитного держателя с рамой самосвала по обеим сторонам магнита были установлены металлические пластины (рисунок 25), толщиной 3 мм.

Пружины, используемые в магнитных держателях для прижатия датчиков, обеспечивают силу прижатия 15 Н. Учитывая, что собственная частота применяемых пружин (140 Гц) значительно ниже резонансной частоты используемых АЭ датчиков (200-450 кГц), её влиянием на результаты измерений можно пренебречь.

В итоге, появился инструмент, с помощью которого можно проводить исследования на автосамосвалах, чтобы скорректировать результаты, полученные на образцах в лабораторных условиях и перенести их на реальный объект.

3.3. Выводы по главе 3

1. Разработана 4-х канальная система АЭ мониторинга на основе универсальной платы аналогового ввода-вывода, с погрешностью измерений максимальной амплитуды АЭ сигнала, не превышающей $\pm 1-2$ дБ;
2. Разработаны датчики акустической эмиссии, необходимые для проведения диагностики на карьерном автосамосвале, с резонансной частотой 200 и 450 кГц.
3. Разработаны магнитные держатели (собственной частотой 140 Гц) для крепления датчиков и предварительных усилителей.

ГЛАВА 4. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОЙ СИСТЕМЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА

4.1. Программа проведения испытаний системы акустико-эмиссионного мониторинга участка рамы карьерного автосамосвала

В период с 10.2023г. по 12.2023г. была подготовлена программа проведения испытаний системы АЭ мониторинга участка рамы карьерного автосамосвала.

Цель программы: выполнить опытно-промышленную апробацию разработанной системы АЭ мониторинга.

Программа включает следующие мероприятия:

№ п/п	Мероприятия	Что делаем	Сроки	Ответственный
1.	Выбор автосамосвала	Выбрать из имеющегося парка машин наиболее близкий к списанию автосамосвал модели БелАЗ 75306 грузоподъемностью 220 т и путем визуально-измерительного контроля определить дефектный участок рамы, длиной ~3м, на котором в дальнейшем будет проводиться АЭ диагностика.	по 02.2024г.	соответствующая служба АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез»
2.	Монтаж оборудования	Произвести монтаж оборудования:		
		2.1. Монтаж оборудования проводится во время	по 03.2024г.	сотрудники ИУ ФИЦ УУХ СО РАН

		очередного технического обслуживания (ТО-3) автосамосвала, без вмешательства в текущий производственный процесс. На монтаж оборудования необходимо порядка 3-х часов.		
		2.2. Блок системы акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга располагается в кабине водителя.	по 03.2024г.	сотрудники ИУ ФИЦ УУХ СО РАН
		2.3. Для подключения системы АЭ мониторинга к питанию необходимо провести розетку 24В от аккумулятора в кабину водителя. Потребляемая мощность системы АЭ мониторинга составляет 150 Вт.	по 03.2024г.	соответствующая служба АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез»
		2.4. Прокладка коаксиальных радиочастотных кабелей к выбранному участку рамы осуществляется с использованием магнитных держателей.	по 03.2024г.	сотрудники ИУ ФИЦ УУХ СО РАН
		2.5. Установка	по	сотрудники ИУ

		предварительных усилителей и датчиков на исследуемом участке рамы также выполняется с помощью магнитных держателей.	03.2024г.	ФИЦ УУХ СО РАН
3.	Замер уровня шумов	Провести замер уровня шумов от работы двигателя после установки и проверки работоспособности системы АЭ мониторинга на территории автобазы. Для этого необходимо завести автосамосвал на 2-3 минуты.	по 03.2024г.	сотрудники ИУ ФИЦ УУХ СО РАН
4.	АЭ мониторинг	Произвести акустико-эмиссионный мониторинг во время работы автосамосвала в карьере, при этом датчики регистрируют сигналы АЭ, излучаемые при росте дефектов, информация записывается и в последующем анализируется.	по 04.2024г.	сотрудники ИУ ФИЦ УУХ СО РАН
5.	Проверка исправности системы АЭ мониторинга	Проверить исправность работы системы АЭ мониторинга во время последующего технического обслуживания. Эта	по 05.2024г.	сотрудники ИУ ФИЦ УУХ СО РАН

		процедура занимает порядка 30 минут.		
--	--	--------------------------------------	--	--

Условия проведения АЭ мониторинга:

- для определения участков дорог, на которых происходит разрушение рамы, а также для определения других параметров эксплуатации, влияющих на скорость развития дефектов, сотрудникам Института угля ФИУ УУХ СО РАН необходимо получить доступ к информации из системы диспетчеризации по обследуемой машине (GPS координаты, время загрузки, время выгрузки и др. показатели).

4.2. Методика проведения акустико-эмиссионного мониторинга несущих элементов металлоконструкций карьерного автосамосвала

Для проведения диагностики с использованием системы акустико-эмиссионного мониторинга автором разработана методика (рисунок 26):



Рисунок 26. – Методика проведения АЭ мониторинга

Установка системы АЭ мониторинга.

Для подключения системы АЭ мониторинга к питанию необходимо проложить двужильный кабель с розеткой, длиной 12 м и сечением 2.5 мм², от аккумулятора автосамосвала в кабину водителя. Кабель питания необходимо прокладывать в защитной металлической гофре с изоляцией в негорючем исполнении. Прибор для АЭ мониторинга устанавливается в кабине водителя, питание прибора осуществляется от аккумуляторной батареи автосамосвала напряжением сети 24В.

С помощью коаксиальных кабелей типа РК-50, соединяются соответственно прибор с предварительными усилителями (ПУ) и далее ПУ с датчиками. Кабели прокладываются в защитной металлической гофре с изоляцией в негорючем исполнении, отдельно от силовых кабелей автосамосвала для уменьшения воздействия электромагнитных помех.

Разъёмы коаксиальных кабелей должны обеспечивать надёжный контакт, иначе при движении машины колебания в разъёмах будут приводить к возникновению ложных сигналов от подвижных контактов.

На раму автосамосвала с помощью магнитных держателей необходимо установить 3-и датчика АЭ и 3-и предварительных усилителя. Необходимо, по возможности, устанавливать датчики вдоль одной линии и на одинаковом расстоянии друг от друга, потому что в дальнейшем при определении координат дефектов будет применяться линейный тип локации. Плоскостной тип локации источников АЭ может применяться для уточнения месторасположения дефектов, для чего на дефектном участке потребуется установка дополнительных датчиков.

Для установки датчиков требуется выполнить зачистку небольших участков поверхности (диаметром ~ 40 мм) до чистоты не менее Rz40. Датчики АЭ можно размещать на относительно небольшом расстоянии не более 1.8м друг от друга на раме и корпусах РМК, в связи с высоким уровнем шума от потока выхлопных газов, протекающих по трубам и каналам кузова автомобиля, который влияет на

проведение АЭ мониторинга. Кроме этого, в связи с отсутствием заземления, проведению диагностики препятствует высокий уровень электрических помех.

Система мониторинга должна выполнять функцию сбора данных на протяжении всего срока эксплуатации машины, поэтому датчики желательно приклеивать к металлоконструкции автосамосвала с использованием эпоксидного компаунда. Для защиты датчиков от внешних воздействий необходимо предусмотреть установку защитных экранов.

Установку предварительных усилителей необходимо осуществлять таким образом, чтобы вибрационная нагрузка не передавалась с металлоконструкций автосамосвала на корпуса предусилителей, так как это может привести к выходу из строя элементов платы ПУ. По этой же причине на автосамосвале нецелесообразно применение интегральных датчиков со встроенными предусилителями, да и возможности применения такого типа датчиков при низких температурах значительно ограничены.

Согласно техническим условиям, температурный диапазон эксплуатации автосамосвалов составляет от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$. Естественно, что датчики, ПУ и коаксиальные кабели, применяемые для АЭ мониторинга, должны быть рассчитаны на использование при указанных температурах. Датчики АЭ вполне могут выдерживать низкие температуры эксплуатации, а предварительные усилители, выпускающиеся на данный момент на рынке, в основном имеют нижнюю границу эксплуатации до -40°C , поэтому они потребуют небольшой доработки (дополнительной теплоизоляции или прокладки вдоль линии греющего саморегулирующегося кабеля).

Калибровка датчиков.

После установки датчиков выполняется проверка их чувствительности, которая должна находиться в диапазоне ± 3 дБ, то есть чувствительность датчиков не должна отличаться более чем в два раза. В качестве источника сигнала можно

использовать излом графитового стержня цангового карандаша (источник Су-Нильсена), с диаметром стержня 0,5 мм и твердостью 2Н.

Замер уровня шумов.

Замер уровня шумов необходимо проводить:

- на незаведённой машине, для проверки целостности кабельных линий и определения уровня электромагнитных помех в отсутствии заземления;
- на холостом ходу, для оценки уровня шума от работы двигателя;
- непосредственно во время работы машины в карьере.

Уровень шума на разных участках дороги значительно отличается. Шум достигает наибольшего уровня при движении загруженного автосамосвала в гору, так как при этом машина двигается на максимальных оборотах двигателя (дизель-генератора).

Проведение мониторинга.

За установку, настройку оборудования и обработку результатов АЭ мониторинга отвечают специалисты по АЭ контролю. Проведение мониторинга должно осуществляться в автоматическом режиме, а собранные данные передаваться на диспетчерский пункт, где они будут аккумулироваться и обрабатываться. Доступ к информации должны иметь как специалисты по АЭ контролю, так и инженерно-технические работники (ИТР) предприятия, ответственные за безопасную эксплуатацию оборудования.

ИТР с помощью специалистов по АЭ контролю должны постепенно научиться использовать результаты АЭ контроля в своей ежедневной работе, чтобы на их основе своевременно принимать решения, направленные на обеспечение содержания автосамосвалов в исправном техническом состоянии и создание безопасных условий работы.

Необходимо отметить, что акустико-эмиссионный мониторинг на автосамосвале можно использовать не только для обнаружения развивающихся дефектов. Правильно настроенная система является очень чувствительным

инструментом, с помощью которого, можно вовремя «услышать» возросший уровень шума от работы неисправного агрегата или механизма. АЭ оборудование способно регистрировать не только рост трещин или развитие пластической деформации, но и процессы затвердевания, кристаллизации, трения, ударов, течеобразования и фазовых переходов.

Осмотр зон повышенной активности АЭ сигналов.

При обнаружении зон повышенной активности АЭ сигналов, необходимо во время очередного ТО провести визуальный осмотр предполагаемого дефектного участка. При обнаружении дефекта и одновременном условии, что его интенсивность АЭ сигналов соответствует этапу ускоренного роста дефектов, необходимо проводить внеплановый ремонт.

Перед проведением ремонта необходимо осуществлять выборку дефектов и при необходимости подключать капиллярный контроль, чтобы удостовериться в полном устранении дефекта. Ремонт, проведённый с нарушением технологии сварки, сокращает срок эксплуатации автосамосвала. По окончании ремонтных работ необходима оценка проведённого ремонта с использованием системы АЭ контроля в условиях эксплуатации.

4.3. Диагностика участка рамы и описание обнаруженных дефектов

Опытно-промышленная апробация разработанной системы АЭ мониторинга была проведена в условиях филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез», в ходе которой выполнялась диагностика участка рамы карьерного автосамосвала БелАЗ 75306, грузоподъёмностью 220 т (рисунок 27).



Рисунок 27. – Карьерный автосамосвал БелАЗ 75306

С учетом высокой стоимости простоев карьерного автосамосвала, необходимо было организовать работу по установке оборудования таким образом, чтобы не оказывать влияния на текущий производственный процесс. Поэтому все работы по установке оборудования для АЭ мониторинга, а также работы по осмотру обнаруженных дефектов проводились во время очередного технического обслуживания (ТО). В кабине водителя был расположен системный блок (рисунок 28), от которого были проложены коаксиальные кабели к предварительным усилителям и датчикам.



Рисунок 28. – Система АЭ мониторинга

Предварительные усилители (ПУ) и датчики устанавливались на раму при помощи магнитных держателей, которые защищали их от внешнего воздействия. Во время движения самосвала нередко из-под колёс вылетают куски грязи, которые могут повредить датчики и ПУ, поэтому такая защита необходима. Кроме этого, в конструкции магнитных держателей предварительных усилителей использовались пружины для защиты предусилителей от вибрации (рисунок 25). При первых экспериментах часть предварительных усилителей вышла из строя из-за того, что предусилители были жестко закреплены на магниты и места пайки некоторых элементов на плате ПУ ослабли.

Диагностика проводилась в несколько этапов.

На первом этапе необходимо было проверить возможность работы, собранной АЭ системы мониторинга, в производственных условиях, поэтому

необходимо было при осмотре обнаружить дефект и установить рядом с ним датчики акустической эмиссии. Такой дефект был обнаружен в сварном шве приварки опоры двигателя к внутреннему листу лонжерона рамы (рисунок 29).



Рисунок 29. – Трещина в сварном шве

Рядом с дефектом были установлены два датчика АЭ на расстоянии 850 мм друг от друга (рисунок 30, рисунок 31).

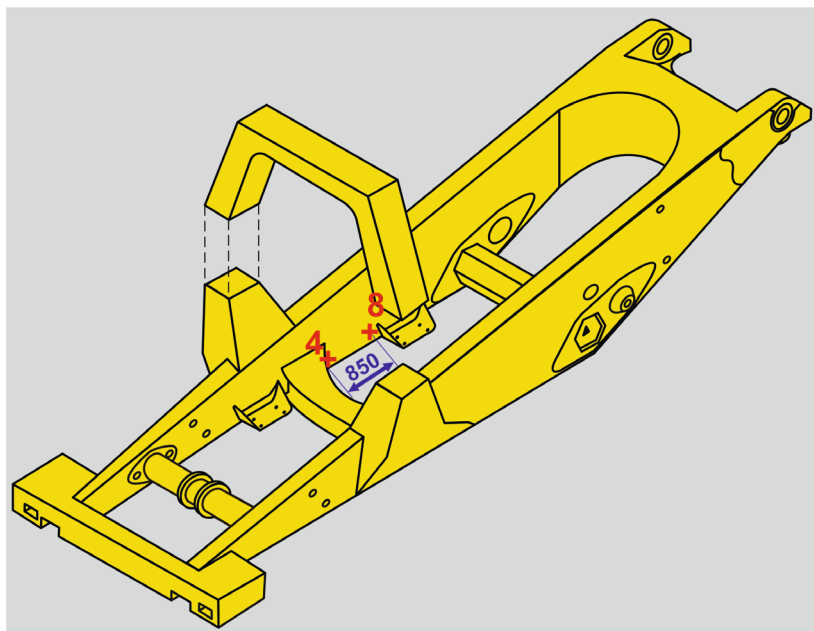


Рисунок 30. – Схема установки датчиков



Рисунок 31. – Фото установленных на раме датчиков № 4 и 8

В результате АЭ диагностики дефект был подтверждён. Сбор АЭ данных осуществлялся в течении 4-х часов во время непосредственной работы автосамосвала в карьере. На локационном графике данный дефект выглядит следующим образом (рисунок 32).

