

# АКУСТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ ГОРНЫХ МАШИН

В. И. Князькина<sup>1</sup>, С. Л. Иванов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

**Аннотация:** Оценка риска отказа горной машины является самым важным этапом в реализации и модернизации добросовестной системы обслуживания. Требуется инновационный подход к выбору оптимальной и современной стратегии технического обслуживания, выступающей в роли фактора антидеградационного характера. В рамках такой свежей и комбинированной стратегии успешно зарекомендовали себя такие системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), как RCM (Reliability-Centered Maintenance) и RCM II (Risk-Based Maintenance). Разработана методика повышения работоспособности трансмиссий горных машин улучшением эксплуатационного режима смазки рабочих поверхностей ресурсопределяющих сопряжений. Описывается методика оценки остаточного ресурса крупномодульной открытой зубчатой передачи горной машины. Экспериментально подтверждено, что твердость поверхностного слоя металла деталей изменяется в зависимости от времени эксплуатации, то есть твердость поверхностного слоя можно использовать как параметр для мониторинга степени изношенности и остаточного ресурса деталей. Обоснована возможность повышения работоспособности и износостойкости ресурсопределяющих сопряжений трансмиссий горных машин формированием искусственных сред их функционирования и реновации лубриканта на основании оценки изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона в паре трения, генерируемого ресурсопределяющими сопряжениями.

**Ключевые слова:** горная машина, регламентные работы, стратегия технического обслуживания, трансмиссия, остаточный ресурс, степень износа, смазка, акустический сигнал ультразвукового диапазона, реновация лубриканта.

**Для цитирования:** Князькина В. И., Иванов С. Л. Акустический сигнал как показатель деградационных процессов при техническом обслуживании горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 223–236. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_223.

## Improvement of the system of maintenance and repair of mining machines according to the actual state

V. I. Knyazkina<sup>1</sup>, S. L. Ivanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia

**Abstract:** The risk assessment of mining machine failure is the most important step in the implementation and modernization of a good service system. A fresh and innovative approach

is required in relation to the selection of an optimal and modern maintenance strategy, acting as an anti-degradation factor. Within the framework of such a fresh and combined strategy, such maintenance and repair systems as RCM (Reliability-Centered Maintenance) and RCM II (Risk-Based Maintenance) have successfully proven themselves. A technique has been developed to improve the efficiency of transmissions of mining machines by improving the operating mode of lubrication of the working surfaces of resource-determining interfaces. The article describes a technique for assessing the residual life of a large-module open gear transmission of a mining machine. It has been experimentally confirmed that the hardness of the surface layer of the metal of parts that are in conjunction changes depending on the time of operation, that is, the hardness of the surface layer can be used as a parameter for monitoring the degree of wear and residual life of parts. The possibility of increasing the efficiency and wear resistance of resource-determining interfaces of transmissions of mining machines by the formation of artificial environments for their functioning and renovation of the lubricant is substantiated on the basis of an assessment of the change in the value of the acoustic signal of the ultrasonic range in a friction pair generated by resource-determining interfaces.

**Key words:** mining machine, preventive maintenance, maintenance strategy, transmission, residual life, lubricant, ultrasonic acoustic signal, lubricant renovation.

**For citation:** Knyazkina V. I., Ivanov S. L. Improvement of the system of maintenance and repair of mining machines according to the actual state. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6-2):223–236. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_223.

---

## Введение

Одним из основных условий достижения максимального производственного эффекта в горной промышленности является обеспечение своевременной и безотказной работы огромного количества разнообразной техники, входящей в общую, целостную технологическую цепочку. Поддержание важных и ответственных узлов горных машин в работоспособном состоянии достигается путём организации своевременных ремонтов и технического обслуживания и связано с большими материальными, трудовыми и финансовыми затратами. Повышение эффективности ремонтного производства зависит от быстроты внедрения новых, прогрессивных технологий, модернизированного оборудования, совершенствования организации производства и технологии ремонта производственного оборудования, роста производительности труда, правильного использования всех видов ресурсов, а также применения компьютерного моделирования и автоматизации процессов ремонта.

Комплексное развитие и механизация производственных открытых горных работ по обогащению и развитию минерально-сырьевого комплекса подразумевает совокупность взаимодействий и синхронную работу многочисленных средств механизации оборудования, которые в половине случаев обладают достаточно сложной структурой, предъявляющей высокие требования к уровню надежности горных машин [1 – 3]. Следствием низкого уровня надежности является интенсификация деградационных процессов, способствующих росту рисков аварийных отказов; незамедлительный рост трудоемкости ремонтных работ; резкий рост затрат на реализацию мер по их предупреждению и устранению последствий при неизменном подходе к восстановлению и поддержанию технического состояния оборудования в рамках традиционных и уже несколько устаревших простых (не комбинированных) стратегий технического обслуживания и ремонта горных машин. К такому классическому набору стратегий ТОиР для горнодобывающего обо-

