П.Б. Герике // P.B. Gericke
am_besten@mail.ru
канд. техн. наук, доцент, Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово пр. Ленинградский , 10
C.Sc. (Engineering), Associate Professor Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, Russian Federation.

Б.Л. Герике // B. L. Gericke
gbl_42@mail.ru
доктор техн. наук, профессор, Институт угля Федерального Исследовательского Центра угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово пр. Ленинградский – 10, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650026, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
doctor of technical sciences, professor Institute of Coal of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, 10 Leningradsky Prospect, Kemerovo, Russian Federation. T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Vesennyaya street 28, Kemerovo, Russian Federation

УДК 681.518.5

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ МАШИН

SOME RESULTS OF THE ANALYSIS OF MEDIUM-TERM FORECASTING OF THE TECHNICAL CONDITION OF MINING MACHINERY

В рамках данной статьи приводятся некоторые результаты среднесрочного прогнозирования процессов изменения технического состояния оборудования горных машин, полученные на основе комплексного подхода к анализу параметров вибрации. Использование в качестве параметров среднесрочной прогнозной модели разработанных оригинальных единых диагностических критериев позволило осуществлять прогноз изменения технического состояния объектов диагностирования на шестьдесят календарных дней, что полностью удовлетворяет потребности действующей на предприятиях угольной отрасли РФ системы управления ремонтами горной техники. Обобщить результаты использования единых диагностических критериев, полученные в результате комплексного анализа параметров вибрации на энерго-механическом оборудовании электрических карьерных экскаваторов. На примере экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ с использованием единых диагностических критериев проиллюстрировать оценку процессов развития наиболее распространенных дефектов роторного оборудования горных машин. Доказать эффективность применения алгоритмов среднесрочного прогнозирования, позволяющих наглядно оценить риски возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации горной техники. В рамках настоящей работы использовался комплексный подход к анализу параметров виброакустических волн, генерируемых при работе динамического оборудования горной техники, включая спектральный анализ в стандартном и расширенном частотном и динамическом диапазонах, анализ характеристики выбега, эксцесса и анализ огибающей спектра. Доказана эффективность выбранных диагностических методологий применительно к решению задачи по разработке единых диагностических критериев, создаваемых с учетом конструктивных особенностей и специфики условий эксплуатации объектов диагностирования на основе оптимальной скаляризации результатов эксперимента. Полученные научные результаты свидетельствуют об эффективности предложенной методологии создания единых диагностических критериев, пригодных для использования в качестве диагностических параметров среднесрочной прогнозной математической модели. Применение на практике результатов оценки и прогнозирования процессов изменения технического состояния оборудования предельно изношенных горных машин предоставит возможности для оптимизации транспортных и логистических процессов, что, в свою очередь, позволит открыть окно инновационных возможностей для реализации в условиях угольных предприятий Кузбасса базовых элементов системы обслуживания горной техники по ее фактическому техническому состоянию.

Within the framework of this article, some results of medium-term forecasting of the processes of changing the technical condition of mining machinery equipment are presented, obtained on the basis of an integrated

