



DOI: 10.18721/JEST.25211  
УДК 622.271.4

*В.И. Князькина, С.Л. Иванов*

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

## **ДИАГНОСТИКА И ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ТРАНСМИССИЙ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ**

Рассмотрен вопрос совершенствования системы диагностирования технического состояния трансмиссий карьерных экскаваторов и продления срока службы их рабочих жидкостей на основании оценки величины и характера изменения акустического сигнала  $D$  ультразвукового диапазона в подвижных соединениях элементов трансмиссии при ее работе. Количество и качество смазки определяет величину показателя  $D$ , и позволяет принимать решения о своевременности замены, либо утилизации отработанного трансмиссионного масла, при реализации технологии регламентных работ в рамках стратегии технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию. Даны рекомендации по совершенствованию оценки технического состояния узлов и пар трения механических трансмиссий оборудования. Представлены результаты эксперимента по изменению показателя  $D$  в паре трения от величины давления в контакте и угловой скорости. Предложен блок очистки трансмиссионного масла в системах карьерного экскаватора. Дано описание его принципа действия.

*Ключевые слова:* карьерный экскаватор, техническое обслуживание, ремонт, узлы трения, смазка, акустический сигнал, трансмиссия.

*Ссылка при цитировании:*

В.И. Князькина, С.Л. Иванов. Диагностика и продление срока службы трансмиссий карьерных экскаваторов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 141–148. DOI: 10.18721/JEST.25211.

*V.I. Knyazkina, S.L. Ivanov*

Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg, Russia

## **DIAGNOSING AND EXTENDING USEFUL LIFE OF TRANSMISSIONS IN MINING EXCAVATORS**

The study considers the issues related to improving the system for diagnosing the technical condition of mining excavator transmissions and extending the service life of their working fluids based on assessment of magnitude and nature of changes in the acoustic signal  $D$  of the ultrasonic range in moving parts of transmission elements during its operation. The quantity and quality of the lubricant determines the value of the indicator  $D$ , and allows to make decisions about timely replacement or disposal of used transmission oil when implementing the technology of routine work within the framework of maintenance and repair strategy based on the actual conditions. Recommendations are given for improving the assessment of technical conditions of components and friction pairs of mechanical transmissions of equipment. The results of the experiment on changing the  $D$  index in a friction pair as a function of pressure in the contact and the angular velocity are presented. A block for cleaning transmission oil in mining excavator systems is proposed. A description of its operating principles is given.

*Keywords:* mining excavator, maintenance, repair, friction units, lubrication, acoustic signal, transmission.

*Citation:*

V.I. Knyazkina, S.L. Ivanov, Diagnosing and extending useful life of transmissions in mining excavators, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (2) (2019) 141–148, DOI: 10.18721/JEST.25211.

**Введение.** На сегодняшний день развитие горнодобывающей отрасли невозможно представить без эксплуатации и применения горных машин повышенной надежности горнодобывающего оборудования. В наиболее тяжелых условиях работают экскаваторы открытых разрезов. Как правило, это машины большой единичной мощности и габаритов с механическими и гидравлическими трансмиссиями. Жесткие погодные условия эксплуатации, сложные горно-геологические условия, трудоемкость и не комфортность проведения работ по техническому обслуживанию ремонту обуславливают снижение их наработки между отказами, способствуя интенсификации деграционных процессов и повышению рисков аварийных отказов оборудования и в первую очередь их трансмиссий [1–4].

**Целью работы** является разработка системы оценки характера процесса трения подвижных соединений и уровня их деградации для своевременного проведения технического обслуживания обеспечивающего продление срока службы трансмиссий карьерных экскаваторов на основе их акустической диагностики и регенерации лубриканта.

#### **Принципы оценки условий смазки подвижных соединений**

Как показали исследования авторов, только среди подшипников трансмиссий – 67 % всех отказов связано с недостатком или загрязнением смазки, 16 % – с некачественным проведением регламентных работ по монтажу и креплению подшипников и лишь 10,5 % – собственно с износом и естественными повреждениями подшипников при их эксплуатации.