рудования относятся практически все системы, объединенные стратегией технического обслуживания горных машин по факту отказа — стратегия эксплуатации до отказа (*Run-to-Failure (RTF)*) или стратегия эксплуатации до выхода из строя (*Run-to-Breakdown (RtB)*), а также стратегия предупредительного обслуживания или стратегия планового обслуживания (*Preventive Maintenance (PM)*). Последняя основана на планировании обслуживания по наработке или календарным интервалам времени и выборе момента проведения мероприятий ТОиР, осуществляемых по критерию достижения некоторого срока службы (*Time-Based Maintenance (TBM)*), рекомендованного производителем оборудования с учетом практики его использования в конкретных условиях эксплуатации. Практически все системы, объединенные стратегией обслуживания по фактическому техническому состоянию (*Condition-Based-Maintenance (CBM)*), трудно реализуемы из-за сложности эффективных систем диагностики, планирования ремонтных работ, значительных затрат на приборную базу, системы обработки информации, обучение персонала, включенности руководства в реализацию таких систем [4, 5]. В результате возникают актуальные на сегодняшний день вопросы о способах, развитии концепций технического обслуживания и ремонта горнодобывающего оборудования для развития минерально-сырьевой отрасли в рамках четвертой — комбинированной стратегии.

Целый ряд систем ТОиР можно отнести к модернизированным и современным, включающим комбинации подходов и приемов, которые характерны для вышеперечисленных простых стратегий. В рамках такого подхода успешно зарекомендовали себя такие системы ТОиР, как *RCM*

(*Reliability-Centered Maintenance*) — надежно-центрированная система предупреждения отказов, и *RCM II* (*Risk-Based Maintenance*) — система оценки и сопоставления допустимых рисков и снижения их последствий, которая исповедует принцип проведения необходимых процедур в рамках ТОиР лишь в случае, если затраты на проведение профилактических ремонтных работ меньше, чем потери от возможного отказа, или система проактивного технического обслуживания — *Proactive Maintenance Strategy*, основанная на философии эволюционного развития дефектов с учетом влияния внешних и внутренних факторов, включая и человеческий [6—8].

Целью настоящей работы является выявление закономерностей изменения акустического сигнала трения ультразвукового диапазона частот ресурсопределяющих сопряжений трансмиссий горных машин, а также подтверждение того, что твердость поверхностного слоя металла деталей можно использовать как параметр для мониторинга степени изношенности и остаточного ресурса элементов трансмиссии для научно-обоснованного технического решения по повышению работоспособности горного оборудования путем ранней диагностики повреждений в элементах его трансмиссии и улучшения эксплуатационного режима смазки, в рамках осуществления оптимальной стратегии технического обслуживания и ремонта, планирования регламентных работ горных машин по фактическому состоянию.

### **Методы**

Для исключения аварийных отказов открытых зубчатых передач на большинстве предприятий горнопромышленной отрасли придерживаются системы планово-предупредительных ремонтов. Данная система не позволяет

получать полный финансовый эффект от эксплуатируемых деталей, так как их замена происходит по заранее составленному графику и не учитывает текущее техническое состояние. Независимо от стратегии технического обслуживания весомую часть в ней занимают смазочно-заправочные работы. Своевременная и эффективная смазка подвижных соединений горных машин способствует повышению их надежности и работоспособности, однако тяжелые условия эксплуатации — значительные динамические и статические нагрузки, продукты износа, запыленность атмосферы, высокая влажность и изменение температуры окружающей среды, особенно при производстве открытых горных работ, приводят к интенсивному загрязнению масел и смазок, превращая их в агрессивный и абразивный материал. Так, в неблагоприятных условиях эксплуатации загрязненность масел в системах смазки трансмиссий горных машин достигает предельно допустимого уровня уже за треть нормативного периода наработки для замены масла [8, 9]. При этом эксплуатация оборудования с повышенной концентрацией загрязнений в масле приводит к интенсивному изнашиванию его ресурсопределяющих узлов и отказу оборудования. Как следствие, увеличиваются простои агрегатов, время на техническое обслуживание, рост эксплуатационных затрат [10, 11].

В ресурсопределяющих сопряжениях трансмиссий горных машин контакт в зацеплении происходит по линии, но скольжение рабочих профилей зубьев друг по другу при передаче даже номинальных усилий формирует на их поверхности зоны местного разогрева с мгновенной температурой от 150°C до 600°C [12 — 14]. Даже в таких условиях эксплуатации эффективная смазка должна гарантировать

разделение трущихся поверхностей, их охлаждение при заданном коэффициенте трения, не допускать задиоров и заеданий, то есть минимизировать интенсификацию естественных деградационных процессов элементов трансмиссий, вместе с тем, лубрикант должен иметь стабильную вязкость, низкую температуру застывания, хорошие противокоррозионные свойства.

В связи с этим остро стоит проблема создания системы мониторинга технического состояния открытых зубчатых передач и модернизации мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту [12, 13].

Чтобы спрогнозировать момент критического состояния зубчатой передачи в трансмиссии горной машины, необходим анализ основных процессов, которые протекают в изделии и могут привести к отказу. Есть множество изделий, использующихся в горной промышленности, у которых основным механизмом развития отказа выступает последовательное накопление повреждений. Для отслеживания процесса деградации должны быть выбраны параметры, косвенно либо напрямую связанные с процессом деградации материала, из которого изготовлена наша деталь, и выявлены закономерности их изменения, включая закономерности накопления отдельных «единичных» повреждений и валидность выбранных показателей протекаемым процессам [15, 16].