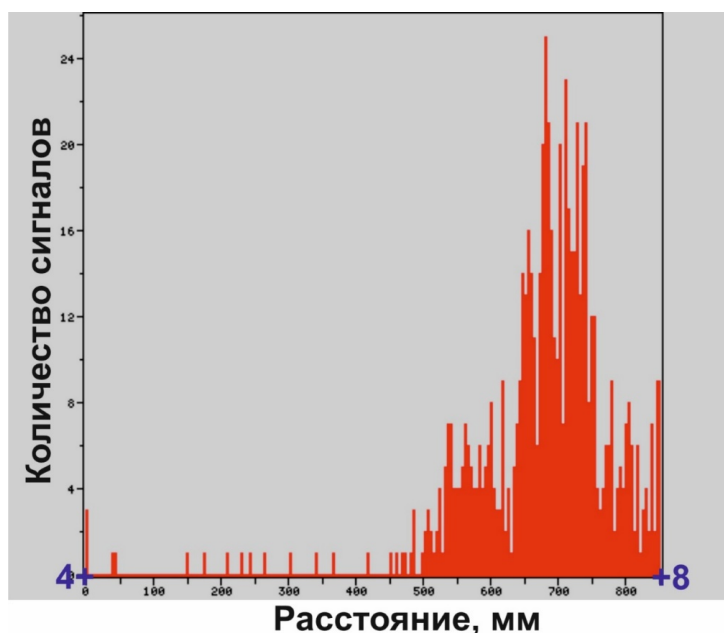


Рисунок 32. – Локационный график

При проведении очередного ремонта дефект был устранён.

На втором этапе, в связи с тем, что на датчике № 4 также были зафиксированы высокоамплитудные сигналы, было решено увеличить количество датчиков АЭ до 3-х и расширить зону диагностики. При этом изменилась нумерация датчиков, а схема расстановки стала выглядеть следующим образом (рисунок 33, рисунок 34, рисунок 35).

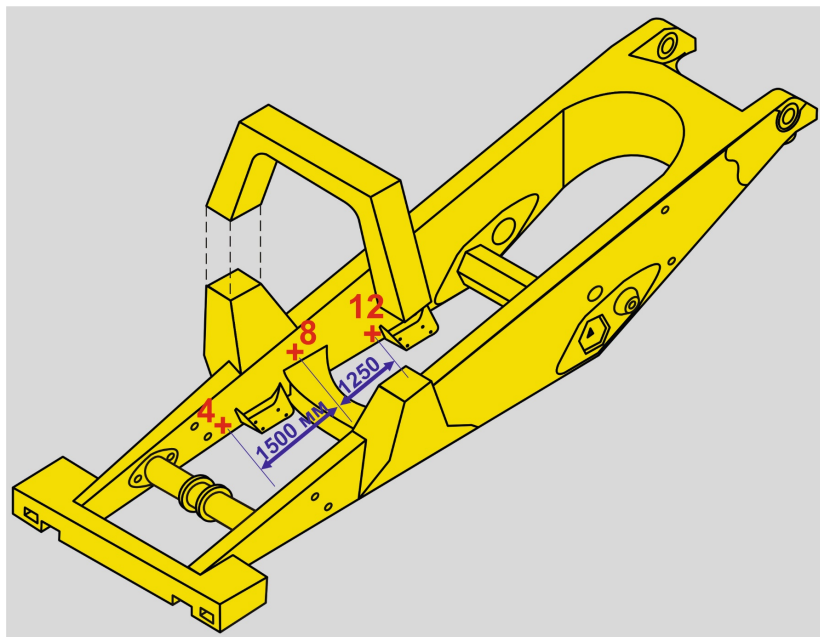


Рисунок 33. – Схема установки АЭ датчиков на раме автосамосвала



Рисунок 34. – Фото установленных на раме датчиков № 4 и 8

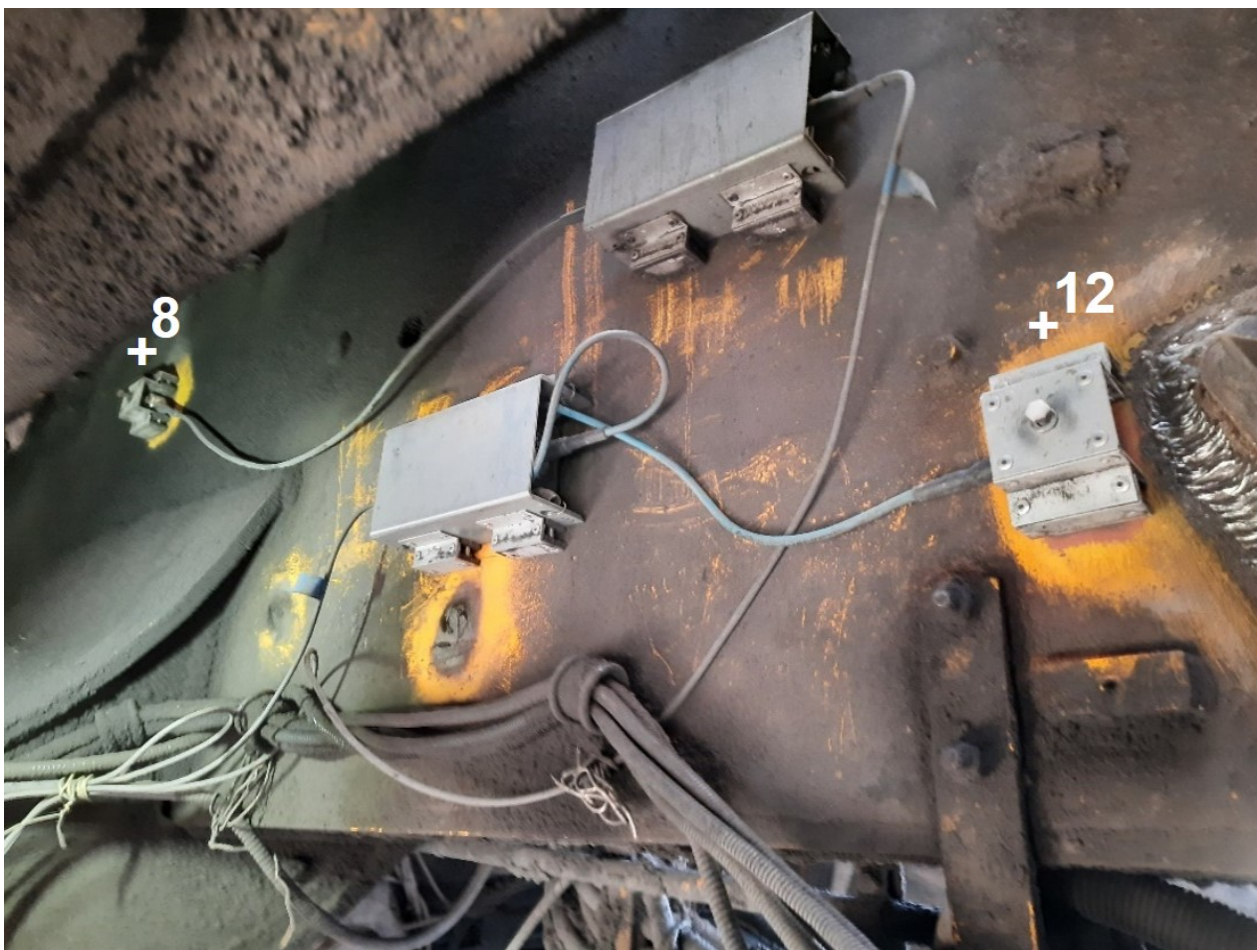


Рисунок 35. – Фото установленных на раме датчиков № 8 и 12

В результате мониторинга, проводимого в течении 20 дней, в том же сварном шве (рисунок 29) была обнаружена не заваренная при прошедшем ремонте трещина. На локационном графике она выглядит следующим образом (рисунок 36).

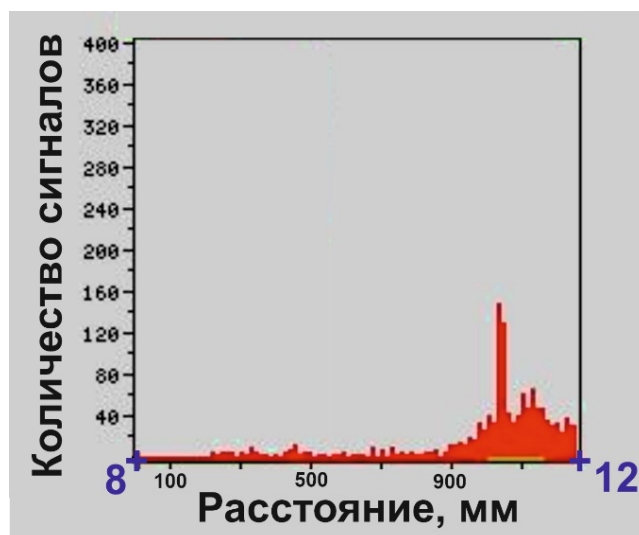


Рисунок 36. – Локационный график

Расположение дефекта относительно датчиков АЭ представлено на рисунке 37.

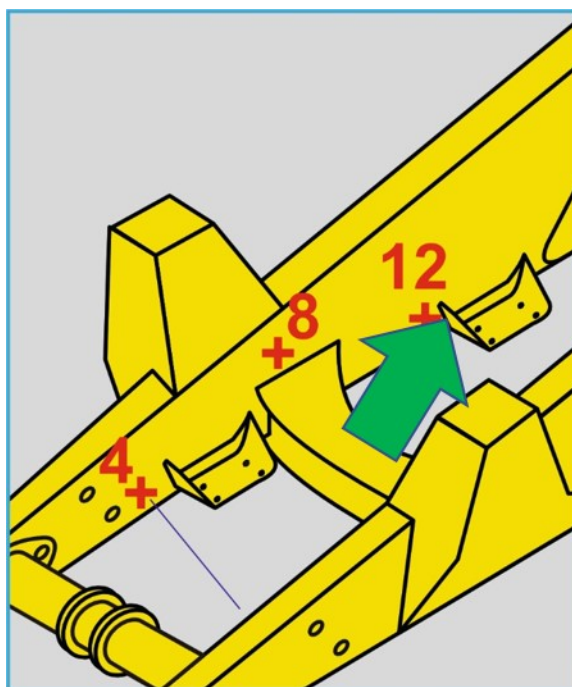


Рисунок 37. – Месторасположение трещины

Длина трещины в верхней части сварного шва составила 18 мм (рисунок 38).

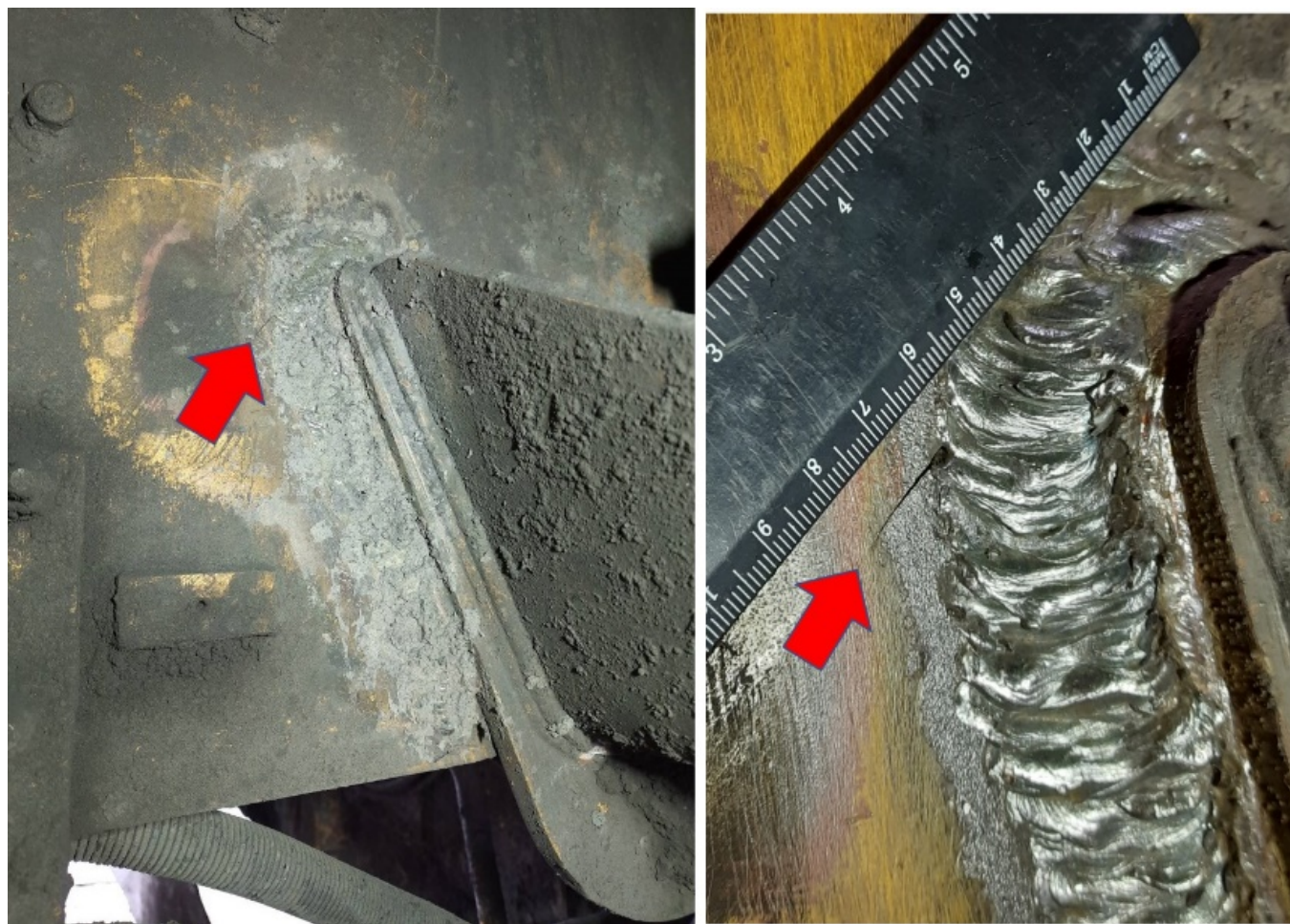


Рисунок 38. – Не заваренная трещина в раме

При повторном ремонте трещину заварили полностью, однако этот ремонт привёл к возникновению ещё одного дефекта, уже в нижней части сварного шва приварки опоры двигателя к раме. Новая трещина образовалась вдоль сварного шва соединения бокового (внутреннего) и нижнего листа лонжерона рамы. За полгода эксплуатации дефект вырос до размера 535 мм (рисунок 39), АЭ контроль за это время не проводился.