В условиях эксплуатации лишь технология и технологические процессы, сопровождающие систему технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) способствуют восстановлению ресурса оборудования и определяют эффективность поддержания машины в работоспособном состоянии. При этом значительным весом и тру-

доемкостью среди работ ТО и Р имеют смазочно-заправочные работы. Автоматическая система смазки подвижных элементов и сопряжений машин способна значительно сократить трудоемкость смазочно-заправочных работ. Однако для оптимизации процессов проведения смазочно-заправочных работ и управления ими смазку необходимо проводить на основании оценки технического состояния подвижных соединений.

Элементы пары трения при их кинематическом взаимодействии способны генерировать сигналы внешнего трения [5–8], включающий в себя три вида сигналов, составляющие которых могут быть зафиксированы в ультразвуковом диапазоне частот, совокупность которых комплексно фиксируется показателем  $D$ : автоколебания вызванные изменениями условий сопряжения твердых тел; эмиссионные сигналы, формируемые пластическим деформированием, структурно-фазовой перестройкой и разрушением поверхностей трения; поверхностные волны. Фиксируемый показатель  $D$  представляет собой математическое ожидание амплитуды акустического сигнала генерируемого в подвижном сопряжении при силовом взаимодействии его элементов и, при прочих равных условиях, определяется количеством и качеством лубриканта кинематической пары, а сам звуковой сигнал от комплекса перечисленных выше факторов и фиксируемый в ультразвуковом диапазоне является интегральной оценкой состояния контролируемого подвижного соединения, включая условия и характер смазки [4, 5, 9–12].

Сравнение величины этого показателя с соответствующими граничными значениями в зависимости от условий работы и величины износа подвижного соединения при контроле его технического состояния, позволяет осуществлять управляющее воздействие проведением мероприятий по своевременной замене и пополнению смазки, регенерации масел и рабочих жидкостей непосредственно на борту машины и, даже в автоматическом режиме [13–15].



Таким образом, наиболее полное использование возможностей карьерных экскаваторов с одновременным повышением их надежности может быть осуществлено внедрением в технологический процесс технического обслуживания и ремонта операций по диагностике технического состояния трансмиссий горных машин, и перехода к стратегии обслуживания по фактическому состоянию.

#### Экспериментальное определение характера изменения среднего значения уровня звукового сигнала $D$ в подвижном соединении.

При оценке смазывающей способности масел необходимо достоверно определять характер трения в контакте. Величина среднего значения уровня звукового сигнала  $D$ , фиксируемая в ультразвуковом диапазоне частот в полной мере позволяет оценить, как характер трения в кинематической паре. Эксперименты проводились на машине трения типа УМТ в смазочной среде при вращении верхнего образца по неподвижному нижнему образцу при заданной нагрузке. Угловые скорости и давление в паре детерминировано изменялись при параллельном измерении показателя  $D$  для получения общей картины о закономерностях

изменения характера трения в заданных условиях для ряда масел. Изменения величины акустического сигнала в ультразвуковой полосе частот, излучаемого парой трения, велось прибором АРП 11 (ООО «МЕТКАТОМ»).

В ходе эксперимента были заданы шесть уровней угловых скоростей при пяти уровнях давления в паре трения. Обработанные результаты экспериментов представлены на рис. 1 для базового масла И-20. Из полученных результатов видно, что имеется устойчивая тенденция возрастания величины показателя  $D$  при росте угловой скорости. По стабильности величины этого сигнала при неизменных скорости, давлении и его величине можно судить о характере трения в паре, соответственно – жидкостном, граничном или сухом. Жидкостное трение характеризуется малой величиной сигнала и его стабильностью и реализуется при малых давлениях и не высоких скоростях. Износ при этом виде трения минимален. Различие лишь интенсивности нарастания величины показателя  $D$ . Однако, переход к сухому трению при высоких скоростях происходит уже при небольших значениях давления, при этом при малых скоростях в паре трения сохраняются нормальные условия даже при значительных давлениях в контакте.