Для того, чтобы выявить наиболее информативные параметры и источники исходных данных, которые понадобятся для расчета остаточного ресурса, необходимо проанализировать, в каких именно условиях эксплуатируется открытая зубчатая передача. Такой подход позволит достоверно прогнозировать величину остаточного ресурса передачи.

Для реализации возможности определения остаточного ресурса передачи необходимо подобрать определенные численные параметры и в ходе эксплуатации оборудования вести наблюдения за выбранными параметрами. Периодические либо непрерывные наблюдения позволят выявить время наступления предельного состояния передачи [17, 18].

Для выявления закономерностей изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона от угловой скорости вращения применительно к ресурсоопределяющим сопряжениям трансмиссий горных машин был создан стенд, посредством которого возможно физическое моделирование работы подобных сопряжений (рис. 1).

Стенд содержит станину, состоящую из вертикальной стойки и опорной плиты, консоли, на которой закреплены шпиндель и электродвигатель, вертикальную стойку с перемещаемым кронштейном со столом с установленным на нем основанием, на котором расположен узел трения, состоящий из верхнего вращающегося индентора в виде цилиндра, устанавливаемого

в шпиндель, и опорного узла, в котором размещается подпятник с контртелом.

Как показали экспериментальные исследования авторов, хорошо согласующиеся с результатами, представленными в независимых источниках, рабочие поверхности зубьев зубчатых передач имеют тенденцию к повышению твердости, образуя наклепанный слой, что можно использовать как параметр для оценки их остаточного ресурса. Предельным состоянием открытой зубчатой передачи, которая эксплуатируется в запыленной среде, является:

1) уменьшение толщины зуба не более чем на 0,2 модуля зацепления. Необходимо производить контроль толщины зубьев во время эксплуатации в рамках проведения мероприятий технического обслуживания;

2) увеличение твердости рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес не более чем на 0,8 [HV<sub>пр</sub>] в характерных точках зуба. Необходимо производить контроль твердости рабочих поверхностей твердомером;

3) одновременно нужно вести контроль параметров, показывающих кос-

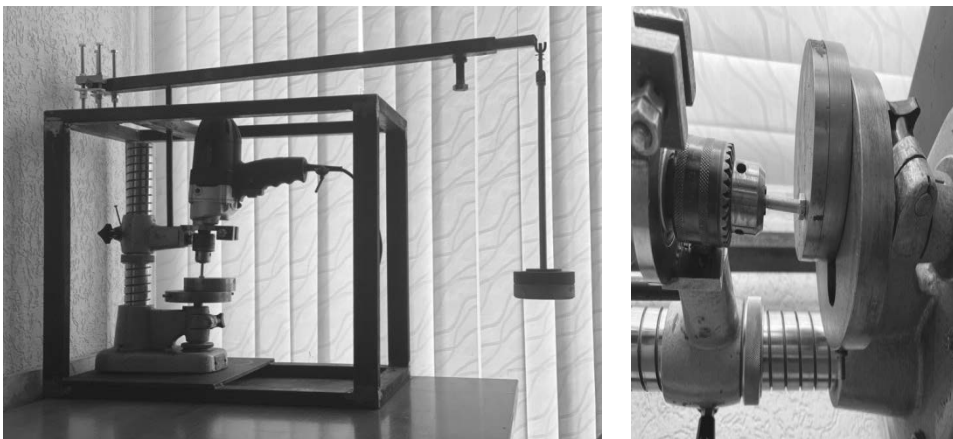


Рис. 1. Стенд для оценки трения в контакте ресурсоопределяющих элементов трансмиссии «индентор–контртело»

Fig. 1. Bench for evaluation of friction in the contact of resource-determining elements of transmission "indenter-counterbody"

венные признаки наступления предельного состояния (уровень вибрации, температура узла трения и др.) [18].

При контроле выбранного основного параметра важно обеспечивать полный объём данных и достоверность полученной информации. Контрольные измерения проводятся в рамках технического обслуживания, а их результат заносят в стандартные источники данных, предусмотренные на предприятии.

По этому принципу можно устанавливать критерии качества и давать гарантированный срок наработки изделия. Все это реализуемо в случае, если повторные измерения фиксируют монотонные изменения параметра с увеличением наработки детали.

### Результаты

Современный уровень развития испытаний на трение и изнашивание характеризуется большим разнообразием схем испытаний по оценке смазочной способности масел и смазок. Лабораторные испытания сводятся к получению необходимой информации об объекте с использованием его модели [8]. Трибологические процессы, протекающие

в трансмиссии, сопровождаются безвозвратными деградационными потерями при силовом взаимодействии ее элементов, одним из таких каналов являются звуковые колебания трения в ультразвуковом диапазоне частот, отражающие как характер трения, так и состояние смазки, а также коэффициент трения в паре трения [19]. В качестве искусственной среды функционирования использовались смазки «ТМ-5-18» и «Mobil ATF 3309». Давление в контакте изменялось от 0,773 МПа до 9,01 МПа при угловой скорости вращения шпинделя в пределах от 30,89 рад/с до 60,2 рад/с.