approach to the analysis of vibration parameters. The use of the developed original unified diagnostic criteria as parameters of the medium-term forecast model made it possible to forecast changes in the technical condition of diagnostic facilities for sixty calendar days, which fully meets the needs of the mining equipment repair management system operating at the enterprises of the coal industry of the Russian Federation. To summarize the results of the use of unified diagnostic criteria obtained as a result of a comprehensive analysis of vibration parameters on the power-mechanical equipment of electric quarry excavators. Using the example of EKG and ESH excavators using common diagnostic criteria, to illustrate the assessment of the development processes of the most common defects in the rotary equipment of mining machines. To prove the effectiveness of the use of algorithms for medium-term forecasting, allowing to visually assess the risks of emergency situations during the operation of mining equipment. In the framework of this work, an integrated approach was used to analyze the parameters of vibroacoustic waves generated during the operation of dynamic mining equipment, including spectral analysis in the standard and extended frequency and dynamic ranges, analysis of run-out characteristics, kurtosis and analysis of the envelope of the spectrum. The effectiveness of the selected diagnostic methodologies is proved in relation to solving the problem of developing unified diagnostic criteria created taking into account the design features and specifics of the operating conditions of diagnostic facilities based on optimal scalarization of experimental results. The obtained scientific results indicate the effectiveness of the proposed methodology for creating unified diagnostic criteria suitable for use as diagnostic parameters of a medium-term predictive mathematical model. The practical application of the results of the assessment and forecasting of the processes of changing the technical condition of the equipment of extremely worn-out mining machines will provide opportunities for optimizing transport and logistics processes, which, in turn, will open a window of innovative opportunities for the implementation of basic elements of the maintenance system of mining equipment according to its actual technical condition in the conditions of Kuzbass coal enterprises.

Ключевые слова: *ВИБРОДИАГНОСТИКА, СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ДЕФЕКТЫ ПОДШИПНИКОВ, ГОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ.*

Key words: *VIBRATION ANALYSIS, MEDIUM-TERM FORECASTING, ROLLING BEARING DEFECTS, MINING EQUIPMENT, MAINTENANCE MANAGEMENT.*

Введение.

Одноковшовые электрические карьерные экскаваторы являются на сегодняшний день основой экскаваторного парка Кузбасса, при этом весьма значительная часть данной техники выработала свой нормативный ресурс и подлежит регулярному прохождению процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Сегодня в мировой практике отсутствуют полностью универсальные прогностические математические модели, которые могли бы с достаточной степенью вероятности спрогнозировать развитие деградационных процессов на энерго-механическом оборудовании сложной горной техники с использованием результатов неразрушающего контроля и анализа параметров вибрации, включая все стадии развития дефектов как механической, так и электрической природы. Главными причинами этого остаются сложность корреляции экспериментально полученных данных и недостаточная изученность вопросов динамики энерго-механического оборудования горной техники [1, 2, 3, 4, 5].

Выявлению характеристик предельного состояния оборудования горных машин и созданию единых диагностических критериев для оценки и прогнозирования процессов изменения технического состояния оборудования горной техники посвящена научная работа, выполненная совместно учеными ФИЦ УУХ СО РАН и КузГТУ в рамках гранта РФФИ и Кемеровской области №20-48-420010. В настоящей статье без претензий на полноту освещения предпринята попытка обобщить результаты среднесрочного прогнозирования деградации технического состояния горных машин, полученные в рамках выполнения данного проекта, применительно к решению задачи по повышению эффективности управления техническим обслуживанием горных машин в условиях системы планово-предупредительных ремонтов, до сих пор действующей на предприятиях угольной отрасли Кузбасса.

Объектом настоящего исследования были выбраны карьерные экскаваторы, объем выборки составил двадцать пять экскаваторов марок ЭКГ и ЭШ, сбор диагностической информации осуществлялся на основе разработанной в рамках выполнения гранта «Методики диагностиро-

вания» [6] на протяжении первого года работы над данным проектом. В рамках выполненных исследований использовался принцип комплексного подхода к анализу параметров вибрации, генерируемой при работе оборудования горных машин, включая результаты спектрального анализа в стандартном и расширенном частотном и динамическом диапазонах, анализ характеристики выбега, эксцесса и огибающей спектра. Конкретное сочетание диагностических методологий определялось типом обследуемого динамического оборудования и режимами его работы, что позволило добиваться высокой эффективности результатов анализа данных при минимизации трудозатрат на сбор и обработку первичной диагностической информации, а также выполнить обоснование наиболее оптимального набора диагностических методологий для выявления дефектов энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов.