Рисунок 39. – Трещина в раме

Как видно из рисунка 40, трещина берёт начало с места предыдущих ремонтных работ. Связано это с тем, что в ходе последнего ремонта произошло пересечение ремонтного сварного шва со швом, соединяющим листы лонжерона, в результате чего появился дополнительный концентратор напряжений. Обычно очаг разрушения находится в зоне термического влияния сварного шва [125].



Рисунок 40. – Начало трещины в сварном шве приварки опоры двигателя

Так же на автосамосвалах большой грузоподъемности [72], особенно в конце срока эксплуатации, развитие дефектов в несущих металлоконструкциях происходит довольно быстро и трудно поддается прогнозированию. Таким образом, АЭ мониторинг позволяет оценивать качество проведенного ремонта и продлить срок службы самосвала. Диагностика в режиме онлайн мониторинга необходима для обнаружения отклонений режимов эксплуатации самосвала, которые влияют на скорость развития дефектов.

Для получения качественного сварного соединения при ремонте большое значение имеет квалификация ремонтного персонала, качество используемых электродов и подготовка поверхностей под сварку. Перед проверкой технического состояния рамы самосвал необходимо промыть водой или паром под высоким давлением, установить на хорошо освещенную площадку. Это делается не всегда, поэтому обеспечит качественный осмотр и поиск возможных повреждений.

Кроме этого, на раме был обнаружен ещё один дефектный участок. В результате проведенного АЭ мониторинга во время работы автосамосвала в карьере, на раме, рядом с датчиком № 8, были обнаружены дефекты. Данные с автосамосвала круглосуточно передавались по сети интернет с использованием мобильного usb-модема. Ниже представлен локационный график (рисунок 41), полученный за сутки проведения мониторинга и фотографии дефектов (рисунок 42, рисунок 43, рисунок 44).

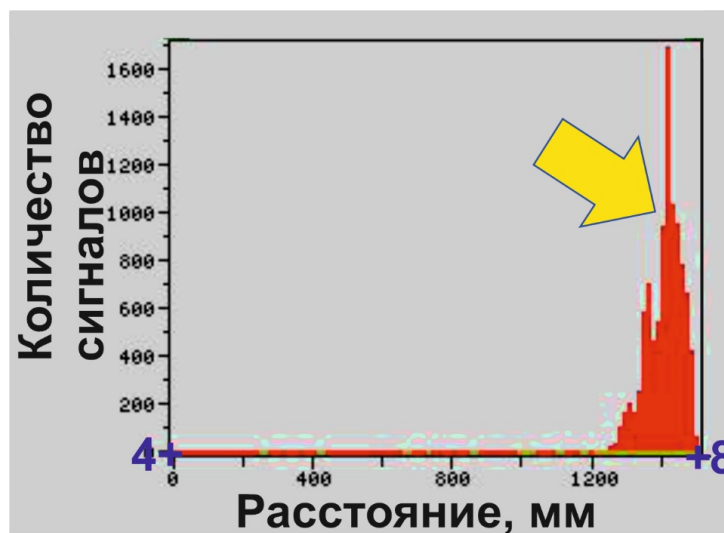


Рисунок 41. – Локационный график (датчики № 4 и 8)

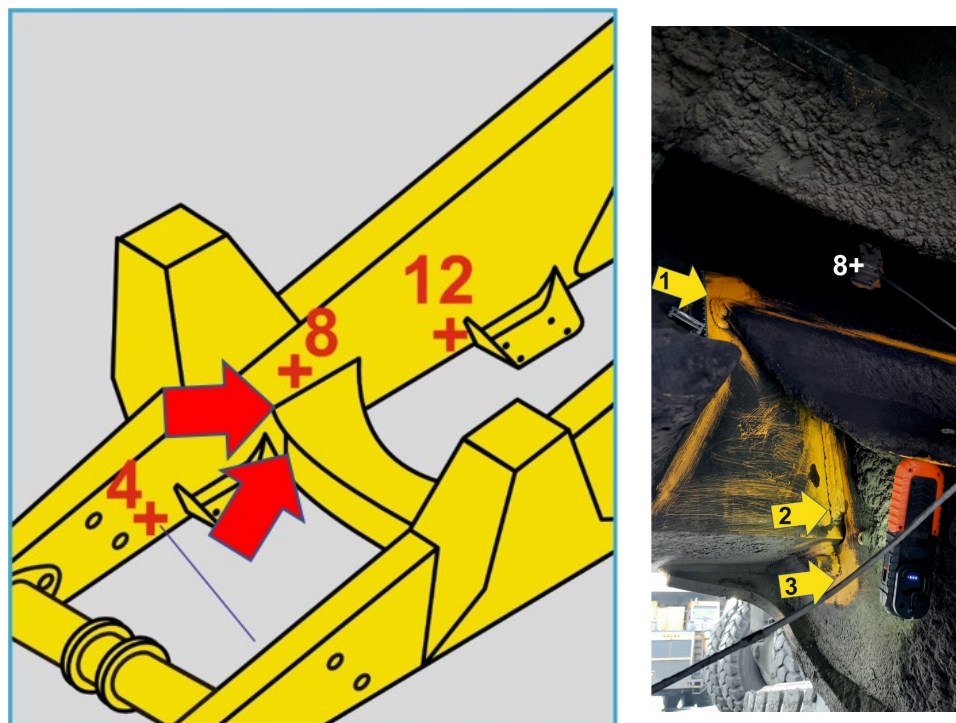


Рисунок 42. – Дефекты у датчика №8



Рисунок 43. – Дефекты рамы, в районе 2-ой перемычки (датчик № 8)

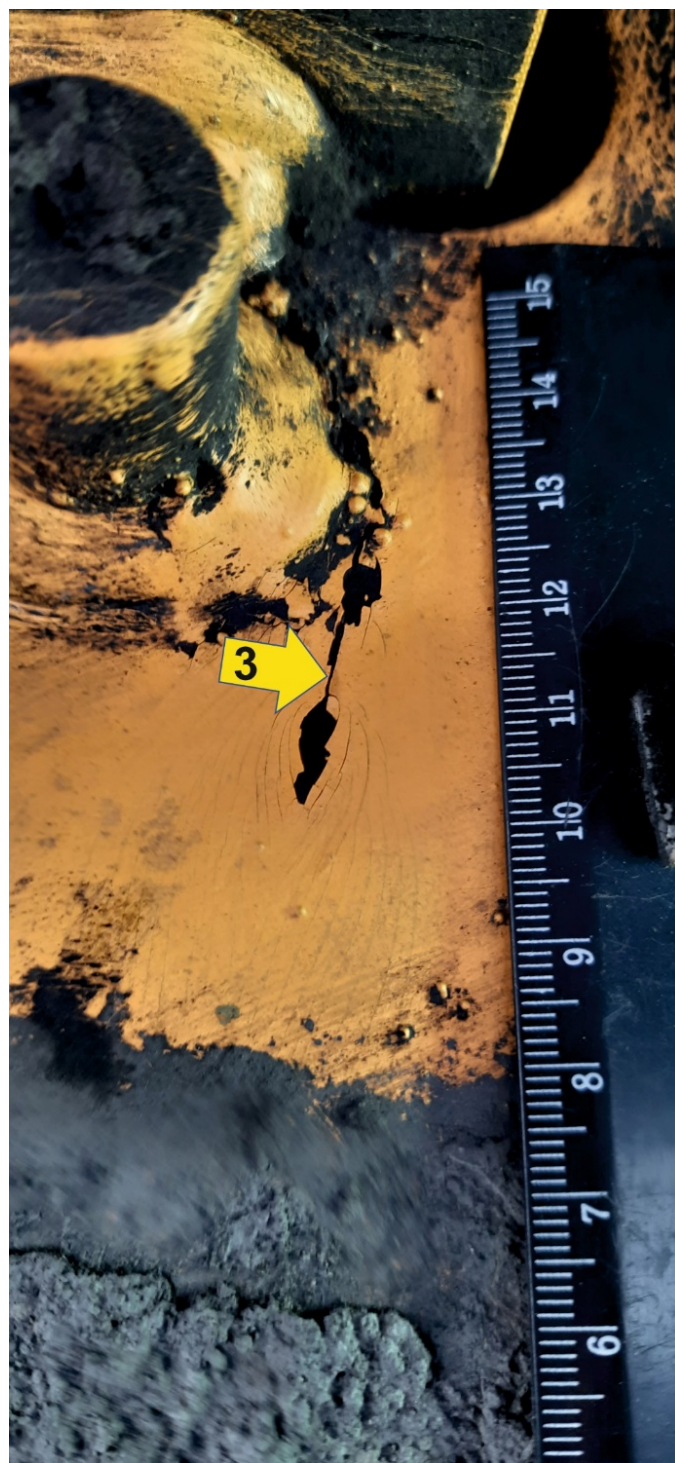


Рисунок 44. – Дефекты рамы, в районе 2-ой перемычки (датчик № 8)

У датчика № 8 одна из трещин достигла критической величины, что потребовало незамедлительного ремонта. Как видно из фотографий (рисунок 43, рисунок 44), размер трещин составлял около 140 мм. Данные дефекты появились в

результате нескольких лет развития. Видно, что никаких ремонтных работ прежде на этом участке не проводилось. Дефекты остались незамеченными по причине труднодоступности данного участка рамы для осмотра. В момент осмотра передняя ось была демонтирована (рисунок 45) из-за серьёзных повреждений и ожидалась её замена.



Рисунок 45. – Автосамосвал с демонтированной передней осью

Балка передней оси препятствовала нормальному доступу к месту, поэтому на данном участке рамы возникают сложности с осмотром. Обнаруженные дефекты у датчика №8 в дальнейшем были устранены (рисунок 46).

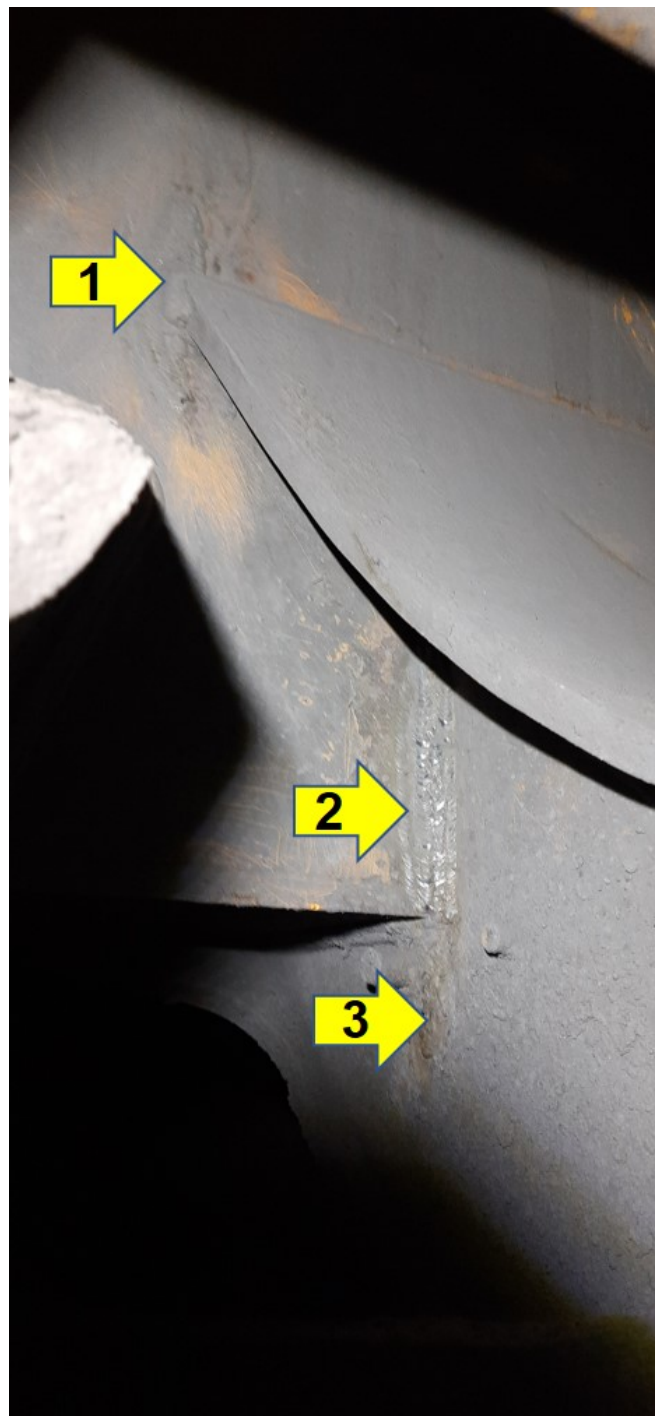


Рисунок 46. – Отремонтированный участок рамы у датчика №8

4.4. Корректировка критериев живучести по параметрам сигналов акустической эмиссии

Собранные данные за 20 дней мониторинга позволили построить следующий график интенсивности сигналов АЭ (рисунок 47):



Рисунок 47. – Интенсивность АЭ сигналов за месяц (датчики № 8 и 12)

Для оценки полученных данных необходимо воспользоваться результатами, полученными при лабораторных механических испытаниях с АЭ контролем (рисунок 7), в которых было установлено, что интенсивность сигналов АЭ на критической стадии развития дефекта в 4 и более раз выше, чем при стабильном его развитии.