Изменения величины акустического сигнала внешнего трения в ультразвуковом диапазоне частот в паре трения ресурсопределяющих сопряжений проводились анализатором ресурса подшипниковых узлов АРП-11 на стенде для оценки трения в контакте ресурсопределяющих элементов трансмиссии «индентор-контртело». В процессе эксперимента замерялась величина показателя  $D$ , соответствующего величине акустического сигнала, формируемого в контакте.

На рис. 2 показано изменение величины акустического сигнала в аку-

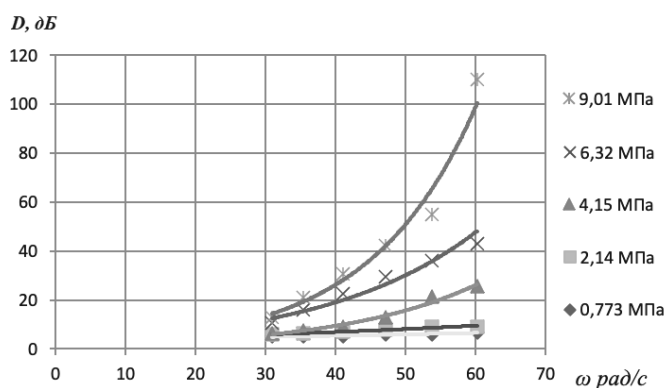


Рис. 2. Смазка «ТМ-5-18» — зависимости акустического сигнала от угловой скорости в паре трения при различных давлениях

Fig. 2. Lubricant «ТМ-5-18» — dependences of acoustic signal on angular velocity in the friction pair at different pressures

стико-эмиссионном диапазоне частот, выраженном через показатель  $D$ , для различных угловых скоростей вращения индентора при постоянных величинах давления во время протекания процесса трения в контактируемых ресурсоопределяющих сопряжениях для смазки «ТМ-5-18». Эксперимен-

тальные данные прошли обработку и получили среднегармоническую оценку трех измерений величины показателя  $D$ . Далее результаты были аппроксимированы степенной функцией.

Анализ полученных экспериментально данных позволяет сделать вывод

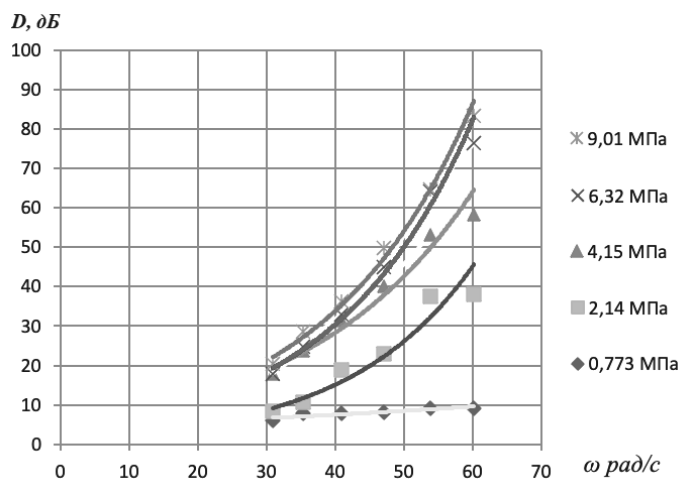


Рис. 3. Смазка «Mobil ATF 3309» – зависимости акустического сигнала от угловой скорости в паре трения при различных давлениях

Fig. 3. Lubricant «Mobil ATF 3309» – dependences of acoustic signal on angular velocity in the friction pair at different pressures

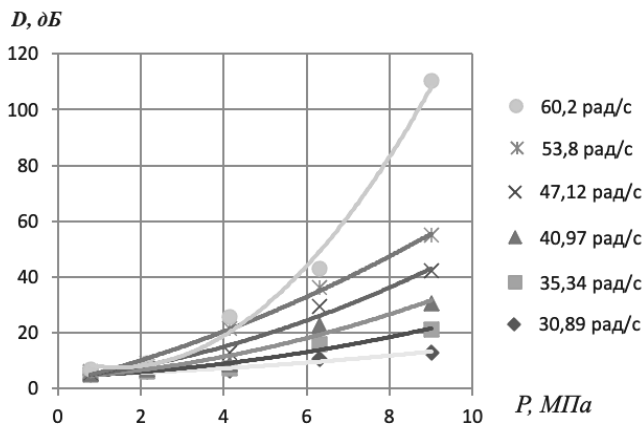


Рис. 4. Смазка «ТМ-5-18» – зависимости акустического сигнала от давления в паре трения при различных угловых скоростях

Fig. 4. Lubricant «ТМ-5-18» – dependences of acoustic signal from pressure in the friction pair at different angular velocities

о том, что при высоких давлениях (свыше 6 МПа) увеличение величины угловой скорости влечет за собой постепенное увеличение показателя  $D$  и переход от режима жидкостного трения в режим полусухого или сухого трения.

