



# Мониторинг состояния несущих элементов стрел шагающих экскаваторов в процессе эксплуатации

Представлены результаты исследований по оценке возможности мониторинга состояния несущих элементов металлоконструкций экскаваторов – драглайнов на примере модели ЭШ-20.90 с использованием метода акустической эмиссии.

Submitted 12.07.19

Accepted 31.07.19

D. Yu. Kritsky<sup>1</sup>, V. V. Bardakov<sup>2</sup>, V. A. Syasko<sup>3,4</sup>

## Condition Monitoring of Stepping Excavators during Operation

The article describes the research into the feasibility of monitoring operation of load-bearing metal structures of dragline excavators (in terms of walking dragline excavator ESH-20/90) based on the acoustic emission method. Efficiency of equipping high-performance excavators with monitoring system for early detection of eventual failure points in metal structures and for prevention of accidents by that is substantiated. It is proposed to carry out monitoring using the nondestructive testing method of acoustic emission, well-reputed in other branches of industry and having a high potential in the dynamic equipment control. During the research, the on-stream diagnosis of ESH-20/90 dragline excavator was carried out using the method of acoustic emission. From the research data obtained in the active excavator, the main sources of acoustic noise affecting the monitoring accuracy were identified. The frequency band for the recording of acoustic emission at the optimal signal/noise ratio was selected. The most defect-prone elements of load-bearing metal structures of the excavator were identified. The failure location capability was proved for the elements operated in the conditions of increased noise and high dynamic loading.

*Keywords:* mining machines, technical state, dragline excavators, diagnosis, nondestructive testing, acoustic emission

Современные методы и средства неразрушающего контроля машин и механизмов в настоящее время довольно широко применяют в угольной промышленности для мониторинга технического состояния горнодобывающего и горнотранспортного оборудования. К этому обязывает Федеральный закон [1] с учётом сверхнормативных сроков службы горных машин, введённых в эксплуатацию еще в 1970–80-х гг.

Одними из основных типов горнотранспортного оборудования, широко используемых на угольных разрезах, являются шагающие экскаваторы (ЭШ). На угледобывающих предприятиях РФ эксплуатируется большое число одноковшовых экскаваторов — драглайнов, в том числе большой мощности: ЭШ-20.90, ЭШ-15.90. Их работа, как правило, осуществляется круглый год. При этом колебания температур в сочетании с постоянными циклическими нагрузками приводят к образованию и дальнейшему росту локальных усталостных дефектов в несущих элементах металлоконструкций стрел, изготовленных из труб с при-

менением сварки (рис. 1). Это, в свою очередь, снижает остаточный ресурс и в итоге может привести к полному разрушению конструкции [2–4].

События такого рода ведут к существенным финансовым потерям, связанным как с простоями оборудования, так и с затратами на ремонтные работы, а нередко сопряжены и с человеческими жертвами. Анализ аварийных ситуаций, возникающих при выходе из строя металлоконструкций драглайнов в АО «Разрез Назаровский» (входит в группу компаний «СУЭК»), показал, что восстановительные работы занимают весьма продолжительное время. При этом самые сложные и трудоёмкие работы возникают из-за повреждений стрел и подкосов (длительность восстановительных работ до 812 ч в 2016 г.), так как они сопровождаются большим объёмом демонтажнo-монтажных работ на высоте и несут повышенную опасность.

В свете изложенного возрастает необходимость в предварительной оценке технического состояния оборудования [5, 6].

**КРИЦКИЙ**  
**Дмитрий Юрьевич**

Начальник отдела эксплуатации и ремонта ГТО АО «СУЭК-Красноярск», Красноярск.

Внедрение систем удалённого мониторинга основного технологического оборудования, разработка методов повышения эксплуатации горных машин



**БАРДАКОВ**  
**Владимир Васильевич**

С. н. с. ООО «Интерюнис-ИТ», аспирант НИУ «МЭИ», Москва.