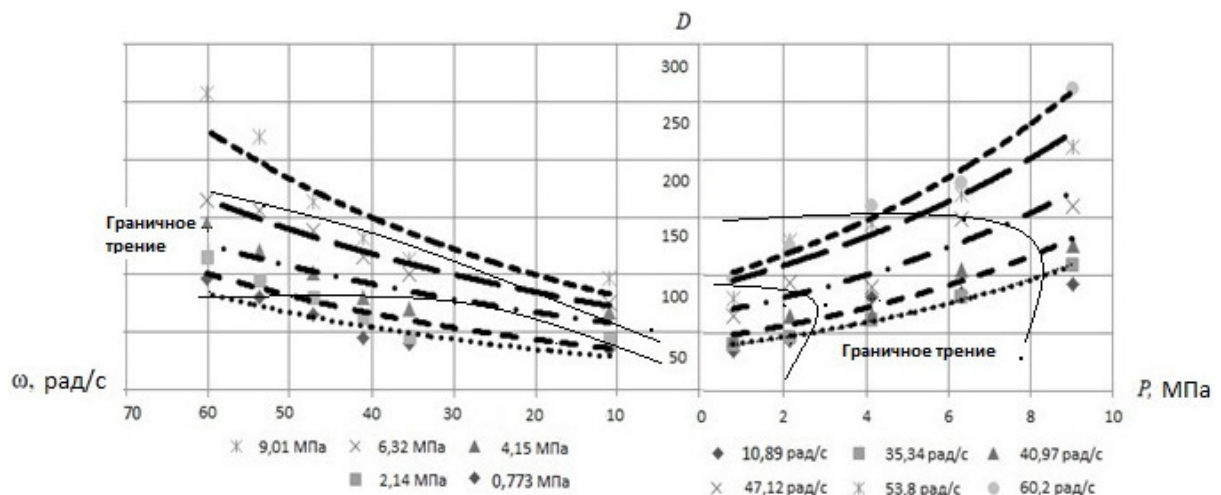


Рис. 1. Изменение величины комплексного показателя  $D$  сигнала внешнего трения для базового масла И-20 от угловой скорости и давления в паре трения

Fig. 1. The change in the value of the complex index  $D$  of the external friction signal for the base oil I-20 from the angular velocity and pressure in the friction pair

Аналогичные эксперименты проводились для масел И-20 с присадками, 75w, 85W и 90. Для этих масел тенденция изменения показателя  $D$  была аналогичной, а отличие имело место лишь в соответствующих значениях, при этом ожидаемо, масла с большей вязкостью и без присадок имели меньшие значения измеряемого показателя. Введение в масла металлической меди в виде тонкодисперсного порошка также резко снижало значения показателя  $D$  при прочих равных условиях. Наличие абразива и засоренность масла также легко фиксируется при таком способе диагностики, вызывая увеличение уровня акустического сигнала, фиксируемого как показатель  $D$ .

Таким образом экспериментально установлена возможность фиксировать, по средством показателя  $D$ , деградационные процессы в динамике по величине и характеру изменения акустического сигнала в ультразвуковой полосе частот от процесса трения в контролируемых ресурсопределяющих подвижных соединениях для выявления на ранней стадии дефектов и повреждений в трансмиссиях гидравлических и электрических карьерных экскаваторах, оценивать состояние смазочных и рабочих сред ресурсопределяющих узлов трения и, при включении подобных датчиков в бортовые системы диагностики, управлять системами смазки и их регенерации. Как пример, рассмотрим

#### **Применение ультразвука при регенерации масел в период проведения регламентных работ техники**

Учитывая габариты и места расположения тяжелой горной техники открытых разработок, технологические операции по техническому обслуживанию, целесообразно проводить по месту его функционирования. Смазочно-заправочные операции для таких машин как карьерный экскаватор превышают треть временных и трудовых затрат на проведение сервисных операций. Своевременная