Очевидно, что величина давления в паре трения в значительной степени влияет на изменение характера трения, а следовательно, и интенсивности деградационных процессов.

Аналогично проведена оценка закономерностей, представленных на рис. 3, для смазки «Mobil ATF 3309». Для данного масла трибологические процессы менее интенсивны.

Подобный характер изменения величины акустического сигнала имеет смазка «ТМ-5-18» (рис. 4) при изменении давления в паре трения при фиксированных угловых скоростях вращения.

Что касается смазки «Mobil ATF 3309» (рис. 5), то здесь имеет место экстремум, говорящий о более стабильной работе пары трения в искусственной среде, создаваемой данной смазкой.

По результатам вышеописанных экспериментов возможно констатировать, что для рассмотренных смазок «ТМ-5-18» и «Mobil ATF 3309» области граничного трения при исследуемом диапазоне угловых скоростей ограничены давлением в паре, не превышающем 4–6 МПа. При высоких нагрузках и скоростях с применением смазки «ТМ-5-18» наблюдается резкий рост показателя  $D$ , что является индикатором нецелесообразности применения данного лубриканта в указанных условиях, при этом «Mobil ATF 3309» допускает применение при более высоких скоростях, делая ее предпочтительнее для быстроходных подвижных соединений, в частности быстроходных передач [17].

Далее было принято решение продолжить исследование зависимостей

изменения акустического сигнала ультразвукового диапазона от удельной нагрузки и скорости в паре трения и провести эксперимент по выявлению закономерностей с консистентной смазкой «NCS-ECF Let-lub» (рис. 6 и рис. 7).

Алгоритм хода действий проведения эксперимента с консистентными смазками оставался прежним, как и с образцами масел.

На рис. 6 и 7 продемонстрированы результаты изменения величины акустического сигнала, выраженной через показатель  $D$ , для последовательного ряда давлений в паре трения при заданных угловых скоростях для смазки «NCS-ECF Let-lub».

**Обсуждение.** Аналогично предыдущим опытам были зафиксированы резкие изменения сигнала при переходе от границы жидкостного трения к полужидкостному и в конечном итоге к сухому трению. В эксперименте с консистентной смазкой смена границ трения более резкая, как при возрастании давления в контакте и увеличении угловой скорости, что указывает на важность адекватной оценки состояния работы трансмиссии горной машины и ее элементов при высоких воспринимаемых технологических нагрузках карьерной техники. При фиксации повышенного сигнала, а следовательно резкого перехода к сухому трению, необходимо срочно принимать меры в рамках технического обслуживания. Таким образом, изменения акустического сигнала ультразвукового диапазона от давления в паре трения и угловой скорости для масел и смазок имеют подобные тенденции, что подтверждено экспериментально.

Кроме того, в ходе эксперимента удалось выявить наиболее информативные контакты, позволяющие реализовать автономную систему технического обслуживания и диагностирования,



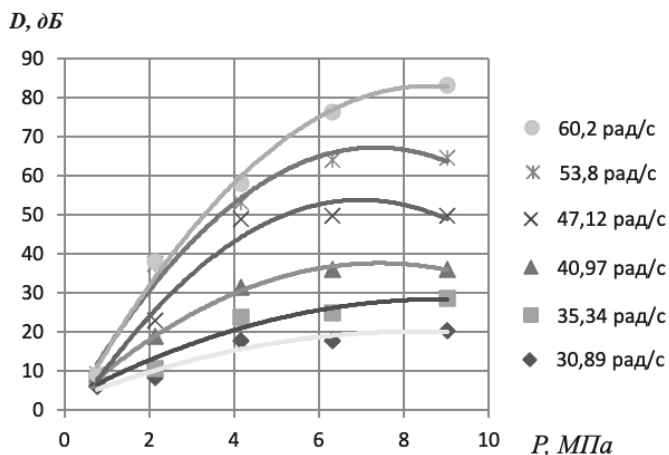


Рис. 5. Смазка «Mobil ATF 3309» – зависимости акустического сигнала от давления в паре трения при различных угловых скоростях  
 Fig. 5. Lubricant «Mobil ATF 3309» – dependences of acoustic signal from pressure in the friction pair at different angular velocities

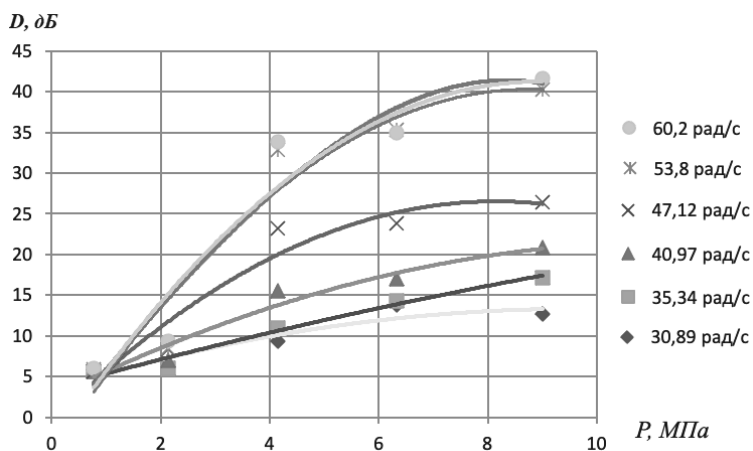


Рис. 6. Смазка «NCS-ECF Let-lub» – зависимости акустического сигнала от давления в паре трения при различных угловых скоростях  
 Fig. 6. Lubricant «NCS-ECF Let-lub» – dependences of acoustic signal from pressure in the friction pair at different angular velocities

между датчиком акустико-эмиссионного сигнала трения и корпусом редуктора карьерного экскаватора.