Основное направление научной деятельности — исследование акустической эмиссии при разрушении сложноструктурных материалов и разработка промышленных методик для их контроля



**СЯСЬКО**  
**Владимир Александрович**

Профессор кафедры «Приборостроение» Национального минерального университета «Горный», генеральный директор ООО «Константа» (Санкт-Петербург), д. т. н. Президент РОНКТД



<sup>1</sup> SUEK-Krasnoyarsk, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> INTERUNIS-IT LLC, Moscow, Russia; sales@interunis-it.ru

<sup>3</sup> CONSTANTA Ltd, St. Petersburg, Russia; 9334343@gmail.com

<sup>4</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

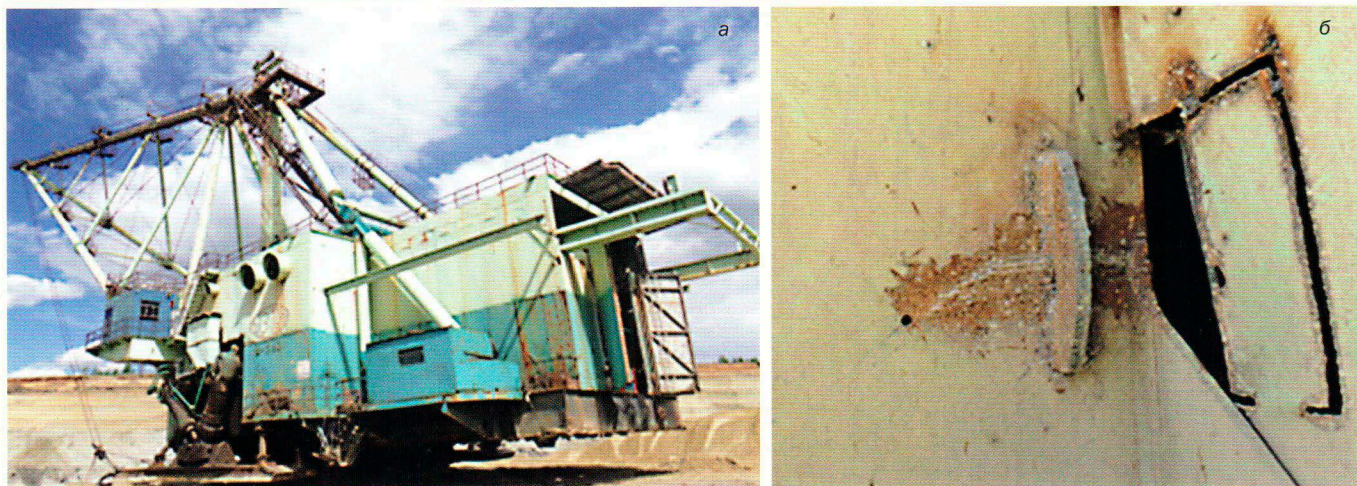


Рис. 1. Экскаватор драглайн (а) и отремонтированное (заваренное с усиливающим элементом) место трещины на вертикальной стойке (б)

В настоящее время на всех горных предприятиях в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей два раза в год проводят периодические диагностические обследования металлоконструкций драглайнов с использованием ультразвуковых методов НК. Однако они не позволяют фиксировать резкие изменения в состоянии конструкции в процессе эксплуатации, являются крайне трудоёмкими и также ведут к простоям.

Поэтому актуальной задачей является проведение мониторинга состояния металлоконструкций [7, 8]. На взгляд авторов представляется оптимальным решать данную задачу с использованием метода акустической эмиссии (АЭ).

Как известно, акустическая эмиссия — это класс явлений, заключающийся в излучении упругих волн, возникающих в процессе перестройки внутренней структуры твёрдых тел или переходных волн, вызванных тем же образом [9]. Классическим источником АЭ, излучающим акустические колебания, является растущая трещина.