Учитывая, что среднее значение интенсивности АЭ сигналов у 8-го (232 имп.) и 12-го (26 имп.) датчиков отличается в 8,9 раз, можно сделать вывод о том, что интенсивность сигналов АЭ у датчика № 8 соответствует критической стадии

развития дефекта. Таким образом установлено, что трещина у датчика 8 достигла критической величины (140 мм) и требует незамедлительного ремонта.

Таким образом, применяя критерий живучести можно в режиме онлайн мониторинга оценивать техническое состояние металлоконструкций автосамосвала и в зависимости от него, проводить соответствующие управленческие мероприятия (рисунок 48).



Рисунок 48. – Оценка технического состояния по критерию живучести

С помощью АЭ мониторинга можно обнаруживать трещины на начальных стадиях образования и определять скорость их роста. А к наиболее интенсивно развивающимся дефектам применять метод «остановочного сверления», описанный в руководстве по ремонту карьерного самосвала БелАЗ-75306, чтобы в результате уменьшить повреждения на интервалах между плановыми ремонтами.

4.5. Факторы эксплуатации, влияющие на развитие дефектов

Вопросами изучения особенностей горных условий эксплуатации карьерного транспорта занимались такие ученые и исследователи, как С.А. Арефьев [126], Б.У. Бусел [127], Г.Д. Буялич [128], С.С. Сайдуллозода [129], Ю.Н. Барышников [130], Д.А. Клебанов [131], А.С. Фурман [132], А.Ю. Воронов [133], С.Н. Найден [134], С.А. Испеньков и А.А. Ракицкий [135], Т.В. Астахова [2, 136], С.В. Доронин [137], С.В. Доронин и Т.В. Донцова [138], В.В. Москвичев [139], И.А. Паначев и И.В. Кузнецов [140], А.А. Хорешок [141-142] и многие другие.

Более подробно рассмотрим факторы, наиболее влияющие на зарождение и развитие дефектов несущей рамы карьерного автосамосвала, которые можно выявить с помощью АЭ мониторинга.

К ним относятся:

- качество дорог;
- навык вождения автосамосвала водителем;
- температурный режим эксплуатации.

Качество дорог. Качество технологических дорог в карьерах оказывает существенное влияние на технико-экономические показатели работы автотранспорта и безопасность эксплуатации автосамосвалов. Установлено, что плохое состояние технологических дорог существенно снижает производительность автосамосвалов и срок службы их основных узлов и агрегатов.

При движении по некачественным дорогам автосамосвалы, особенно их неподрессоренные части, испытывают значительные динамические нагрузки, обуславливающие их интенсивный износ. В тоже время от колес передаются динамические нагрузки на поверхности дороги, увеличивая размер и интенсивность неровностей [41].

В доказательство этого утверждения можно привести данные, полученные при АЭ мониторинге при движении автосамосвала по дорогам в условиях филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез».

В процессе сбора данных были выявлены участки дорог, на которых в основном и происходит развитие дефектов. Регистрация акустических шумов от работы самосвала, одновременно с регистрацией сигналов АЭ от дефектов позволила сопоставить время регистрации сигналов АЭ от развивающихся дефектов с режимом работы автосамосвала. В результате был получен график (рисунок 49), на котором показаны данные по шумам и сигналам АЭ за 1 час работы автосамосвала, из которых следует, что наиболее интенсивный рост дефектов происходит на участках, имеющих повреждения дорожного покрытия, в основном на подъезде к отвалу и к месту погрузки.

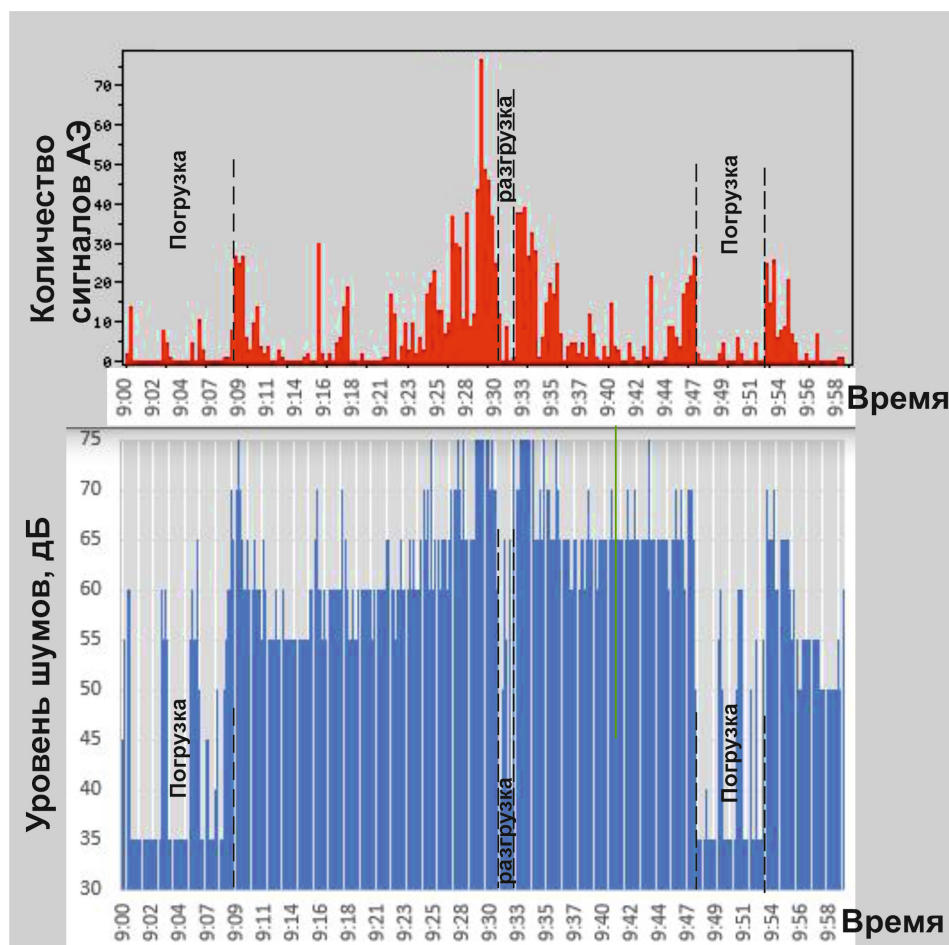


Рисунок 49. – Интенсивность АЭ сигналов и уровень шумов за 1 час работы самосвала

Навык вождения автосамосвала водителем. Одной из немаловажных причин снижения ресурса автомобиля являются слабые навыки вождения некоторых водителей. Грамотно подготовленный водитель не допускает эксплуатации неисправного самосвала, следить за его техническим состоянием, что в итоге положительно влияет как на безопасность дорожного движения, так и на ресурс автомобиля.

Благодаря проведению АЭ мониторинга, удалось сравнить влияние навыков вождения разных водителей на скорость развития дефектов в раме автосамосвала.

Из графика (рисунок 50), показывающего зависимость количества сигналов АЭ от времени, следует, что при работе автосамосвала в течении суток рост дефектов происходит неравномерно. Анализ результатов позволяет отследить и влияние навыков вождения водителя, так, например, у водителя, работающего в первую смену, уровень навыков вождения оказался ниже, чем у водителя второй смены, потому что при одинаковом числе рейсов, интенсивность сигналов АЭ от дефектов, регистрируемых в первую смену, практически в два раза больше.

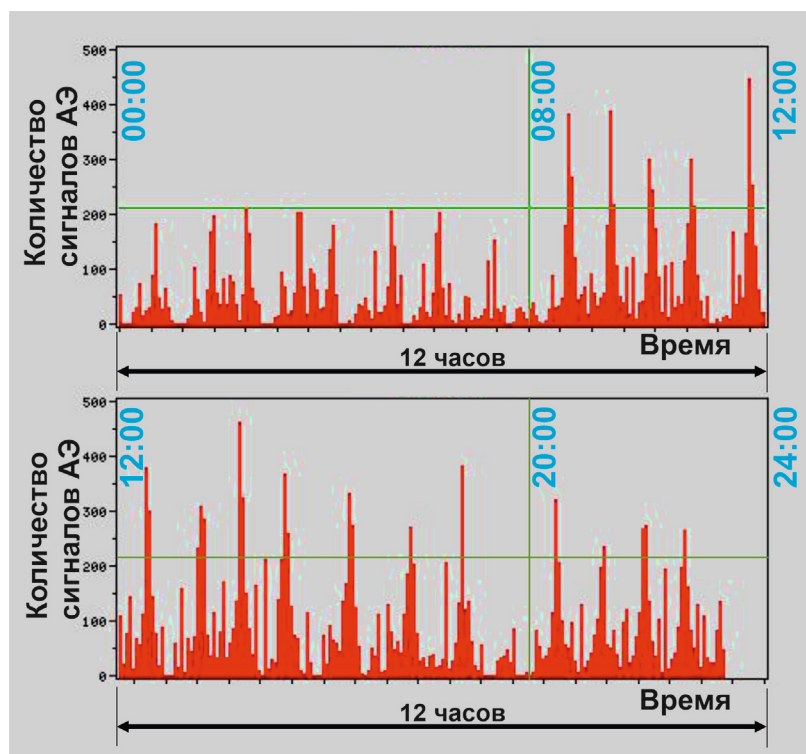


Рисунок 50. – Интенсивность АЭ сигналов за сутки (датчик № 8)

Температурный режим эксплуатации.

В условиях холодного климата вопросы эксплуатации и ремонта карьерной техники приобретают особую актуальность, особенно в зимнее время. В зимние месяцы эксплуатация карьерных автосамосвалов при температурах воздуха (до -40°C) приводит к увеличению количества ремонтов и, соответственно, продолжительности и трудоемкости внеплановых ремонтов техники.

Сопоставив температуру окружающего воздуха с интенсивностью сигналов АЭ, излучаемых развивающимися дефектами, был построен график (рисунок 51):

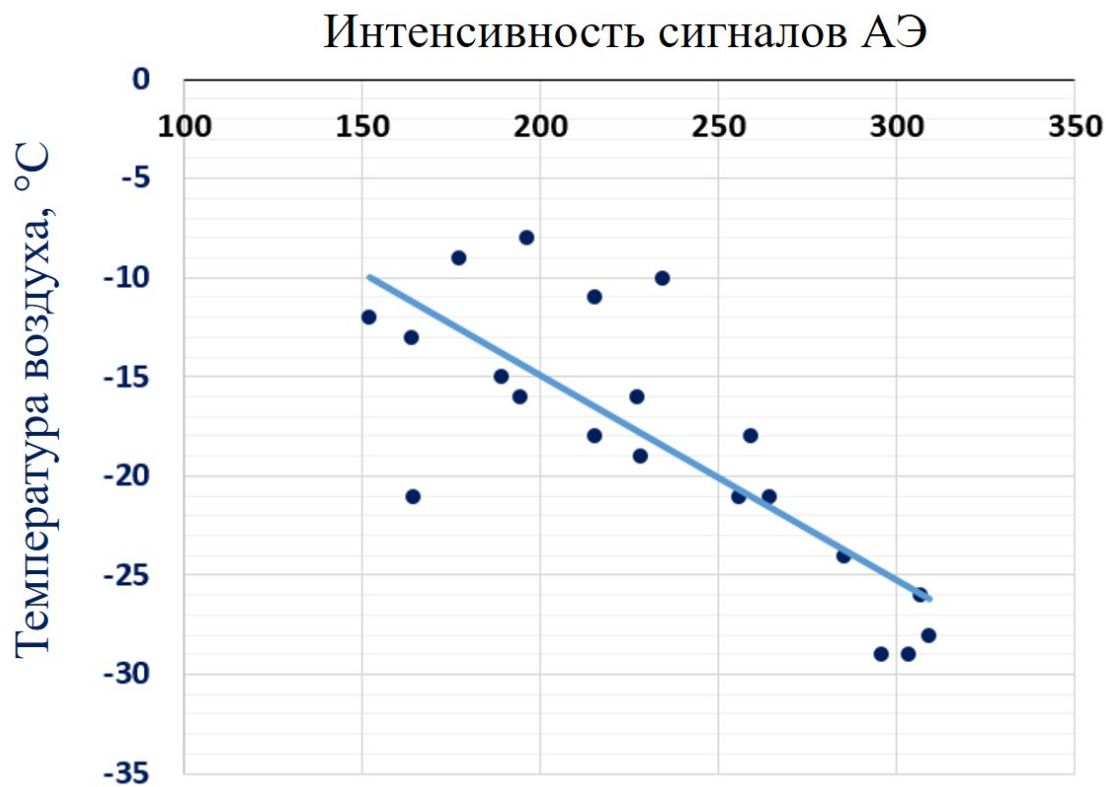


Рисунок 51. – Регистрация АЭ сигналов при низких температурах

По полученному набору точек была построена линейная аппроксимация. Из графика видно, что количество зарегистрированных от дефектов сигналов АЭ при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет ~ 300 , а при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ 150 сигналов АЭ.

Отсюда можно сделать вывод, что при понижении температуры на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, интенсивность сигналов АЭ, а значит и скорость развития дефектов увеличивается в 2 раза. Таким образом, подтверждается информация, указанная в работе [33], что в морозы частота отказов увеличивается в 2 раза.

4.6. Интеграция акустико-эмиссионного мониторинга в систему диспетчеризации горнотранспортного комплекса

В связи с интенсивным развитием цифровизации на угольных предприятиях возникли благоприятные условия для внедрения на производстве дистанционных методов диагностики, позволяющих в онлайн режиме следить за техническим состоянием карьерных самосвалов. Таким образом, появилась техническая возможность для оснащения карьерных самосвалов на постоянной основе приборами диагностики.

Но для полноценной их работы необходимо организовать подключение приборов к бортовым системам самосвалов и системе диспетчеризации горнотранспортного комплекса (ГТК). Это должно значительно повысить уровень безопасности при эксплуатации самосвалов, так как диагностика будет проводиться ежедневно во время работы автосамосвала в карьере, а её результаты станут доступными для соответствующих служб, отвечающих за безопасную эксплуатацию самосвалов. Такой подход даст возможность заранее планировать проведение ремонтов и приобретение запчастей.