Вместе с тем АРП-11 позволяет формировать базы данных о состоянии оборудования, что дает возможность фиксировать деграционные процессы

в динамике, это позволяет для бортовых систем диагностики фиксировать сигналы акустико-эмиссионного диапазона для выявления на ранней стадии дефектов и повреждений в трансмиссиях гидравлических и электрических карьерных экскаваторов.

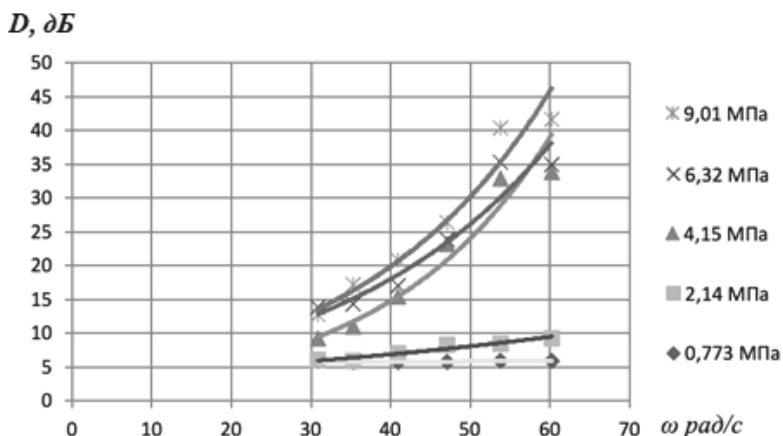


Рис. 7. Смазка «NCS-ECF Let-lub» – зависимости акустического сигнала от угловой скорости в паре трения при различных давлениях

Fig. 7. Lubricant «NCS-ECF Let-lub» – dependences of acoustic signal on angular velocity in the friction pair at different pressures

Все технологические операции, связанные с техническим обслуживанием горнодобывающего оборудования, целесообразно проводить по месту функционирования оборудования. Своевременная замена трансмиссионного масла и технических жидкостей в приводе карьерного экскаватора является главным элементом в обслуживании любых горных машин.

На основании полученных данных представляется целесообразным ориентироваться на применение акустического сигнала ультразвукового диапазона для проведения работ как по оценке состояния подвижных соединений и узлов динамического оборудования, так и своевременной замене или добавлению лубриканта в рамках технического обслуживания, либо применения мер по восстановлению среды функционирования путем проведения своевременных мероприятий по регенерации трансмиссионного масла, что требует дальнейшего развития бортовых систем диагностики и обслуживания карьерной техники.

### Заключение

Обоснована возможность повышения работоспособности и износостойкости ресурсопределяющих сопряжений трансмиссий горных машин формированием искусственных сред их функционирования и реновации лубриканта на основании оценки изменения величины акустического сигнала ультразвукового диапазона в паре трения, генерируемого ресурсопределяющими сопряжениями.

Разработана методика повышения работоспособности трансмиссий горных машин улучшением эксплуатационного режима смазки рабочих поверхностей ресурсопределяющих сопряжений. Проведены экспериментальные исследования процесса изнашивания элементов трансмиссии горной машины на специально созданном и модернизированном для этой цели стенде, оснащённом аттестованными и поверенными приборами. Показано подобие проявления фрикционных процессов для различного вида лубриканта, оцениваемых изменением акустиче-

ского сигнала ультразвукового диапазона от удельной нагрузки и скорости в паре трения, выявлено что в рамках стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию возможно осуществлять и планировать регламентные работы по техническому обслуживанию горной техники и ее ремонту, на оценочных данных акустического сигнала ультразвукового диапазона при функционировании трансмиссий горных машин, для выявления дефектов их ресурсоопределяющих сопряжений.

Экспериментально установлено, что интенсивность протекания трибологических процессов, оцениваемых показателем  $D$ , при увеличении скорости скольжения для базового трансмиссионного масла описывается экспоненциальной функцией и при изменении давления квадратичной функцией, вместе с тем применение смазочных масел с соответствующими присадками и модификаторами трения с учетом вязкости позволяют обеспечивать нормальную работу сопряжений, снизив значение акустического сигнала  $D$  ультразвукового диапазона частот в 3–5 раз по сравнению с базовым

маслом. Что касается консистентных смазок, то функции изменения показателя  $D$  возможно описывать экспоненциальной функцией при детерминированном изменении скорости скольжения и квадратичной функцией — для изменяемого давления в соединении.