Метод АЭ благодаря своей дистанционности не требует сканирования поверхности объекта, а позволяет при грамотном расположении нужного числа преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), удалённых на расстояние до десятков метров, проводить контроль всего объекта целиком, а также осуществлять локацию источника акустических волн.

Система АЭ-мониторинга состоит из трёх основных частей (рис. 2): измерительной части, которая включает в себя набор последовательно соединённых между собой цифровых многофункциональных измерительных модулей, к каждому из которых может быть подключено

до трёх ПАЭ, устанавливаемых на объект контроля; вычислительной части, которая реализуется в промежуточных и центральной вычислительных станциях; исполнительной части, которая включает в себя функции управления внешним исполнительным оборудованием, в данном случае не используемая.

Основными целями такой системы являются:

- повышение уровня эксплуатационной безопасности объектов, достигаемое за счёт выявления изменений технического состояния в режиме реального времени;
- своевременное обнаружение мест накопления повреждений, установление их характера и степени опасности;
- непрерывный контроль (мониторинг) технического состояния объектов в процессе их эксплуатации и слежения за факторами, влияющими на повреждаемость объекта.

Для определения возможности организации АЭ-мониторинга несущих элементов металлоконструкций экскаваторов-драглайнов в процессе эксплуатации компанией «СУЭК» совместно с ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» и ООО «КОНСТАНТА» на территории

АО «Разрез Назаровский» были проведены работы по предварительному диагностированию несущих металлоконструкций экскаватора ЭШ-20.90.

Экскаватор ЭШ-20.90 представляет собой выемочный агрегат на шагающем ходу со сложной канатной связью; машина имеет ковш вместимостью 20 м<sup>3</sup> и стрелу длиной 90 м. К несущим элементам металлоконструкций экскаватора относятся подкосы, нижний и верхний пояс стрелы, колонна (рис. 3). При этом наиболее нагруженными элементами, максимально подверженными образованию дефектов, являются подкосы.

В качестве диагностируемой машины выступал экскаватор, ранее имевший повреждение левого подкоса вблизи сварного шва. Для сбора данных использовали систему A-Line 32D DDM производства компании «ИНТЕРЮНИС-ИТ» в комплектации с 30 измерительными каналами, к каждому из которых подключался ПАЭ. В качестве ПАЭ применяли резонансные преобразователи GT200, имеющие полосу пропускания 140–200 кГц с резонансной частотой 165 кГц. ПАЭ были установлены на основные несущие элементы металлоконструкции: по 3 на левый и правый



Рис. 2. Структурная схема системы АЭ-мониторинга

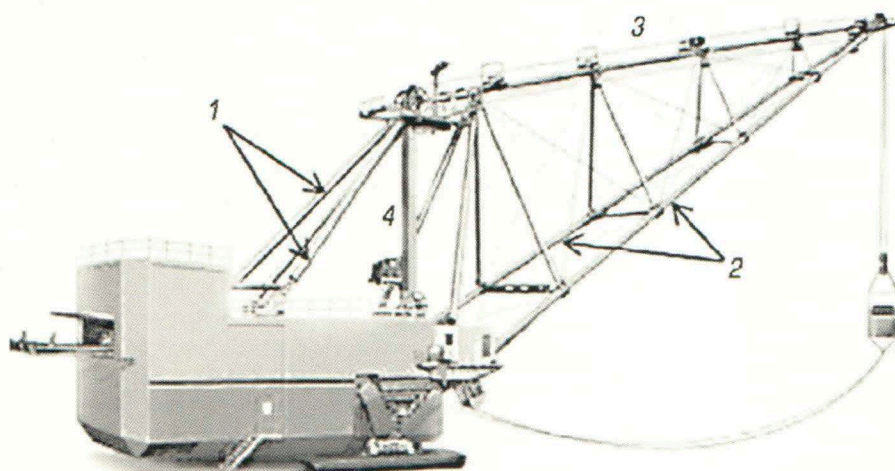


Рис. 3. Общий вид и конструктивные элементы экскаватора ЭШ-20.90: подкосы (1); нижний (2) и верхний (3) пояса стрелы; колонна (4)

подкосы, 8 на верхний пояс стрелы, 4 на нижний пояс стрелы, 4 на нижние подкосы и 3 на колонну. Дистанция между ПАЭ составляла от 5 до 15 м.