Преимущества такого подхода к вибродиагностике горных машин и оборудования заключаются в возможности комплексного использования контролируемых диагностических параметров и соответствующих им предельно допустимых значений вибрации, что открывает широкие возможности для совершенствования нормирования параметров механических колебаний и актуализации существующих прогнозных математических моделей.

Общим существенным недостатком подавляющего большинства существующих прогнозных математических моделей, предназначенных для описания процессов деградации технического состояния горной техники на основе анализа параметров регистрируемой вибрации, является крайне узкая область применения получаемых результатов моделирования (обычно ограниченная всего лишь одним-двумя конструктивными элементами из всей сложной энерго-механической системы), а также использование в качестве параметров модели скудных наборов диагностических признаков, применение которых не позволяет производить оценку фактического состояния и строить прогноз деградации для оборудования, на котором одновременно развиваются несколько дефектов различной природы [1, 6, 7]. Таким образом, использование этих моделей не позволяет эффективно спрогнозировать реальное развитие ситуации, когда на технологическом оборудовании одновременно развиваются несколько дефектов, возникновение которых вызвано взаимосвязанными причинами, как обычно и бывает в реальных условиях эксплуатации горных машин. Проведенный анализ научной литературы и рынка специализированного программного обеспечения для вибродиагностики показал, что на сегодняшний день задача по созданию универсальной прогностической модели, основанной на результатах комплексного подхода к анализу параметров вибрации и способной с высокой степенью достоверности описать процессы деградации технического состояния горных машин (рассматриваемых в совокупности как единые сложные технические устройства, а не как набор отдельных узлов и конструктивных элементов) и пригодной для оценки и среднесрочного прогнозирования технического состояния электрических карьерных экскаваторов, до сих пор не решена [3, 6, 8, 9, 10]. Предельные значения как общих уровней, так и отдельных полос вибрации для некоторого энерго-механического оборудования горных машин четко регламентированы, однако получить точный прогноз технического состояния часто не представляется возможным из-за ограниченной области применения существующих математических моделей и несовершенства используемых критериев предельного состояния горной техники. Именно поэтому среднесрочное прогнозирование процессов деградации параметров технического состояния сложных механических систем на основе комплексных знаний о характере их вибрации является актуальной научной задачей, и в рамках настоящей работы была предпринята попытка обобщить имеющийся у коллектива научный задел в данной области исследований и создать на основе разработанных новых единых диагностических критериев математическую модель для выполнения кратко- и среднесрочного прогнозирования интересующих нас деградационных процессов на примере оборудования электрических карьерных экскаваторов.

Результаты и их применение.

Анализ первичных диагностических данных, полученных в ходе выполнения настоящих исследований, позволил провести группировку всех базовых дефектов энерго-механического оборудования горных машин по восьми основным группам. Это дефекты подшипников, соединительных муфт, зубчатых передач, поршневых компрессоров, расцентровка, дисбаланс, нарушение жесткости системы и дефекты двигателей и генераторов электрической природы (замыкание обмоток, смещение магнитного поля и

т.п.). Перечисленным дефектам соответствуют более ста двадцати диагностических признаков в области контроля по параметрам вибрации, большая часть из которых содержится в области спектрального анализа, результаты которого корректируют и добавляют данные, полученные при анализе эксцесса, анализе огибающей спектра в области информативных частот проявления дефектов, анализе характеристики выбега и т.д. Наличие на исполнительных механизмах горной техники большого количества различных неисправностей и дефектов обусловило необходимость разработки алгоритмов клиппирования, предназначенных для автоматизированного детектирования основных информативных гармоник, присущих одной группе искомых дефектов, при условии отсутствия в спектрах явного максимума оборотной частоты, что и было осуществлено при помощи использования узкополосной фильтрации для удаления из исходных данных некорректной информации, появление которой может быть вызвано ошибками при установке измерительных датчиков, неисправностями в системе «датчик-кабель-прибор» или погрешностью математической обработки регистрируемого сигнала [1, 8, 11].