Выявлено, что в рамках стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию возможно осуществлять и планировать регламентные работы по техническому обслуживанию горной техники и ее ремонту, на оценочных данных акустического сигнала ультразвукового диапазона при функционировании трансмиссий горных машин, для выявления дефектов их ресурсоопределяющих сопряжений.

#### **Вклад авторов**

*Князькина В. И.* — генерация идеи исследования, анализ результатов исследования и подготовка данных.

*Иванов С. Л.* — генерация идеи исследования и постановка задачи исследования, анализ результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Андреева Л. И.* Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 4. — С. 83–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.

2. *Вавилов А. В., Яцкевич В. В., Максименко А. Н.* Методы оценки технического состояния при диагностировании механических и гидромеханических трансмиссий строительно-дорожной и транспортной техники // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2012. — №1 (34). — С. 5–12.

3. *Васильченко В.* Диагностика технического состояния гидропривода мобильных машин [Электронный ресурс]: [сайт] . [2020] URL: <https://os1.ru/article/7222-diagnostics-tehnicheskogo-sostoyaniya-gidroprivoda-mobilnyh-mashin> (дата обращения: 15.04.2021).

4. *Великанов В. С.* Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. — 2020. — Т. 241. — С. 29–33. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.29.

5. Герике П. Б., Герике Б. Л. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 2. – С. 17–22. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-17–22.

6. Дрыгин М. Ю. Анализ систем технического обслуживания и ремонта горного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 2. – С. 35–43. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-35–43.

7. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Набиуллин Р. Ш., Хорошавин С. А. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 156–168. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-4-0–156.

8. Кудреватых А. В., Ащеулов А. С., Ащеулова А. С. Сравнительная характеристика процесса износа редукторов экскаваторов и карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 5. – С. 51–56. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-5-51–56.

9. Лелиовский К. Я. Влияние уровня и наличия смазочных материалов в коробках передач транспортных средств на величины их вибрации // Транспортные системы. – 2019. – № 3 (13). – С. 30–37.

10. Мислибаев И. Т., Махмудов А. М., Махмудов Ш. А. Теоретическое обобщение режимов функционирования и моделирование эксплуатационных показателей работы экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 1. – С. 102–110. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0–102–110.

11. Москвичев В. В., Ковалев М. А. Исследование показателей надежности основных групп оборудования карьерных гидравлических экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 7. – С. 96–112. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-7-0–96.

12. Andreeva L. I., Krasnikova T. I. Integral estimation of the activity of the maintenance department of the mining company. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020, no. 1., pp. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044044.

13. Bley T., Pignanelli E., Schütze A. Multi-channel IR sensor system for determination of oil degradation, 2014, vol. 5, pp. 121–132.


14. Dindarloo R., Siami-Irdemoosa E., Frimpong S. Measuring the effectiveness of mining shovels, Mining Engineering. 2016, vol. 68, no. 3., pp. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.19150/me.6501>.

15. Garneau C., Duchesne S., St-Hilaire A. Comparison of modelling approaches to estimate trapping efficiency of sedimentation basins on peatlands used for peat extraction. Ecological Engineering. 2019, vol. 133, pp. 60–68. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.025>.

16. Horáčková Š. Historical changes and vegetation development after intensive peat extraction in the lowland mires of Slovakia. Applied Ecology and Environmental Research. 2018, no. 4, pp. 5025–5045. DOI: 10.15666/aeer/1604\_50255045.

17. Knyazkina V. I., Safronchuk K. A., Ivanov S. L., Pumpur E. V. Assessment of the state of a lubricator by the size of the acoustic signal in a loaded pair of friction of a mining machine transmission. Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1515, pp. 1–5. DOI: 0.1088/1742-6596/1515/5/052037.

18. Kuvshinkin S. U., Zvonarev I. E., Ivanova P. V. Relationship of Dynamic Properties of Mine Excavator Hoisting Mechanism versus Design Parameters of Operating Equipment. Journal of Physics: Conference Series. 2018, no. 1., pp. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012054.

19. Yang Z., Baraldi P., Zio E. A Novel Method for Maintenance Record Clustering and Its Application to a Case Study of Maintenance Optimization. Reliability Engineering & System Safety. 2020, vol. 203, pp. 103–107. DOI: 10.1016/j.ress.2020.107103. 