АЭ-диагностирование проводили без вывода экскаватора из эксплуатации. Сбор АЭ-данных осуществлялся непрерывно в течение двух суток.

Традиционно АЭ-контроль проводится для объектов, выведенных из эксплуатации. При этом достигается минимальный уровень акустических шумов, которые могут оказать влияние на результаты контроля. Процедура АЭ-контроля включает также нагружение объекта по определенной программе до уровня, превышающего рабочее давление. Степень опасности выявленных дефектов определяется при помощи стандартных нормированных критериев.

Однако правила не исключают проведения АЭ-контроля в режиме эксплуатации. В этом случае требуется разработка специализированной методики, которая должна учитывать влияние различных технологических и возможных акустических внешних шумов, а также особенности нагружения объекта в рабочем режиме, действие повреждающих факторов и возможные механизмы разрушения элементов конструкции.

Предварительные измерения, проводимые в стандартном для АЭ-контроля диапазоне частот 30–500 кГц, показали достаточно высокий уровень акустических шумов, связанных с непрерывной работой экскаватора. Они возникают при повороте стрелы, работе двигателя и т. д.

Традиционный пороговый способ разделения шумов и полезных АЭ-сигналов применительно к данной задаче не является эффективным в связи с высоким

уровнем шумов, которые занимали весь динамический диапазон измерительной системы.

Однако проблема устранения шумов может быть решена путём фильтрации. Поскольку механическим шумам соответствует более низкочастотный диапазон, чем сигналам от дефектов, то частотный диапазон регистрации данных был ограничен пределом от 150 до 500 кГц.

На рис. 4, а показана активность АЭ, зарегистрированная для ПАЭ, установленного на одном из подкосов, за временной интервал 30 мин при использовании частотного диапазона 150–500 кГц. Как видно, зависимости имеют циклический характер, синхронизированный с циклом работы драглайна. Пунктирными линиями на графиках показаны моменты времени, соответствующие наполнению ковша. Именно

в эти моменты времени регистрируется максимальная активность АЭ.

В подтверждение того, что характер изменения АЭ-данных соответствует цикличности работы экскаватора, на рис. 4б показан график суммы импульсов АЭ во времени для одного цикла работы драглайна, полученный для нескольких ПАЭ, установленных на различных конструктивных элементах: откосах, колонне, верхнем и нижнем поясах стрелы. На графике обозначены временные отрезки, соответствующие различным стадиям цикла работы драглайна: I — наполнение ковша; II — подъём ковша и поворот платформы; III — разгрузка ковша; IV — поворот в обратном направлении. Для преобразователей, установленных на различных элементах конструкции, отмечается один и тот же характер накопления импульсов АЭ, характеризующий накопление повреждений в элементах конструкции.

Импульсы АЭ, регистрируемые на стадиях I и III, соответствуют моментам нагружения и разгрузки конструкции. Регистрация импульсов на стадии I может быть вызвана подрастанием трещин, на стадии III — трением берегов трещины, возникающим при сбросе нагрузки. Зависимость числа импульсов от времени на участках I и III имеет ступенчатый характер, что косвенно подтверждает присутствие дефекта в диагностируемых элементах конструкции.