замена или регенерация масел и технических жидкостей карьерного экскаватора определяет долговечность основных силовых систем, как механических, так и гидравлических трансмиссий. Не своевременная замена или регенерация смазочных рабочих сред ведет к интенсификации износных и коррозионных процессов насосов, гидродвигателей, цилиндров и их элементов, снижению объемного КПД гидросистем из-за износа клапанов, дросселей, золотниковых пар, подшипников, зубчатых передач, уплотнений, шарниров, а ранняя замена – к серьезным материальным потерям. При этом транспортировка, хранение, сбор и утилизация отработанных масел, их замена новыми в условиях открытых разработок – затратна и связана с серьезными рисками. Поэтому наиболее экономически выгодным в этих условиях является регенерация отработанных масел [13, 16, 17].

При регенерации отработанных масел в соответствии с ГОСТ Р 56828.42-2018, необходимо снизить концентрации механических примесей и воды до допустимых значений. Наиболее энергоэффективным способом очистки масла от механических примесей и воды является подведение к нему колебаний ультразвуковой частоты свыше 20 кГц, что способствует образованию высокоскоростных кумулятивных струй и интенсификации процесса движения жидкой фазы через поры и каналы тонких фильтров, а также появлению акустических потоков, способствующих направленному выносу первичных и вторичных продуктов окисления.

Проведенные авторами лабораторные испытания подтвердили тот факт, что основным параметром, определяющим эффективность регенерации, является интенсивность ультразвуковых колебаний, а главным конструктивным параметром устройства – поток ультразвуковой энергии, равный произведению интенсивности ультразвуковых колебаний на площадь воздействия. Обеспечение же режи-

ма регенерации отработанного масла возможно при условии, если отрицательное звуковое давление будет превышать прочность жидкости на разрыв.

На основании результатов проведенных исследований отработана конструкция автономного блока для регенерации отработанных трансмиссионных масел. Отработанное масло загружается в приемную емкость блока и из нее под действием ультразвуковых колебаний очищаемое масло в виде воздушно-парового потока перемещают в промежуточную емкость, а твердые включения остаются в приемной емкости откуда при достаточном накоплении принудительно убираются. Для интенсификации процесса и снижения его энергоемкости предложено осуществляется нагрев масла посредством СВЧ излучения в промежуточной емкости до температуры порядка 80 °С. Замена традиционных контактных способов нагрева на бесконтактный с использованием энергии СВЧ колебаний позволяет добиться более интенсивного нарастания температуры при большей равномерности нагрева. Дополнительная дегазация и удаление примесей происходит на завершающем этапе очистки масла при прохождении его через ультразвуковой блок к фильтру тонкой (1...10 мкм) очистки и далее очищенное и восстановленное масло поступает в сливную емкость.

Общий вид блока представлен на рис. 2.

Блок имеет мощность 0,3 кВт, рабочая частота генератора 35 кГц, температура реализации процесса – 60 °С, время потребное для регенерации литра 1...3 минуты. Предложенный блок регенерации масел смазочно-заправочного агрегата целесообразно применять при проведении регламентных работ ТО и Р машин открытых разработок и, в частности, карьерных экскаваторов. А управление таким блоком возможно по результатам диагностических процедур с последующей оценкой состояния смазки по величине и характеру

акустического сигнала, фиксируемого как показатель  $D$  на тестовом узле трения гидравлической или механической трансмиссии.