## REFERENCES

1. Andreeva L. I. The choice of a strategy for the maintenance of mining equipment // News of higher educational institutions. *Mining Journal*, 2021, no. 4, pp. 83–91. [In Russ]. DOI: 10.21440 / 0536-1028-2021-4-83–91.
2. Vavilov A. V., Yatskevich V. V., Maksimenko A. N. Methods for assessing the technical condition when diagnosing mechanical and hydromechanical transmissions of road-building and transport equipment. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2012, no. 1 (34), pp. 5–12. [In Russ].
3. Vasilchenko V. Diagnostics of the technical condition of the hydraulic drive of mobile machines. URL: <https://os1.ru/article/7222-diagnostics-tehnicheskogo-sostoyaniya-gidroprivoda-mobilnyh-mashin> (date accessed: 15.04.2021)
4. Velikanov V. S. Forecasting the loading of the working equipment of a mining excavator using a fuzzy logistic model. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, no. 241, pp. 29–33. [In Russ]. DOI: 10.31897 / pmi.2020.1.29.
5. Guericke P. B., Guericke B. L. Formation of a unified diagnostic criterion for assessing the technical condition of mining equipment. *Mining equipment and electromechanics*. 2021, no. 2., pp. 17–22. [In Russ]. DOI: 10.26730 / 1816-4528-2021-2-17–22.
6. Drygin M. Yu. Analysis of maintenance and repair systems for mining equipment. *Mining equipment and electromechanics*. 2020, no. 2, pp. 35–43. [In Russ]. DOI: 10.26730 / 1816-4528-2020-2-35–43.
7. Komissarov A. P., Lagunova Yu. A., Nabiullin R. Sh., Khoroshavin S. A. Digital model of the process of excavation of rocks by the working equipment of a quarry excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 156–168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-4-0–156.
8. Kudrevatykh A. V., Ashcheulov A. S., Ashcheulova A. S. Comparative characteristics of the wear process of gearboxes of excavators and mining dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2020, no. 5, pp. 51 – 56. [In Russ]. DOI: 10.26730 / 1816-4528-2020-5-51–56.
9. Leliovskiy K. Ya. Influence of the level and availability of lubricants in gearboxes of vehicles on the values of their vibration. *Transport systems*. 2019, no. 3 (13), pp. 30–37. [In Russ].
10. Mislibaev I. T., Makhmudov A. M., Makhmudov Sh. A. Theoretical generalization of operating modes and modeling of operational indicators of excavators. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 102–110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0–102–110.
11. Moskvichev V. V., Kovalev M. A. The study of reliability indicators of the main groups of equipment for open-pit hydraulic excavators. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 7, pp. 96–112. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-7-0–96.
12. Andreeva L. I., Krasnikova T. I. Integral estimation of the activity of the maintenance department of the mining company. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 1. DOI: 10.1088 / 1757–899X / 709/4/044044.
13. Bley T., Pignanelli E., Schütze A. Multi-channel IR sensor system for determination of oil degradation, 2014, vol. 5, pp. 121–132.
14. Dindarloo R., Siami-Irdemoosa E., Frimpong S. Measuring the effectiveness of mining shovels. *Mining Engineering*, 2016, vol. 68, no. 3., pp. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.19150/me.6501>.
15. Garneau C., Duchesne S., St-Hilaire A. Comparison of modelling approaches to estimate trapping efficiency of sedimentation basins on peatlands used for peat extraction. *Ecological Engineering*. 2019, vol. 133, pp. 60–68. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.04.025.
16. Horáčková Š. Historical changes and vegetation development after intensive peat extraction in the lowland mires of Slovakia. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2018, no. 4, pp. 5025–5045. DOI: 10.15666/aeer/1604\_50255045.

17. Knyazkina V. I., Safronchuk K. A., Ivanov S. L., Pumpur E. V. Assessment of the state of a lubricator by the size of the acoustic signal in a loaded pair of friction of a mining machine transmission. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1515, pp. 1–5. DOI: 0.1088/1742–6596/1515/5/052037.

18. Kuvshinkin S. U., Zvonarev I. E., Ivanova P. V. Relationship of Dynamic Properties of Mine Excavator Hoisting Mechanism versus Design Parameters of Operating Equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, no. 1, pp. 1–6. DOI:10.1088/1742–6596/1118/1/012054.

19. Yang Z., Baraldi P., Zio E. A Novel Method for Maintenance Record Clustering and Its Application to a Case Study of Maintenance Optimization. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020, vol. 203, pp. 103–107. DOI: 10.1016/j.res.2020.107103.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Князькина Валерия Ивановна* — аспирант кафедры машиностроения,  
<https://orcid.org/0000-0002-4062-3048>,

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: [knyazkina.valeriya.94@mail.ru](mailto:knyazkina.valeriya.94@mail.ru);

*Иванов Сергей Леонидович* — докт. техн. наук, профессор кафедры Машиностроения,  
<https://orcid.org/0000-0002-7014-2464>,

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: [lisa\\_lisa74@mail.ru](mailto:lisa_lisa74@mail.ru).

**Для контактов:** *Князькина Валерия Ивановна*, e-mail: [knyazkina.valeriya.94@mail.ru](mailto:knyazkina.valeriya.94@mail.ru).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Knyazkina V. I.*, Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering,  
<https://orcid.org/0000-0002-4062-3048>,

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia,  
e-mail: [knyazkina.valeriya.94@mail.ru](mailto:knyazkina.valeriya.94@mail.ru);

*Ivanov S. L.*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering,  
<https://orcid.org/0000-0002-7014-2464>,

Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia,  
e-mail: [lisa\\_lisa74@mail.ru](mailto:lisa_lisa74@mail.ru).

**Corresponding author:** *Knyazkina Valeria Ivanovna*, e-mail: [knyazkina.valeriya.94@mail.ru](mailto:knyazkina.valeriya.94@mail.ru).

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 08.04.2022; принята к печати 10.05.2022.

Received by the editors 14.01.2022; received after the review 08.04.2022; accepted for printing 10.05.2022.