По результатам анализа линейной локации (зависимость числа слогированных импульсов АЭ на линии, соединяющей ПАЭ, установленные на объекте контроля) в ходе диагностирования для каждого из конструктивных элементов, за исключением нижнего пояса стрелы

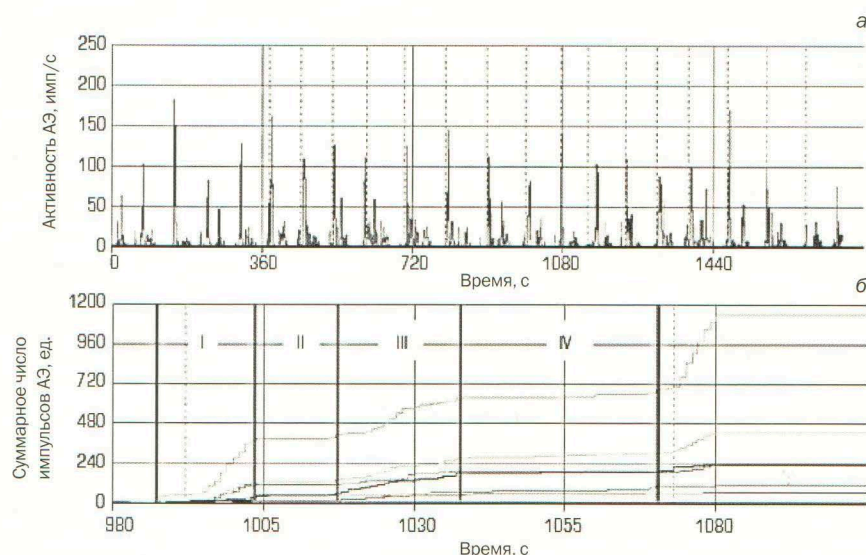


Рис. 4. Изменения активности АЭ (а) и суммы числа импульсов АЭ (б) во времени



Рис. 5. Расположение ПАЭ вблизи элементов крепления работающей лебёдки

и нижних подкосов, были выделены источники АЭ (возможные дефекты). При этом источники, зарегистрированные на колонне и верхнем поясе стрелы, как выяснилось, были сформированы шумовыми сигналами от работающей лебёдки, находящейся в непосредственной близости ПАЭ, и лоцировались в месте её крепления.

Для каждого из подкосов было выделено по три источника АЭ (рис. 6). При этом вблизи данных источников отсутствовали конструкции, которые могли бы привести к образованию ложного локационного кластера.

Координата по оси абсцисс на рис. 6 соответствует положению источников АЭ на поверхности подкоса, координата по оси ординат характеризует число импульсов АЭ, генерируемых дефектами. Компактные области, которым соответствует большое число импульсов АЭ, называются локационными кластерами, каждый локационный кластер характеризует источник АЭ. Так, например, для каждого из подкосов можно выделить по три локационных кластера, каждый из которых может являться потенциальным дефектом. Для левого подкоса координаты источников 0,5; 4,5 и 11,9 м, а для правого — 0,5; 3,7 и 10,3 м. При этом суммарное число слоцированных импульсов на левом подкосе превышает аналогичный показатель в сравнении с правым. Данный факт свидетельствует о том, что источники АЭ, расположенные на левом подкосе, являются наиболее активными (большая скорость развития дефекта).

После АЭ-диагностирования был назначен дополнительный ультразвуковой контроль на левом и правом подкосах в точках с координатами 11,9 и 10,3 м. Он выявил трещины протяжённостью 20 и 30 мм соответственно, расположенные в околосшовной зоне.