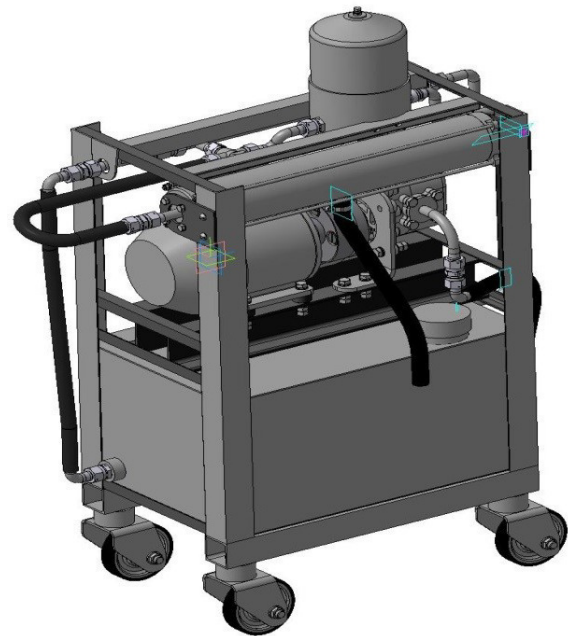


Рис. 2. Автономный блок регенерации отработанных масел

Fig. 2. Autonomous unit for the regeneration of waste oils

### Заключение

- Экспериментальными исследованиями подтверждена возможность оценки технического состояния и свойств лубриката трансмиссий карьерных экскаваторов по величине и характеру изменения акустического сигнала.
- Предложена конструкция блока регенерации масла и рабочих жидкостей с использованием ультразвуковых колебаний с одновременной фильтрацией лубриката, которую целесообразно применять в виде автономных установок.
- Совокупность применения акустической диагностики и регенерации лубриката существенно продлевают срок службы трансмиссий карьерных экскаваторов.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Герике П.Г.** Поиск предпосылок для создания единого диагностического критерия оценки предельного технического состояния горной техники // Известия Уральского государственного горного университета. 2016. № 4 (44). С. 63–67
- [2] **Пумпур Е.В., Иванов С.Л.** Применение агрегатно-узлового метода при обслуживании горной техники // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: 14-я Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. В 2 т. Т. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 214–219.
- [3] **Чуксин А.И., Иванов С.Л.** Политика управления отказами // Актуальные проблемы машиноведения, безопасности и экологии в природопользовании: сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции, 17–18 мая. В 2-х т. Т. 1, Тверь: Тверской государственный технический университет, 2018. С. 286–296.
- [4] **Иванов С.Л. [и др.].** Экспериментальная оценка состояния трансмиссии на стенде с замкнутым потоком мощности // Горное оборудование и электромеханика, 2009. № 9. С. 31–34.
- [5] **Князькина В.И., Иванов С.Л.** Экспериментальные измерения величины акустико-эмиссионного сигнала в паре трения для оценки состояния трансмиссий горных машин // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики. Т. 1: матер. 13-й Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики / под ред. Р.А. Ковалева. Тула: Тульский государственный университет, 2–3 ноября 2017 года. С. 140–144.
- [6] **Князькина В.И., Иванов С.Л., Тяктев М.М.** Выявление закономерностей изменения акустико-эмиссионного сигнала в парах трения горных и нефтепромысловых машин // Master's journal. Журнал магистров № 1. Пермь: ПНИПУ, 2018. С. 32–36.
- [7] **Носов В. В., Зеленский Н. А., Матвиев И. В., Ямилова А. Р.** АЭ диагностирование прочностного состояния сварных соединений // Горный информационно-аналитический бюллетень Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2017. № 4, Т 2. С. 391–400.