Сегодня уже есть примеры использования дистанционных методов контроля для диагностики различных элементов карьерных самосвалов. Однако приборы, устанавливаемые на самосвалы, технически и программно никак не связаны ни с

бортовой системой самосвала, ни с системой диспетчеризации горнотранспортного комплекса (ГТК). Сопоставление диагностических данных и параметров эксплуатации, регистрируемых системой диспетчеризации, проводится специалистами после проведённого обследования в ручном режиме, что достаточно долго и малоэффективно. Поэтому для решения этой задачи необходима совместная работа разработчиков систем диспетчеризации горнотранспортного комплекса с производителями приборов диагностики и предприятиями, эксплуатирующими карьерные самосвалы.

Задача заключается в необходимости, с одной стороны, организовать передачу данных от бортовой системы самосвала к приборам диагностики таких показателей, как динамический вес перевозимого груза, величина уклонов (продольного и поперечного), давление в цилиндрах подвесок, скорость движения самосвала, температура окружающей среды и других показаний подключаемых аналоговых и цифровых датчиков. Это необходимо для установления значений параметров эксплуатации, при которых происходит наиболее интенсивный рост дефектов. В результате появится возможность в режиме реального времени определять причины, приводящие к ускоренному развитию дефектов.

С другой стороны, необходимо организовать передачу результатов с приборов диагностики в систему диспетчеризации ГТК, где она будет накапливаться и анализироваться. Подключение приборов диагностики к системе диспетчеризации позволит соответствующим службам получать результаты диагностики автоматически и на основе полученных данных самостоятельно принимать решения о необходимости ремонта или других мероприятий. Чтобы персонал предприятия мог использовать результаты диагностики, должны быть разработаны критерии оценки результатов диагностики, которые позволяли бы в автоматическом режиме давать оценку о техническом состоянии самосвала.

Накопление диагностических данных в системе диспетчеризации позволит сравнивать техническое состояние различных самосвалов и определять

приоритетные задачи, необходимые для устранения неисправностей. Появится возможность делать прогноз по техническому состоянию на ближайшую перспективу.

Накопленная в базе данных информация о диагностических параметрах и режимах эксплуатации карьерных самосвалов, а также о взаимосвязях между поломками узлов и агрегатов и предшествующими отклонениям отдельных контролируемых параметров в дальнейшем позволит разработать цифровые двойники карьерных самосвалов и перейти к предиктивному техническому и сервисному обслуживанию на базе прогнозных моделей [143].

В конечном итоге, специалистам по диагностике целесообразно заниматься разработкой схем диагностики, установкой оборудования, разработкой критериев живучести на основе собранных данных, а обслуживающий персонал предприятия может напрямую использовать результаты диагностики и самостоятельно принимать на их основе дальнейшие решения.

Стоит отметить, что объединение приборов диагностики и системы диспетчеризации будет особенно эффективно при работе на беспилотных карьерных самосвалах (рисунок 52, рисунок 53).



Рисунок 52. – Роботизированный карьерный самосвал БЕЛАЗ-7558R



Рисунок 53. – Беспилотный карьерный самосвал «Юпитер» от ПАО «КамАЗ»

Отсутствие водителя в кабине самосвала предъявляет дополнительные требования к цифровым системам самосвала, так как водитель, кроме функции по управлению, ещё выполнял и диагностические функции. К ним относится периодический осмотр машины на наличие повреждений, поиск отклонений в поведении машины при движении, а также выявление нехарактерных посторонних шумов, свидетельствующих о неисправности.

Теперь эти функции вместо водителя должны взять на себя системы диагностики, использующие дистанционные методы контроля. Данные методы уже применяются при диагностике карьерных самосвалов. В основном, приборы диагностики устанавливаются на самосвал временно, как отдельные устройства, никак не связанные ни с бортовой системой самосвала, ни с системой диспетчеризации.

Поэтому для получения более эффективного результата, беспилотные карьерные самосвалы необходимо оснащать на постоянной основе диагностическими системами, которые в режиме мониторинга будут собирать данные и сообщать об изменениях технического состояния напрямую обслуживающему персоналу предприятия. Для этого системы диагностики должны быть совместимы как с бортовой системой самосвала, так и с системой диспетчеризации горнотранспортного комплекса (ГТК), то есть необходимо наладить постоянный обмен данными между указанными системами. В качестве примера можно предложить следующую схему применения системы акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга (рисунок 54).

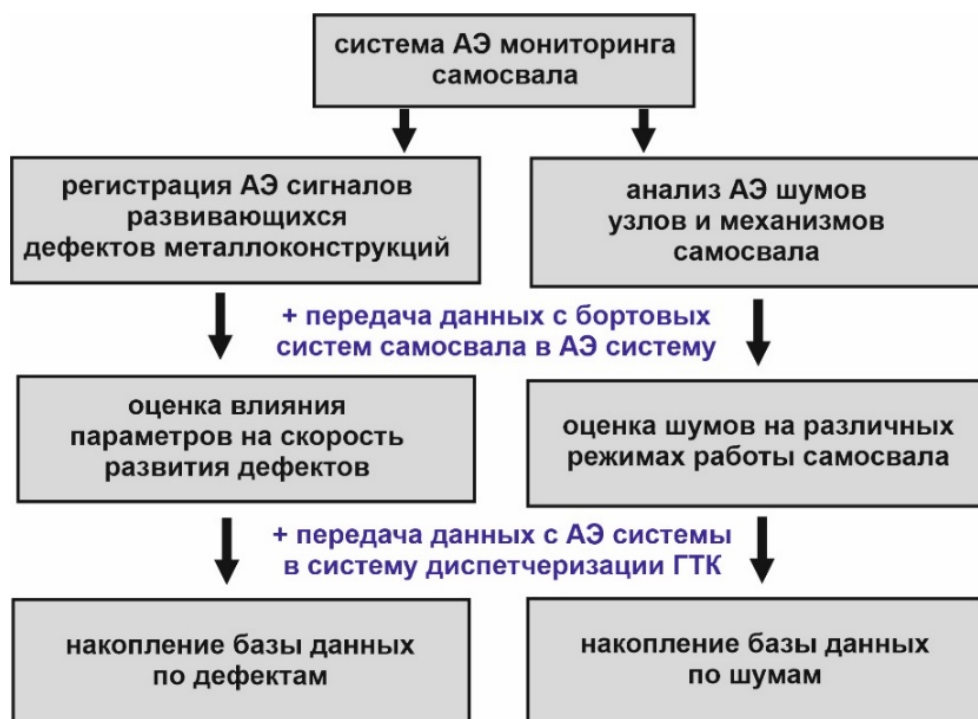


Рисунок 54. – Схема интеграции системы АЭ мониторинга
в систему диспетчеризации ГТК

Акустико-эмиссионный метод позволяет обнаруживать развивающиеся дефекты металлоконструкций самосвала, а также прослушивать шумы от работы узлов и механизмов.

Источником постороннего шума, свидетельствующего о неисправности, может быть и подвеска автомобиля, и двигатель, и мотор-редуктор, и стук элементов, при слабо затянутых болтах на фланцевых соединениях. Любое внешнее воздействие на элементы самосвала, оснащенные АЭ датчиками, будет зарегистрировано при условии превышения амплитуды этих сигналов установленного порога. Система АЭ мониторинга, благодаря возможности определять амплитуду АЭ сигналов и время их регистрации с точностью до микросекунды, поможет определить источник шума. Кроме этого, исследуя статистику можно косвенно судить о степени повреждения того или иного узла,

путём сравнения амплитуды шумового сигнала и его спектра в исправном и повреждённом состояниях.

Диагностика в режиме онлайн мониторинга необходима в первую очередь для обнаружения отклонений в эксплуатации самосвала, при которых происходит наиболее интенсивное развитие дефектов. Своевременное устранение обнаруженных отклонений в эксплуатации позволит уменьшить воздействие на элементы самосвала и приведёт к увеличению срока службы самосвала.

Интеграция АЭ мониторинга может расширить функционал системы диспетчеризации ГТК (рисунок 55).

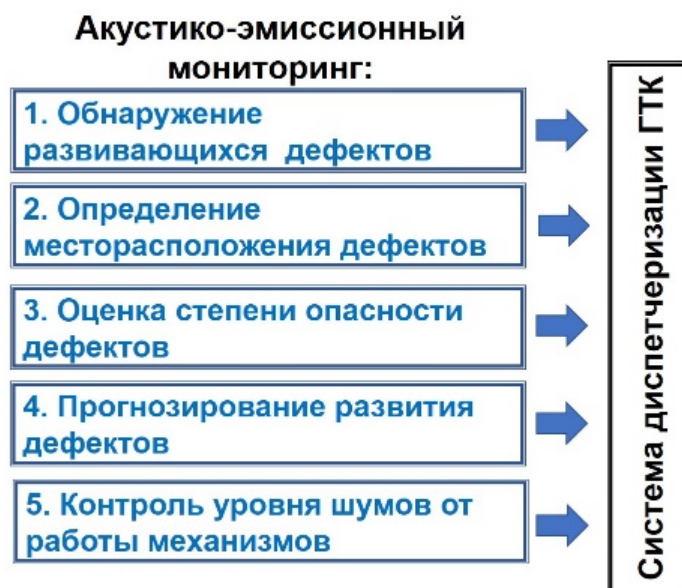


Рисунок 55. – Интеграция АЭ мониторинга в систему диспетчеризации ГТК

Это позволит непрерывно отслеживать информацию о состоянии несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов (рисунок 56).



Рисунок 56. – Результат интеграции АЭ мониторинга в систему диспетчеризации ГТК

4.7. Схема расстановки датчиков при акустико-эмиссионном мониторинге карьерных автосамосвалов

Для диагностики несущих металлоконструкций карьерного автосамосвала БелАЗ 75306 с использованием АЭ мониторинга предлагается использовать следующую схему расстановки датчиков АЭ (рисунок 57).

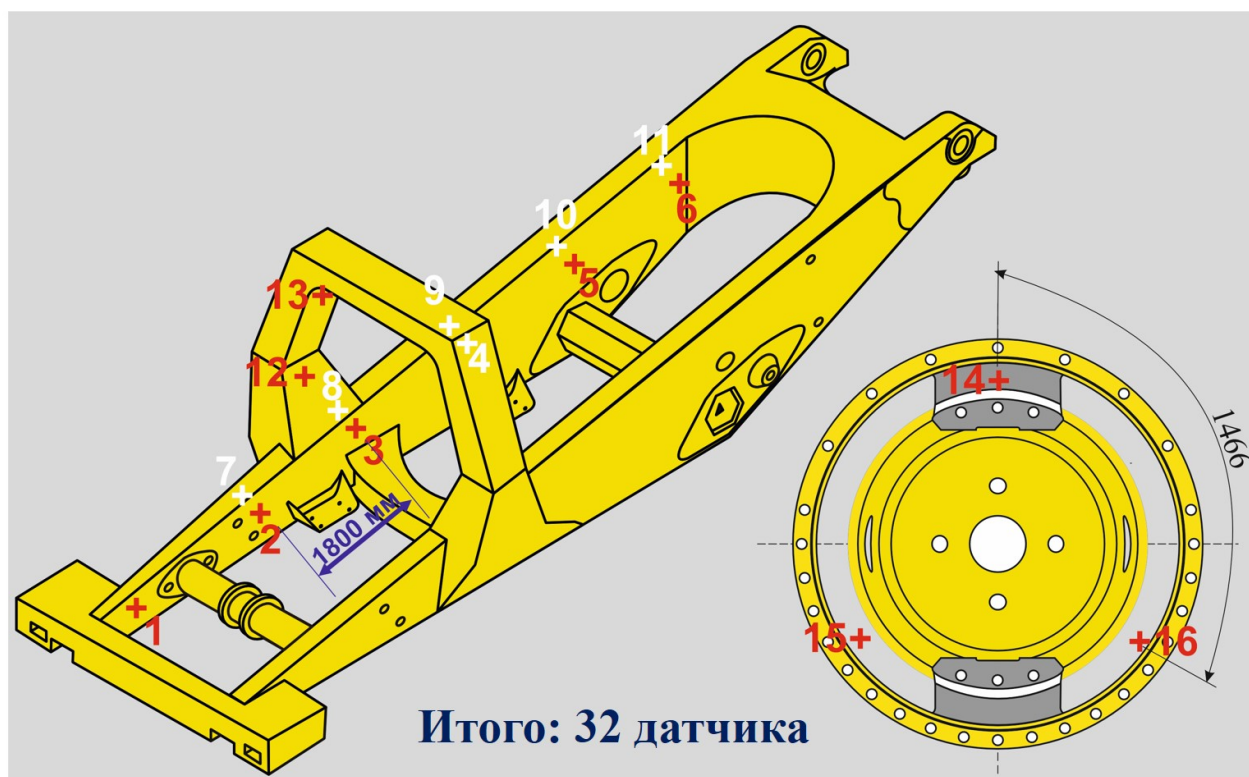


Рисунок 57. – Схема расстановки датчиков на БелАЗ 75306 (предлагаемая)

Для диагностики рамы самосвала и двух корпусов РМК необходимо задействовать примерно 32 датчика АЭ. Для определения местоположения дефектов при такой расстановке датчиков может быть применён линейный тип локации.

4.8. Выводы по главе 4

1. Критерий оценки живучести $K_{\text{жив}} < 4$, полученный в ходе механических испытаний образцов с использованием АЭ контроля, подтвержден результатами АЭ мониторинга металлоконструкций самосвала в производственных условиях.

2. При обследовании в режиме онлайн АЭ мониторинга во время эксплуатации карьерного автосамосвала установлено:

- наиболее интенсивный рост дефектов происходит на участках, имеющих повреждения дорожного покрытия, в основном на подъезде к отвалу и к месту погрузки, где зарегистрировано до 75 % АЭ сигналов от развивающихся дефектов;

- анализ интенсивности АЭ сигналов позволяет косвенно оценить уровень навыков вождения водителя, так у водителя, работающего в первую смену, интенсивность АЭ сигналов оказалась в 2 раза выше при одинаковом уровне квалификации;

- при понижении температуры в зимнее время на 15 °С (с -10° до -25 °С) скорость развития дефектов увеличивается в 2 раза.