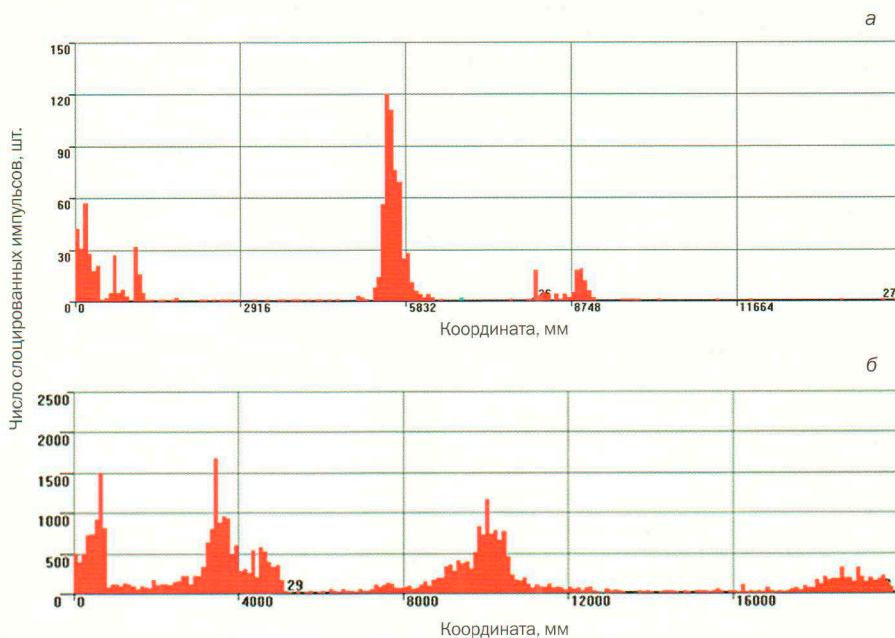


Рис. 6. Результаты локации источников АЭ на левом (а) и на правом (б) подкосах

### Заключение

По результатам предварительного АЭ-диагностирования несущих элементов металлоконструкций шагающего экскаватора была подтверждена возможность организации АЭ-мониторинга состояния подобного рода объектов:

- определён частотный диапазон, позволяющий получить оптимальное соотношение сигнал/шум;
- выявлена связь между АЭ-данными и циклической работой экскаватора;
- выделены несущие элементы металлоконструкций, наиболее подверженные дефектообразованию — подкосы;
- подтверждена работоспособность локации.

С учётом полученных результатов можно считать, что оснащение экскаваторов-драглайнов большой единичной мощности системами АЭ-мониторинга состояния может позволить заблаговременно выявлять места возможного разрушения. Это, в свою очередь, исключит риск внеплановых простоев и предупредит возникновение глобальных (невосстановимых) разрушений ответственных элементов металлоконструкций. Особую актуальность это имеет для горных машин со сверхнормативным сроком эксплуатации.

### Литература

1. О промышленной безопасности опасных производственных объектов / Федеральный закон от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ

(с изм. от 07.03.2017). URL: <http://docs.cntd.ru/document/9046058> (дата обращения: 15.09.2017).

2. Матвиенко Ю. Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. — М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. — 56 с.

3. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. — М.: Физматлит, 2006. — 328 с.

4. Махутов Н. А., Фомин А. В., Иванов В. И. и др. Комплексная диагностика предельных состояний и раннего предупреждения аварийных состояний конструкций. — Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2013. № 2. С. 25–31.

5. Дорошеев Ю. С., Киричук А. С. Проблемы повышения технологической надёжности горного оборудования. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. Отдельный выпуск № 4. Дальний Восток-1. С. 176–182.

6. Герике Б. Л., Абрамов И. Л., Герике П. Б. Инновационные пути обеспечения работоспособности горных машин на основе мониторинга их технического состояния. — Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. Отдельный выпуск № 7. Кузбасс. С. 228–240.

7. Proust A. In service acoustic emission monitoring of harbor cranes in order to program maintenance operations and insure safety management. — In: 32nd European Conf. on Acoustic Emission Testing. — Prague: Czech Society for NDT, 2016, p. 10.

8. Tamutus T. Structural Health Monitoring Case Studies from In-Service Structures. — In: Proc. of the 5th Internat. CANDU In-Service Inspection Workshop in conjunction.

9. ГОСТ Р ИСО 12716–2009. Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия. Словарь. — М.: Стандартинформ. 2011. — 12 с.

Статья получена 12 июля 2019 г.,  
в окончательной редакции — 31 июля