- [8] **Nosov V.V.** Control of inhomogeneous materials strength by method of acoustic emission // Journal of Mining Institute. 2017. Vol. 226. P. 469–479 DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469
- [9] **Федоров Д.Д., Потапенко В.С.** Анализ и тенденции развития систем акустико-эмиссионной диагностики подшипниковых узлов // Транспорт Урала. 2006. № 3(10). С. 15–19.
- [10] **Christophe Donnet, Ali Erdemir Editors.** Tribology of Diamond-Like Carbon Films Fundamentals and Applications / University Institute of France and University Jean Monnet Laboratoire Hubert Curien UMR 5513 18 avenue Professeur Benoît Lauras 42000 Saint-Etienne, France. Argonne National Laboratory Energy Systems Division 9700 South Cass Avenue Argonne, IL 60439, USA. 2008, Springer Science + Business Media, L. 664 p.
- [11] Lubrication Trucks and Equipment. Anatomy of an ORO Lubrication Truck Brochure. URL: [http://www.orodesign.ca/ORO\\_lube\\_brochure.pdf](http://www.orodesign.ca/ORO_lube_brochure.pdf) (дата обращения: 01.02.2019).
- [12] **Ivanov S.L., Shishkin P.V.** Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation // 2017 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 87 022009.
- [13] **Мухин Д.В., Вольсков Д.Г.** Разработка методики прогнозирования срока службы моторных масел // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 33–37.
- [14] **Sung Chul Cha, Ali Erdemir Editors.** Coating Technology for Vehicle Applications / Sung Chul Cha Materials Development Center R&D. Ali Erdemir Argonne National Laboratory Energy Systems Division Argonne, IL, USA. Division, Hyundai Motor Group Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 240 p.
- [15] **Yuansheng J., Shenghua L.** Superlubricity of in situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of  $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$  / Superlubricity. Edited by Ali Erdemir Argonne National Laboratory. Argonne, USA and Jean-Michel Martin Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France. B.V. Elsevier, 2007. P. 445–469.
- [16] **Князькина В.И.** Автономная система регенерации отработанного масла // Инновации на транспорте и в машиностроении: сб. тр. VI Международ. науч.-практ. конф. Т. V / под ред. В.В. Максарова; отв. ред. Д.А. Задков. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. С. 45.
- [17] **Петушко И.В.** Электротехнологические проблемы повышения эффективности оборудования для ультразвуковой обработки жидких и твердых сред // Металлообработка. 2003. № 2. С. 16–23.