3. При проверке качества ремонта с помощью визуально-измерительного контроля установлено, что отсутствуют технологические карты ремонта, пропущены трещиноподобные дефекты.

4. Внедрение системы АЭ мониторинга в систему диспетчеризации позволит получать обслуживающему персоналу актуальную информацию о техническом состоянии несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований, дано новое решение научно-технической задачи, состоящее в обосновании качества оценки технического состояния металлоконструкций карьерных автосамосвалов методами АЭ мониторинга с учетом принятого критерия живучести, что имеет существенное значение для решения проблемы повышения эффективности использования технологического транспорта на угольных предприятиях страны.

В диссертации, получены следующие основные научные и практические результаты:

1. На основе анализа методов функциональной диагностики несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов в работе предложен метод акустико-эмиссионного контроля, позволяющий обнаруживать трещиноподобные дефекты и отслеживать их развитие.

2. Оценки критерия живучести для испытанных образцов с АЭ контролем, характеризующие переход от этапа равномерного развития трещиноподобного дефекта к ускоренному, показали, что его величина должна быть $K_{\text{жив}} < 4$. Это нашло своё подтверждение в результатах АЭ мониторинга металлоконструкций самосвала в производственных условиях.

3. Разработанные программа и методика АЭ мониторинга несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов потребовали для своей реализации разработки специальных средств (системного блока, измерительных преобразователей, магнитных держателей) и программного обеспечения:

- 4-х канальный системный блок для АЭ мониторинга на основе универсальной платы аналогового ввода-вывода, с погрешностью измерений максимальной амплитуды АЭ сигнала, не превышающей $\pm 1-2$ дБ;

- измерительные преобразователи АЭ, с резонансной частотой 200 и 450 кГц;

- магнитные держатели для крепления датчиков и предварительных усилителей;

- программное обеспечение для сбора и передачи данных.

4. В ходе опытно-промышленной апробации в условиях филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» установлено следующее:

- наиболее интенсивный рост дефектов происходит на участках, имеющих повреждения дорожного покрытия, в основном на подъезде к отвалу и к месту погрузки, где зарегистрировано до 75 % АЭ сигналов от развивающихся дефектов;

- анализ интенсивности АЭ сигналов позволяет косвенно оценить уровень навыков вождения водителя, так у водителя, работающего в первую смену, интенсивность АЭ сигналов оказалась в 2 раза выше при одинаковом уровне квалификации;

- при понижении температуры в зимнее время на 15 °С (с -10° до -25 °С) скорость развития дефектов увеличивается в 2 раза;

- при проверке качества ремонта с помощью визуально-измерительного контроля установлено, что отсутствуют технологические карты ремонта, пропущены трещиноподобные дефекты.

5. Постоянный АЭ мониторинг является наиболее достоверным методом оценки живучести несущих элементов металлоконструкций автосамосвалов. При 90 %-й доверительной вероятности достоверность результатов увеличивается в 1,5 раза.

6. Разработанная система АЭ мониторинга может быть внедрена в систему диспетчеризации, что позволит получать обслуживающему персоналу достоверную и актуальную информацию о техническом состоянии несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов.

Рекомендации и дальнейшие перспективы разработки темы

Результаты, полученные в исследовании, рекомендованы для применения при диагностике металлоконструкций автосамосвала.

Направления дальнейших исследований:

1. Анализ акустических шумов от работы узлов и механизмов автосамосвала с помощью акустико-эмиссионного метода.
2. Накопление базы данных с АЭ характеристиками дефектов, обнаруженных при АЭ мониторинге металлоконструкций.
3. Разработка технологии АЭ мониторинга несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов, на основе которой станет возможным оценка живучести и прогнозирование ресурса по фактическому состоянию.
4. Интеграция системы мониторинга в систему диспетчеризации ГТК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, И. В. Оценка ресурса металлоконструкций задних мостов автосамосвалов при эксплуатации на разрезах Кузбасса : специальность 05.05.06 "Горные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузнецов Илья Витальевич. – Кемерово, 2015. – 22 с.
2. Астахова, Т. В. Повышение долговечности рам карьерных автосамосвалов на основе исследования их напряженно-деформированного состояния: специальность 05.05.06 "Горные машины": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Астахова Татьяна Валентиновна. – Кемерово, 2007. – 19 с.
3. Баранов В.М., Молодцов К.И. Акустико-эмиссионные приборы ядерной энергетики. М.: Атомиздат, 1980. 144 с.
4. Башков, О. В. Анализ эволюции дефектной структуры поликристаллических материалов на различных стадиях нагружения методом акустической эмиссии : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.16.09 – Комсомольск-на-Амуре, 2012. – 16 с.
5. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф. Техническая диагностика опасных производственных объектов. М.: Наука, 2010. 415 с.
6. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону - Таганрог, 2017.
7. Быков С.П., Юрайдо Б.Ф., Иванов В.И. О достоверности акустико-эмиссионного контроля. Контроль. Диагностика. 2013. № 12. С. 53-60.
8. Грешников В.А. Акустическая эмиссия / В.А. Грешников, Ю. Б. Дробот. - М.: Изд-во стандартов, 1976. - 272 с.
9. Дробот, Ю.Б. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом / Ю.Б. Дробот, А.М. Лазарев // М.: Изд-во стандартов. 1987.

10. Иванов В.И. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля и исследования материалов: (Обзор основных проблем и задач). // Дефектоскопия. 1980. № 5. С. 65–84.
11. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: ИД «Спектр», 2017, 368 с.
12. Недосека А.Я., Недосека С.А., Олейник Р.А. Распространение волн акустической эмиссии в пластинах от действия локального источника излучения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2001. № 3. С. 4-10.
13. Панин С.В., Башков О.В., Семашко Н.А., Панин В.Е., Золотарева С.В. Комбинированное исследование особенностей деформации плоских образцов и образцов с надрезом на микро- и мезоуровнях методами акустической эмиссии и построения карт деформации поверхности. Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № S1-2. С. 303-306.
14. Н.А. Семашко, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении - М. : Машиностроение, 2002. - 239 с.
15. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В., Комаров К.Л., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Кожемякин В.Л., Паньков А.Ф. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций, под редакцией Л. Н. Степановой. Москва, 2000.
16. Стенин, Г. Д. Применение акустико-эмиссионного контроля для оценки технического состояния одноковшовых шагающих экскаваторов / Г. Д. Стенин, А. В. Менчугин, С. И. Протасов // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : Труды VII международной научно-практической конференции, Кемерово, 10–11 октября 2005 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2005. – С. 79-82.

17. Степанова, Л. Н. Кластеризация источников сигналов акустической эмиссии по скорости нарастания переднего фронта. Дефектоскопия. – 2009. – № 10. – С. 27–35.
18. Stepanova, L. N. Acoustic Emission Diagnostics of Freight Car Bogie Cast Pieces / L. N. Stepanova, S. I. Kabanov, E. Y. Lebedev // Transportation Research Procedia : 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, October 06-08, 2021. – Irkutsk-Krasnoyarsk, 2022. – P. 547-555. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.089.
19. Стрижало, В. А. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / А. В. Стрижало, Ю. В. Добровольский, В.А. Стрельченко и др. Киев : Наукова думка, 1990. – 232 с.
20. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия физико-механические аспекты. Ростов-на-Дону, 1986.
21. Шемякин В.В., Стрижков С.А. Аспекты применения метода акустической эмиссии для мониторинга опасных промышленных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2004. №4. С. 16-19.
22. Dunegan H.L., Harris D.O., Tatro S.A. Fracture analysis by use of acoustic emission. Engineering Fracture Mechanics, 1968, V1, N1, pp.105-122.
23. Ono K Structural Integrity Evaluation by Means of Acoustic Emission. Acoustic Emission and Critical Phenomena (2008) pp. 13-27 Published by Taylor & Francis.
24. Ohtsu M Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering (2008) pp. 11-18 Springer Berlin Heidelberg.
25. Pollock A. Material brittleness and the energetics of acoustic emission. 2011 Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series.
26. Pollock, A. A. Acoustic emission amplitude distribution / - International Advances in Nondestructive Testing, 1981,v.7.
27. Scruby C.B. Quantitative acoustic emission techniques. In Researches techniques in nondestructive testing. Edited by R.S. Sharp. - 1985. - V. 8. - pp. 141-210.

28. Wadley H.N.G., Scruby C.B. Elastic waves radiation from cleavage crack extension. // International journal of fracture. -1983. - V. 23. - N. 2. - pp. 111-128.
29. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль: Справочник; В 7 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 7. Кн. 1. М.: Машиностроение. 2005, – 340 с.
30. В. И. Иванов, И. Э. Власов Основные проблемы акустико-эмиссионного контроля промышленных объектов. Труды II Международной научно технической конференции «Инновационные технологии в методе акустической эмиссии», 2010, с.1-7.
31. Хорешок, А. А. Метод комплексного диагностирования редукторов мотор-колёс карьерных автосамосвалов в условиях предприятий АО «УК «Кузбассразрезуголь» / А. А. Хорешок, А. В. Кудреватых // Горная промышленность. – 2010. – № 5(93). – С. 60-65.
32. Анализ причин низкой эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов / Ю. А. Власов, Е. Н. Спирин, А. Н. Ляпин [и др.] // Научное обозрение. Технические науки. – 2016. – № 5. – С. 37-44.
33. Дадонов, М. В. Анализ технологии, условий и целесообразности сварочного ремонта рам автосамосвалов БЕЛАЗ, эксплуатируемых в условиях АО "Салек" г. Киселевск / М. В. Дадонов, М. А. Соболенко // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Кемерово, 19–20 октября 2021 года / Редколлегия: Д.М. Дубинкин (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 247-249.
34. Хорешок, А. А. Обзор конструкций несущих систем (рам) карьерных самосвалов грузоподъемностью до 110 т / А. А. Хорешок, Д. М. Дубинкин, Е. А. Зеляева // Техника и технология горного дела. – 2022. – № 1(16). – С. 4-15. – DOI 10.26730/2618-7434-2022-1-4-15.

35. Дрыгин, М. Ю. Повышение качества ремонта и контроля металлоконструкций большегрузных технологических машин / М. Ю. Дрыгин, Н. П. Курышкин // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5, № 2. – С. 123-129. – DOI 10.25206/2310-9793-2017-5-2-123-129.
36. Квагинидзе, В. С. Совершенствование методов ремонта металлоконструкций большегрузных карьерных автосамосвалов / В. С. Квагинидзе, В. Б. Корецкий, Н. Н. Чупейкина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № S8. – С. 295-303.
37. Квагинидзе, В. С. Эффективность системы технических обслуживаний и ремонтов большегрузных карьерных автосамосвалов, эксплуатирующихся в условиях Севера / В. С. Квагинидзе, Н. А. Корецкая // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № S5. – С. 198-217.
38. Шубин, А. А. Анализ надёжности рамы карьерных самосвалов / А. А. Шубин, В. Г. Дунцаев, В. А. Храмовских // Перспективы развития горно-металлургической отрасли : Материалы XXIII Всероссийской научно-практической конференции «Игошинские чтения», Иркутск, 30 ноября – 01 2023 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 93-98.
39. Квагинидзе, В. С. Основные методы восстановления металлоконструкций большегрузных карьерных автосамосвалов, эксплуатируемых в условиях Севера / В. С. Квагинидзе, В. Б. Корецкий // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008. – № 8. – С. 37-39.
40. Измерительная система для исследования процессов деформации в несущих элементах карьерных автосамосвалов / Ю. А. Лагунова, А. А. Жилинков, В. В. Макарова [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 6(176). – С. 43-53. – DOI 10.26730/1816-4528-2024-6-43-53.

41. Брильков, М. Н. Влияние эксплуатационных параметров на техническое состояние карьерного самосвала / М. Н. Брильков, А. А. Ломов, И. А. Данченко // Россия молодая : Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 20–23 апреля 2021 года / Редколлегия: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 523101-523107.

42. Влияние трассы разреза на скорость движения карьерного самосвала грузоподъемностью 220 т / Д. М. Дубинкин, А. В. Дягилева, С. Д. Дубинкин, И. А. Тургенев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 6(166). – С. 110-119. – DOI 10.26730/1999-4125-2024-6-110-119.

43. Богомолов, С. В. Повышение безопасности работы карьерного автотранспорта за счет улучшения качества технологических дорог / С. В. Богомолов // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : сборник материалов XII международной научно-практической конференции, Кемерово, 22–23 ноября 2017 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 105.

44. Мониторинг состояния карьерных технологических дорог с использованием цифровых систем / А. Шакенов, Р. Егембердиев, А. Кольга, И. Столповских // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. – 2023. – Т. 4, № 460. – С. 236-248. – DOI 10.32014/2023.2518-170X.295.

45. Москвитина, Л. В. Структуры деформации и разрушения ходовых частей большегрузных самосвалов м-200 (США), эксплуатирующихся в условиях низких температур / Л. В. Москвитина, С. Г. Москвитин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 2-4. – С. 827-831.

46. Отказы систем автосамосвалов особо большой грузоподъемности при эксплуатации в условиях низких температур / Р. С. Григорьев, Г. Ю. Зудов, В. П.

Степанов, Е. Е. Иванов // Механика разрушения и прочность конструкций при низких температурах / Ответственный редактор: Ю.С. Уржумцев. – Якутск : Якутский филиал СО АН СССР, 1983. – С. 36-41.

47. Борисенко, А. Н. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов в условиях холодных районов с использованием цифрового двойника автотранспортного предприятия / А. Н. Борисенко // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 4(110). – С. 88-97. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-4-88-97.

48. Петров, В. Ф. Ремонтная технологичность большегрузных карьерных автосамосвалов на угольных разрезах Севера / В. Ф. Петров, В. Б. Корецкий. – Москва : Горная книга (МГГУ), 2003. – 289 с. – ISBN 5-7418-0250-8.

49. Квагинидзе В.С. Эксплуатация карьерного горного и транспортного оборудования в условиях Севера. - Москва : Горная книга (МГГУ), 2002. - 243 с.

50. Увеличение ходимости редукторов мотор-колес карьерных самосвалов методом внедрения контроля фактического технического состояния / А. А. Хорешок, А. В. Кудреватых, А. С. Ащеулов [и др.] // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 4. – С. 267-276. – DOI 10.17073/2500-0632-2021-4-267-276.

51. Методы диагностирования фактического технического состояния редуктора мотор-колеса БелАЗ / А. В. Кудреватых, А. С. Фурман, А. С. Ащеулов [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 2(144). – С. 23-28. – DOI 10.26730/1999-4125-2021-2-23-28.

52. Кудреватых, А. В. Повышение ресурса мотор-колес карьерных автосамосвалов с использованием акустической диагностики / А. В. Кудреватых, Ю. К. Компаиди // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022 : Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, Кемерово, 23–24 ноября 2022 года / Редколлегия: А.А. Хорешок (отв. редактор), А.И. Фомин [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 815.1-815.4.

53. Тотмянин, С. В. Анализ интенсивности отказов и динамики простоев автомобилей БелАЗ горнодобывающего предприятия / С. В. Тотмянин // Недропользование и транспортные системы. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 12-24. – DOI 10.18503/SMTS-2022-12-2-12-24.

54. Потапенко, В. В. Усовершенствование технического обслуживания, диагностирования и ремонта карьерных самосвалов БЕЛАЗ / В. В. Потапенко, Д. А. Олейник // Горный вестник. – 2013. – № 96. – С. 249-254.

55. РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю. Утв. постановлением ГГТН РФ от 11.06.03 № 92.

56. Калиниченко, Н. П. Визуальный и измерительный контроль : учебное пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко ; Томский политехнический университет. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2009. – 300 с.

57. Поздняков, В. Ф. Приборы и методы визуального и оптического контроля / В. Ф. Поздняков, Е. В. Позднякова, А. Н. Прудников ; Министерство образования Республики Беларусь Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Белорусско-Российский университет. – Могилев : Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования "Белорусско-Российский университет", 2022. – 288 с.

58. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1980.

59. Калиниченко, Н. П. Капиллярный контроль : учебное пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня / Н. П. Калиниченко, А. Н. Калиниченко. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2008. – 292 с.

60. Луканина, М. А. Капиллярная дефектоскопия / М. А. Луканина, И. М. Бугров // Инновационные технологии в науке и образовании : сборник статей IX

Международной научно-практической конференции, Пенза, 20 октября 2018 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2018. – С. 13-17.

61. Калиниченко, Н. П. Контроль проникающими веществами. Капиллярный контроль / Н. П. Калиниченко, В. К. Кулешов, А. Н. Калиниченко. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2007. – 203 с.

62. Кравцов, В. С. Обзор магнитных методов. Магнитная дефектоскопия / В. С. Кравцов, В. С. Ратушняк // Образование - наука - производство : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 07–08 декабря 2018 года. Том 1. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2018. – С. 120-130.

63. Батарин, Р. В. Применение магнитных методов неразрушающего контроля для анализа повреждаемости металлов / Р. В. Батарин, А. В. Корнилова, Н. К. Корнеев // Научно-технический прогресс в черной металлургии : Материалы II Международной научно-технической конференции, Череповец, 07–09 октября 2015 года / Ответственный редактор А.Л. Кузьминов. – Череповец: Череповецкий государственный университет, 2015. – С. 165-169.

64. Пашагин, А. И. Выявляемость поверхностных дефектов малого раскрытия при магнитной дефектоскопии / А. И. Пашагин, Н. П. Бенклевская // Дефектоскопия. – 2013. – № 1. – С. 67-70.

65. Шаяхметова, Р. Р. Магнитная дефектоскопия / Р. Р. Шаяхметова // Научно-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА : сборник статей Международной научно-практической конференции, Таганрог, 26 января 2019 года. Том Часть 1. – Таганрог: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2019. – С. 138-140.

66. Ком, А. Л. Обследование технического состояния оборудования методом неразрушающего магнитного контроля / А. Л. Ком // Вестник МГТУ "Станкин". – 2012. – № 3(22). – С. 47-49.

67. ГОСТ Р 55724-2013. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые.

68. Янчеленко, В. А. Ультразвуковая диагностика коренных подшипников дизелей карьерных автосамосвалов в эксплуатации / В. А. Янчеленко, В. А. Медведев // Двигателестроение. – 2014. – № 4(258). – С. 33-36.

69. Курьянова, П. В. Ультразвуковой метод в неразрушающем контроле / П. В. Курьянова, М. Ю. Марьин, А. Ю. Топинко // Новое слово в науке: перспективы развития. – 2016. – № 2(8). – С. 152-153.

70. Преимущества и недостатки ультразвукового метода неразрушающего контроля / О. Г. Косинцева, А. П. Хорева, В. Н. Игнатенко, А. А. Ковзиридзе // Наука, образование, инновации: апробация результатов исследований : Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, Нефтекамск, Республика Башкортостан, Российская Федерация, 01 февраля 2018 года / под общей редакцией А.И. Вострецова. – Нефтекамск, Республика Башкортостан, Российская Федерация: Научно-издательский центр "Мир науки" (ИП Вострецов Александр Ильич), 2018. – С. 58-64.

71. Медведев, В. А. Ультразвуковая диагностика работы топливной аппаратуры дизелей большегрузных карьерных автосамосвалов / В. А. Медведев, В. А. Янчеленко // Двигателестроение. – 2013. – № 1(251). – С. 28-30.

72. Статистика отказов высоконагруженных узлов карьерных самосвалов грузоподъемностью 220 тонн / А. И. Бокарев, В. А. Дианов, А. Б. Карташов [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – № 4(164). – С. 23-31.

73. Горюнов, С.В. Оценка системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов на угледобывающих предприятиях Кузбасса / С.В.

Горюнов, А.А. Хорешок // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 358-362.

74. Белокуров, В. Н. Напряженно-деформированное состояние автомобильных рам и их адекватное моделирование методом конечных элементов / В. Н. Белокуров, И. А. Медведев // Машиностроение и инженерное образование. – 2006. – № 2(7). – С. 55-63.

75. Буклешев, Д. О. Применение фазированных антенных решеток в ультразвуковом контроле сварных стыков и околошовных зон / Д. О. Буклешев // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке : Сб. ст. по материалам XIV междунар. науч.-практ. конф.. Том № 5 (14) : Ассоциация научных сотрудников "Сибирская академическая книга", 2018. – С. 31-39.

76. Звонов, С. Дефектоскопия на фазированных решетках / С. Звонов, А. Хисрамов, А. Вышкина // САПР и графика. – 2020. – № 5(283). – С. 48-51.

77. Кудреватых, А. В. Методика определения технического состояния редукторов мотор-колеса автосамосвалов БЕЛАЗ по параметрам масла / А. В. Кудреватых, А. С. Ащеулов, А. С. Ащеулова // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 1(137). – С. 49-55.

78. Подгорный, А. И. Тепловизионное обследование редукторов карьерных автосамосвалов для увеличения сроков их эксплуатации / А. И. Подгорный, А. Г. Наймитов, Ю. Н. Наймитова // Россия молодая : Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 52515.1-52515.4.

79. Компаиди, Ю. К. Акустическая диагностика как инструмент повышения надежности и эффективности работы редукторов мотор-колеса карьерных автосамосвалов / Ю. К. Компаиди, А. В. Кудреватых // Вестник науки. – 2024. – Т. 2, № 10(79). – С. 528-533.

80. Кудреватых, А. В. Методы диагностирования редуктора мотор-колеса / А. В. Кудреватых, Д. А. Деменов, Р. В. Тымчина // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Кемерово, 19–20 октября 2021 года / Редколлегия: Д.М. Дубинкин (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 257-259.

81. Кудреватых, А. В. Вибрационная диагностика редуктор мотор -колес, как один из методов диагностирования / А. В. Кудреватых, В. К. Рыбин // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022 : Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, Кемерово, 23–24 ноября 2022 года / Редколлегия: А.А. Хорешок (отв. редактор), А.И. Фомин [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 818.1-818.4.

82. Кулешов, А. А. Анализ признаков и обоснование критериев вибродиагностики узлов карьерных автосамосвалов / А. А. Кулешов, А. А. Беликов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 1. – С. 206-208.

83. Альтмаер, Е. Э. Вибродиагностика редукторов мотор-колес карьерных автосамосвалов / Е. Э. Альтмаер, Д. С. Комаров, И. А. Трезер // Инновации в технологиях и образовании : Сборник статей XVII Международной научной конференции, Белово, 19 апреля 2024 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2024. – С. 12-15.

84. Андреева, Л. И. Рекомендации по совершенствованию технологии ремонтного обслуживания горной техники / Л. И. Андреева, Т. И. Красникова //

Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2022. – С. 292-294.

85. Кудреватых, А. В. Оценка фактического технического состояния редукторов мотор-колеса автосамосвалов БЕЛАЗ на основе параметров вибродиагностики / А. В. Кудреватых, А. С. Ащеулов, Н. В. Кохманович // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 5(141). – С. 5-10.

86. Менчугин, А. В. Обеспечение безаварийной эксплуатации несущих элементов металлоконструкций экскаваторов-драглайнов на основе диагностики их технического состояния : специальность 05.05.06 "Горные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Менчугин Александр Васильевич. – Кемерово, 2010. – 152 с.

87. Альшанская, А. А. Анализ статистики отказов карьерных экскаваторов / А. А. Альшанская // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XVIII международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 02–03 апреля 2020 года. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2020. – С. 293-296.

88. Менчугин А. В. Оценка технического состояния несущих металлоконструкций шагающих экскаваторов по параметрам акустико-эмиссионного сигнала. / А. В. Менчугин, Б. Л. Герике, С. И. Протасов, П. В. Буянкин. // М. - Горное оборудование и электромеханика. - № 5. — 2009. — С. 25-30.

89. Менчугин, А. В. Применение методов неразрушающего контроля при проведении технического диагностирования металлоконструкций одноковшовых шагающих экскаваторов./А. В. Менчугин, И. Д. Богомолов, П. В. Буянкин.// Сборник лучших докладов студентов и аспирантов Кузбасского государственного технического университета. По результатам 51-й студенческой научно-практической конференции — Кемерово: КузГТУ, 2006. - С.77-80.

90. Менчугин, А. В. Применение акустико-эмиссионного контроля для оценки технического состояния одноковшовых шагающих экскаваторов / А. В. Менчугин, С.И. Протасов, Г.Д. Стенин // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды VII международной научно-практической конференции - Кемерово: ННЦ ГПИГД им. А. А. Скочинского, ИУУ СО РАН, КузГТУ, ЗАО КВК «ЭкспоСибирь», 2005. - С.79-82.

91. Менчугин, А. В. Особенности оценки шумов при проведении АЭ контроля стрел карьерных экскаваторов типа драглайн./А. В. Менчугин, С. И. Протасов.// М. - Безопасность труда в промышленности. - № 3. — 2009. — С. 48-51.

92. Structural Health Monitoring of Walking Dragline Excavator Using Acoustic Emission / V. Barat, A. Marchenkov, V. Bardakov [et al.] // Applied Sciences (Switzerland). – 2021. – Vol. 11, No. 8. – DOI 10.3390/app11083420.

93. Побегайло, П. А. К вопросу о выборе методов контроля и оценки состояния металлоконструкций карьерных экскаваторов / П. А. Побегайло, Д. Ю. Крицкий, Е. С. Сазанкова // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : Сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 06–07 апреля 2023 года / Под общей редакцией Ю.А. Лагуновой. Оргкомитет: Ю.А. Лагунова, А.Е. Калянов. — Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. — С. 380-387.

94. Барат, В. А. Развитие метода акустической эмиссии за счет автоматизации обработки данных, повышения помехоустойчивости и достоверности обнаружения трещиноподобных дефектов металлоконструкций: специальность 05.11.13 "Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Барат Вера Александровна, 2020. – 306 с.

95. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

96. Москвичев, В.В. Методы и критерии механики разрушения при определении живучести и надежности металлоконструкции карьерных экскаваторов: специальность 01.02.06 "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Москвичев Владимир Викторович. – Челябинск, 1993. – 39 с.

97. Доронин, С. В. Проектные оценки долговечности и живучести рам карьерных самосвалов / С. В. Доронин, Т. В. Донцова // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – Т. 5, № 7. – С. 760-765.

98. Смирнов, А. Н. Акустическая эмиссия при различных степенях деформации и способах сварки стали СтЗсп / А. Н. Смирнов, Е. А. Ожиганов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 6(106). – С. 68-72.

99. Исследование сварных соединений на сопротивляемость холодным трещинам материалов рам горнодобывающей техники / В. Е. Михайлов, Р. Г. Адамов, Г. Н. Слепцов, М. М. Эверстов // Труды VII Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата : Пленарные доклады, Санкт-Петербург, 01–03 декабря 2014 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2014. – С. 443-450.

100. Бородин Ю.П. Акустико-эмиссионный контроль балки ведущего моста большегрузного автомобиля / Ю.П. Бородин, В.Г. Харебов, В.В. Московских // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 20-24.

101. Герике, Б. Л. Оценка технического состояния несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов / Б. Л. Герике, С. А. Швыдкин // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2022) : сборник трудов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 19–21 апреля 2022 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 199-205.

102. Диагностика несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов с применением метода акустической эмиссии / С. А. Швыдкин, Б. Л. Герике, Г. Д. Стенин, И. М. Фридман // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы XI Международной научно-практической конференции, Междуреченск, 27–28 апреля 2022 года. – Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 156.1-156.6.

103. Герике, Б. Л. Оценка живучести несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов / Б. Л. Герике, С. А. Швыдкин // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – № 5(175). – С. 12-24.

104. Швыдкин, С. А. Диагностика корпуса редуктора мотор-колеса карьерного автосамосвала / С. А. Швыдкин // Развитие – 2022 : Научное электронное издание, Кемерово, 11–13 мая 2022 года / Рекомендовано к публикации Ученым советом Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук. – Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 2022. – С. 49-57.

105. Bin Xu, Qi Wu, Stress fatigue crack propagation analysis of crane structure based on acoustic emission, Engineering Failure Analysis, Volume 109, 2020, 104206, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104206>.

106. Акустико-эмиссионный контроль дефектов зоны крепления крыла самолета в условиях полета / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2024. – Т. 27, № 6(312). – С. 18-27.

107. АЭ как комплексный метод мониторинга объектов. Задачи и перспективы. / Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Самохвалов А.Б., Курносков Д.А., Черниговский В.Ю., ООО «ДИАПАК», Москва, РФ // Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021) Санкт-Петербург, Россия, Сборник материалов, - 2021.- С. 5-6.