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КНЯЗЬКИНА Валерия Ивановна** – аспирант Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: knyazkina.valeriya.94@mail.ru

**ИВАНОВ Сергей Леонидович** – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: lisa\_lisa74@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 11.03.2019

## REFERENCES

- [1] **P.G. Gerike**, Poisk predposylok dlya sozdaniya yedinogo diagnosticheskogo kriteriya otsenki predelnogo tekhnicheskogo sostoyaniya gornoy tekhniki, *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 4 (44) (2016) 63–67.
- [2] **Ye.V. Pumpur, S.L. Ivanov**, Primneneniye agregatno-uzlovogo metoda pri obsluzhivanii gornoy tekhniki, *Sotsialno-ekonomicheskiye i ekologicheskiye problemy gornoy promyshlennosti, stroitelstva i energetiki: 14-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya po problemam gornoy promyshlennosti, stroitelstva i energetiki. V 2 t. T. 1: mater. konf. Tula: Izd-vo TulGU, (2018) 214–219.*
- [3] **A.I. Chuksin, S.L. Ivanov**, Politika upravleniya otkazami, *Aktualnyye problemy mashinovedeniya, bezopasnosti i ekologii v prirodopolzovanii: sb. nauch. tr. IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 17–18 maya. V 2-kh t. T. 1. Tver: Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet, (2018) 286–296*
- [4] **Ivanov S.L. [i dr.]**, Eksperimentalnaya otsenka sostoyaniya transmissii na stende s zamknutym potokom moshchnosti, *Gornoye oborudovaniye i elektromekhanika*, 9 (2009) 31–34
- [5] **V.I. Knyazkina, S.L. Ivanov**, Eksperimentalnyye izmereniya velichiny akustiko-emissionnogo signala v pare treniya dlya otsenki sostoyaniya transmissiy gornyykh mashin, *Sotsialno-ekonomicheskiye i ekologicheskiye problemy gornoy promyshlennosti, stroitelstva i energetiki. T. 1: mater. 13-oy Mezhdunar. Konf. po problemam gornoy promyshlennosti, stroitelstva i energetiki. Pod red. R.A. Kovaleva. Tula: Tulskiy gosudarstvennyy universitet, 2–3 noyabrya, (2017) 140–144.*
- [6] **V.I. Knyazkina, S.L. Ivanov, M.M. Tyaktev**, Vyyavleniye zakonornostey izmeneniya akustiko-emissionnogo signala v parakh treniya gornyykh i neftepromyslovykh mashin, *Master's journal. Zhurnal magistrrov № 1. Perm: PNIPU, (2018) 32–36.*
- [7] **V.V. Nosov, N.A. Zelenskiy, I.V. Matviyan, A.R. Yamilova**, AE diagnostirovaniye prochnostnogo sostoyaniya svarykh soyedineniy, *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 4 (2) (2017) 391–400.
- [8] **V.V. Nosov**, Control of inhomogeneous materials strength by method of acoustic emission, *Journal of Mining Institute*, 226 (2017) 469–479 DOI: 10.25515/PMI.2017.4.469
- [9] **D.D. Fedorov, V.S. Potapenko**, Analiz i tendentsii razvitiya sistem akustiko-emissionnoy diagnostiki podshipnikovyykh uzlov, *Transport Urala*, 3 (10) (2006) 15–19.
- [10] **Christophe Donnet, Ali Erdemir Editors**, *Tribology of Diamond-Like Carbon Films Fundamentals and Applications / University Institute of France and University Jean Monnet Laboratoire Hubert Curien UMR 5513 18 avenue Professeur Benoît Lauras 42000 Saint-Etienne, France. Argonne National Laboratory Energy Systems Division 9700 South Cass Avenue Argonne, IL 60439, USA. 2008, Springer Science + Business Media, L.*
- [11] *Lubrication Trucks and Equipment. Anatomy of an ORO Lubrication Truck Brochure. URL: [http://www.orodesign.ca/ORO\\_lube\\_brochure.pdf](http://www.orodesign.ca/ORO_lube_brochure.pdf) (accessed February 01, 2019).*
- [12] **S.L. Ivanov, P.V. Shishkin**, Integral criterion of mining machines technical condition level at their operation, 2017 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 87 022009.
- [13] **D.V. Mukhin, D.G. Volskov**, Razrabotka metodiki prognozirovaniya sroka sluzhby motornykh masel, *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2 (2016) 33–37.
- [14] **Sung Chul Cha, Ali Erdemir Editors**, *Coating Technology for Vehicle Applications / Sung Chul Cha Materials Development Center R&D. Ali Erdemir*

Argonne National Laboratory Energy Systems Division Argonne, IL, USA. Division, Hyundai Motor Group Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea. Springer International Publishing Switzerland, 2015.

[15] **J. Yuansheng, L. Shenghua**, Superlubricity of in situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of Mg<sub>6</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub> / Superlubricity. Ed. by Ali Erdemir Argonne National Laboratory. Argonne, USA and Jean-Michel Martin Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France. B.V. Yelsevier, (2007) 445–469.

[16] **V.I. Knyazkina**, Avtonomnaya sistema regeneratsii otrabotannogo masla, Innovatsii na transporte i v mashinostroyenii: sb. tr. VI Mezhdunar. nauch.-praktich. konfer. T. V. Pod red. V.V. Maksarova; otv. red. D.A. Zadkov. SPb.: Natsionalnyy mineralno-syryevoy universitet «Gornyy», (2016) 45.

[17] **I.V. Petushko**. Elektrotekhnologicheskiye problemy povysheniya effektivnosti oborudovaniya dlya ultrazvukovoy obrabotki zhidkikh i tverdykh sred, Metalloobrabotka, 2 (2003) 16–23.

#### THE AUTHORS

**KNYAZKINA Valeriia I.** – *Saint-Petersburg mining university*

E-mail: knyazkina.valeriya.94@mail.ru

**IVANOV Sergei L.** – *Saint-Petersburg mining university*

E-mail: lisa\_lisa74@mail.ru

**Received: 11.03.2019**