108. Шемякин В.В., Стрижков С.А. Аспекты применения метода акустической эмиссии для мониторинга опасных промышленных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2004. №4. С. 16-19

109. Шайбаков Р.А., Давыдова Д.Г., Кузьмин А.Н., Абдрахманов Н.Х., Марков А.Г. «Помехоустойчивый метод акустико-эмиссионного мониторинга резервуаров» // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – № 4. – С. 448-464.

110. Елизаров С.В., Барат В.А., Бардаков В.В., Чернов Д.В., Терентьев Д.А. АЭ-контроль динамического оборудования на примере роликовых опор вращающихся печей // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 7. – С. 4-11.

111. Ярославкина Е.Е., Тюрин Е.А., Зобнин П.Ю., Мельников Е.В., Ярославкин А.Ю., Бочкарев А.В. Акустико-эмиссионная система для исследования влияния модификатора AlTi5B1 на процесс кристаллизации алюминия // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XXI международной конференции. – Самара: ООО «Офорт». – 2019. – Т. 2. – С. 188-191.

112. Nuñez, A., & Kattis, S. (2023). Effective approaches to remote asset monitoring with acoustic emission. EWGAE35 & ICAE10 Conference on Acoustic Emission Testing, Ljubljana, Slovenia, September 2022. e-Journal of Nondestructive Testing Vol. 28(1). <https://doi.org/10.58286/27600>

113. Ono K. Structural Health Monitoring of Large Structures Using Acoustic Emission—Case Histories. *Applied Sciences*. 2019; 9(21):4602. <https://doi.org/10.3390/app9214602>

114. Швыдкин, С. А. Акустико-эмиссионный мониторинг несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов / С. А. Швыдкин, Б. Л. Герике // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2022. – № 8. – С. 153-157.

115. Швыдкин, С. А. Технология акустико-эмиссионного мониторинга металлоконструкций карьерных автосамосвалов / С. А. Швыдкин // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: Материалы XII Международной научно-практической конференции, Междуреченск, 26 апреля 2023 года / Редколлегия: Т.Н. Гвоздкова (отв. редактор), С.О. Марков [и др.]. – Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 158.1-158.5.

116. Швыдкин, С. А. Методика проведения постоянного акустико-эмиссионного мониторинга для диагностики металлоконструкций карьерных автосамосвалов / С. А. Швыдкин, Б. Л. Герике // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2023. – № 9. – С. 130-134.

117. Швыдкин, С. А. Диагностика несущих элементов металлоконструкций карьерных автосамосвалов с применением непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга / С. А. Швыдкин, Б. Л. Герике // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, Прокопьевск, 13–14 апреля 2022 года. – Прокопьевск: Филиал Федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева" в г. Прокопьевске, 2022. – С. 203-206.

118. Герике Б.Л., Швыдкин С.А. Мониторинг технического состояния несущих металлоконструкций карьерных автосамосвалов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4 (170). С. 128-136.

119. Швыдкин, С. А. Акустико-эмиссионный мониторинг на объектах угольной отрасли / С. А. Швыдкин // Развитие – 2023 : Сборник трудов конференции, Кемерово, 11–13 мая 2023 года. – Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2023. – С. 80-85.

120. Иванов В.И. Актуальные проблемы АЭ диагностирования, НИИИН МНПО «Спектр», Москва, РФ // Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021) Санкт-Петербург, Россия, Сборник материалов, - 2021.- С. 3.

121. L-CARD: интернет-портал. URL: <https://www.lcard.ru/products/boards/l-502?qt-ltab=1#qt-ltab> (Дата обращения: 03.05.2025).

122. Помехоустойчивый метод акустико-эмиссионного мониторинга резервуаров / Р. А. Шайбаков, Д. Г. Давыдова, А. Н. Кузьмин [и др.] // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2013. – № 4. – С. 448-464.

123. АЭ-контроль динамического оборудования на примере роликовых опор вращающихся печей / Елизаров С.В., Барат В.А., Бардаков В.В., Чернов Д.В., Терентьев Д.А. // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 7. – С. 4-11.

124. Акустико-эмиссионная система для исследования влияния модификатора AlTi5B1 на процесс кристаллизации алюминия / Е. Е. Ярославкина, Е. В. Мельников, Е. А. Тюрин [и др.] // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах, Самара, 03–06 сентября 2019 года / Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова,

С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. Том II. – Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Офорт", 2019. – С. 188-191.

125. Квагинидзе, В. С. Методы ремонта металлоконструкций большегрузных карьерных автосамосвалов / В. С. Квагинидзе, В. Б. Корецкий, Н. Н. Чупейкина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № S10. – С. 245-254.

126. Арефьев С.А. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Специальность: 25.00.22 – «Геотехнология» (подземная, открытая и строительная) Екатеринбург, 2015.

127. Бусел, Б. У. Категории карьерных дорог / Организация дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов и транспорт: сборник научных трудов конференции // Белорусский национальный технический университет, Автотракторный факультет. - Минск: БНТУ, 2017. - С. 15-25.

128. Буялич Г.Д. Исследование скоростных режимов движения карьерных самосвалов / Г.Д. Буялич, А.С. Фурман // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - №10 (41). - URL: <https://research-journal.org/archive/10-41-2015-november/issledovanie-skorostnyx-rezhimov-dvizheniyakarernyx-avtosamosvalov>. - doi: 10.18454/IRJ.2015.41.064

129. Сайдуллозода С.С. Оценка энергетических затрат автомобилей-самосвалов на основе модели их функционирования в горных условиях республики Таджикистан / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / специальность 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины, Челябинск, 2022.

130. Барышников Ю.Н. Расчет нагрузок на несущую систему транспортных средств. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1141.html>.

131. Клебанов Д.А. Разработка технико-технологических решений по созданию и применению роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / специальность 25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная), Москва, 2015.

132. Фурман А. С. Оценка эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на технологических трассах разрезов Кузбасса: специальность 05.05.06 "Горные машины": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Фурман Андрей Сергеевич, 2018. – 137 с.

133. Воронов А.Ю. Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов / диссертация на соискание ученой степени кандидата Бокарев А.И., Дианов В.А., Карташов А.Б. и др. Анализ процесса эксплуатации карьерных самосвалов БЕЛАЗ-7531 DOI: 10.26730/2618-7434-2024-4-66-79 ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ГОРНОГО ДЕЛА. 2024. №4. С. 66-79 77 ISSN 2618-7434 технических наук / Специальности: 05.05.06 – «Горные машины» и 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», Кемерово, 2015.

134. Найден С.Н. Разработка метода и средств диагностирования состояния коммутации тяговых двигателей карьерных самосвалов в условиях эксплуатации / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты, Омск, 2021.

135. Испеньков, С. А. Моделирование динамической нагруженности рам карьерных самосвалов / С. А. Испеньков, А. А. Ракицкий // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 10(129). – С. 174-180.

136. Астахова А.А. Повышение долговечности рам карьерных автосамосвалов на основе исследования их напряженно-деформированного состояния / диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / специальность 05.05.06 – Горные машины, Кемерово, 2007.

137. Доронин С.В. Статистические модели микропрофиля дорог технологического транспорта / С.В. Доронин, Т.В. Донцова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 3(31). – С. 202-208.

138. Доронин С.В. Оценка и регулирование свойств рам карьерных самосвалов с трещиноподобными дефектами / С.В. Доронин, Т.В. Донцова // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2012. – Т. 5, № 6. – С. 703-714.

139. Москвичев В.В. Новые подходы к проектным решениям в горном машиностроении / В.В. Москвичев, С.В. Доронин / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). №12. С.61-70, Москва, 2008.

140. Panachev, I.A. Management procedure for life cycle of rear axle metalworks of heavy haulers / I.A. Panachev, I.V. Kuznetsov // Journal of Mining Science. – 2015. – Vol. 51, No. 2. – P. 267-273.

141. Некоторые особенности отработки наклонных угольных пластов обратными гидролопатами в комплексе с автосамосвалами грузоподъемностью 220 тонн / А. А. Хорешок, С. Н. Данилов, Д. М. Дубинкин [и др.] // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 22. – С. 91-99.

142. Об изменении производительности обратных гидравлических лопат при разных схемах погрузки вскрыши в карьерные самосвалы / А. А. Хорешок, Д. М. Дубинкин, Я. О. Литвин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2024. – № 4. – С. 26-34.

143. Комплексный подход к удаленному мониторингу технического состояния и режимов эксплуатации карьерного автосамосвала. / Клебанов А.Ф., Сиземов Д.Н., Кадочников М.В.// Горная промышленность. 2020; (2):75–81. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-2-75-81.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

АЦП

Параметр	Значение
Количество каналов	16 дифференциальных или 32 с общей землей (однофазных)
Диапазон измерения напряжения постоянного тока. Поддиапазоны измерения напряжения (входной сигнал приложен между X_i и Y_i – для 16-канального режима, между $X_i(Y_i)$ и GND32 – для 32-канального режима)	± 10 В ± 10 В, ± 5 В, ± 2 В, ± 1 В, $\pm 0,5$ В, $\pm 0,2$ В при <i>соблюдении рабочих условий измерения</i>
<i>Рабочие условия измерения на входах АЦП :</i> - Напряжения на входе Y_i относительно AGND для дифференциального режима измерения на поддиапазонах “ ± 10 В”, “ ± 5 В”. - Среднее значение напряжения на входах X и Y для дифференциального режима на поддиапазонах измерения “ ± 2 В”, “ ± 1 В”, “ $\pm 0,5$ В”, “ $\pm 0,2$ В”. - Напряжения на входе GND32 относительно AGND для режима “с общей землей” и всех поддиапазонов измерения	$ U_X \leq \pm 1$ В $ (U_X + U_Y)/2 \leq \pm 1$ В $ U_{GND32} \leq \pm 1$ В
Разрядность аналого-цифрового преобразователя	16 бит
Разрядность данных АЦП после арифметической обработки (коррекция данных, усреднение данных)	24 бит
Пределы допускаемой приведенной основной погрешности измерений напряжения постоянного тока, %, в поддиапазонах: – 10; 5 и 2 В – 1 В – 0,5 В – 0,2 В	$\pm 0,05$ $\pm 0,07$ $\pm 0,1$ $\pm 0,2$
Собственный входной ток (по цепям X, Y или GND32) в одноканальном режиме, не более	0,4 мкА
Инжекция заряда во входную цепь АЦП (X, Y или GND32) в течение одной коммутации	2 пКл

Возможность коррекции данных (использование калибровочных коэффициентов)	Есть
Коэффициент подавления синфазного сигнала 50 Гц с амплитудой 1 В в дифференциальном режиме на поддиапазоне: ±10 В ±5 В ±2 В ±1 В ±0,5 В ±0,2 В	77 дБ 83 дБ 90 дБ 92 дБ 92 дБ 92 дБ
Устойчивость к перегрузкам входным измерительным сигналом по напряжению постоянного тока	±15 В
Пределы допускаемой относительной основной погрешности частоты преобразований АЦП	±0,005 %
Диапазон измерений напряжения переменного тока	От 0,2 мВ до 7 В

Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерений напряжения переменного тока

Диапазон частот входного сигнала, кГц	Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерений напряжения переменного тока, %
От 0,01 до 50 включ.	$\pm [0,15 + 0,02 \times (\frac{X_{AC}}{X} - 1)]$
Свыше 50 до 100 включ.	$\pm [0,3 + 0,02 \times (\frac{X_{AC}}{X} - 1)]$
Свыше 100 до 300 включ.	$\pm [1 + 0,03 \times (\frac{X_{AC}}{X} - 1)]$
Свыше 300 до 999	$\pm [5 + 0,05 \times (\frac{X_{AC}}{X} - 1)]$
Примечания: 1 Погрешность измерений напряжения переменного тока нормируется в дифференциальной схеме подключения L-502 при частоте преобразований АЦП 2000 кГц, для сигналов, пиковые значения которых не превышают значение установленного поддиапазона измерений. 2 X_{AC} – предел измерений напряжения переменного тока, $X_{AC} = \frac{X_K}{\sqrt{2}}$, где X_K – значение установленного поддиапазона измерений напряжения. 3 X_K – конечное значение установленного поддиапазона измерений напряжения. 4 X – значение измеряемого напряжения.	

Собственный входной шум АЦП

Ниже приведены типичные уровни шума без учёта факторов температурного и долговременного дрейфа нуля для 1-канального режима при закороченном входе АЦП.

Скорость ввода данных, кслов/с с одного канала АЦП	Коэффициент усреднения	Поддиапазон АЦП, В					
		±10	±5	±2	±1	±0,5	±0,2
		Типичное значение уровня шума, приведённого ко входу АЦП, мкВ					
2000	1	309	157	50	37	22	18
400	5	127	56	28	16	12	8
50	20	62	27	13	8	6	4
10	128	40	25	12	7	5	4

Межканальное прохождение АЦП

Сопротивление источника сигнала (в канале, в котором измеряется межканальное прохождение)	Время опроса канала, мкс (при коэффициенте усреднения, равном 1) или время установления канала, мкс					
	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0
	Межканальное прохождение, дБ (сигнала от предыдущего канала по порядку опроса)					
0-50 Ом	-65	-78	-82	-82	-82	-82
1 кОм	-35	-63	-73	-82	-82	-82
10 кОм	-5	-11	-22	-43	-74	-82

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)



ООО «Кузбассвязьуголь»

650070, Россия, г. Кемерово, ул. Свободы, 8
тел.: (3842) 440-271, факс: (3842) 440-466
e-mail: ksu@ksu42.ru
www.ksu42.ru
ОКПО 57619848 ОГРН 1034234002923
ИНН 4234007859 КПП 420501001

В диссертационный совет 24.2.321.01

650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Исх. № КСУ-00018/1 от 02.09.2025
на № _____ от _____

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования

ООО «Кузбассвязьуголь» дочернее предприятие АО «УК «Кузбассразрезуголь» сообщает, что результаты диссертационного исследования Швыдкина Сергея Анатольевича на тему «Оценка технического состояния несущих металлоконструкций карьерного автосамосвала по критерию живучести» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы в условиях филиала АО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» для получения сведений о дефектах, необходимых для проведения ремонта металлоконструкций карьерного автосамосвала.

Генеральный директор



К.В. Гаас