Для каждого из новых единых критериев (ЕДК) был выбран и обоснован свой уникальный набор диагностических признаков и правил, позволяющий наиболее эффективно и полно описать фактическое состояние объекта исследований [2, 6].

Так, например, результаты анализа диагностических признаков выявления дефектов электрической природы позволили выделить, в качестве базовых, четыре критерия оценки состояния по параметрам вибрации электрических машин, используемых в конструкции карьерных экскаваторов, а именно:

- общий уровень активности гармонического ряда вида $n \times fC$ (n=1…10), вычисленный по спектру виброскорости для всех трех пространственных направлений вектора вибрации;
- наличие и вклад в общий уровень амплитуд боковых частот прохода поля $fR \pm fP$;
- мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей в области гармонических рядов пазовых частот;
- вклад в общий уровень сигнала составляющих на частотах 2fC ± fC/3, свидетельствующий о нарушении симметрии фаз, которое проявляется как последствие неравномерного распределения сопротивления обмоток по фазам и секциям якорных обмоток.

А для выявления нарушения жесткости опорной системы было обосновано применение, в частности, следующих критериев оценки состояния по параметрам вибрации:

- общий уровень активности гармонического ряда оборотной частоты (вплоть до её двенадцатой гармоники), вычисленный по спектру виброскорости для всех трех пространственных положений диагностируемого агрегата (см. пример на рисунке 1);

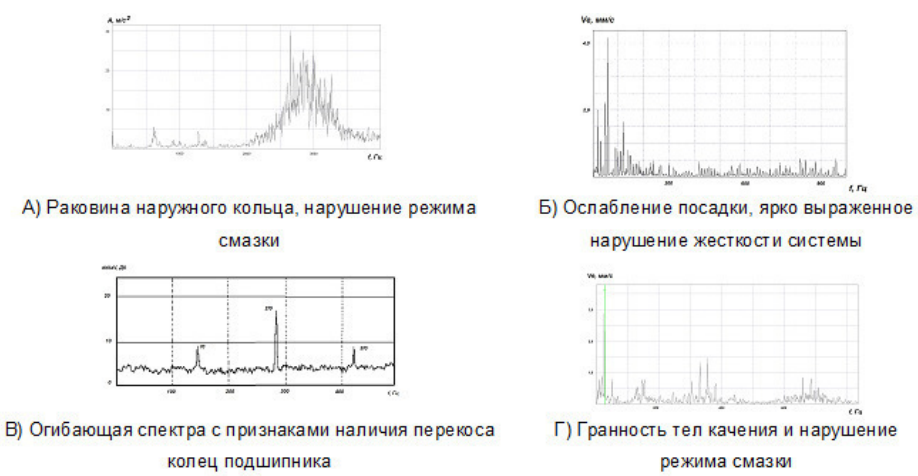


Рисунок 1. Некоторые примеры базовых диагностических признаков наиболее распространенных дефектов подшипников качения, установленных на энерго-механическом оборудовании карьерных экскаваторов
Figure 1. Some examples of basic diagnostic signs of the most common rolling bearing defects installed on the power-mechanical equipment of quarry excavators

- нормированный уровень мощности боковых гармоник вида $X=k{\cdot}fR\pm n{\cdot}fm$, вычисленный по спектру виброскорости (наличие в спектре комбинаторных модуляционных частот);

- мера сходства, рассчитанная по спектру огибающей в области частот гармонических рядов нарушения жесткости;

- относительный уровень шума, присутствующий в спектре.

Первые же полученные результаты прогнозирования на практике доказали принципиальную эффективность использования предложенных единых критериев для диагностики основного оборудования горной техники [6]. Результаты прогнозирования технического состояния подшипников и соединительных муфт были учтены при планировании текущих ремонтов технологического оборудования, а корректность сделанных выводов и рекомендаций о замене неисправных узлов подтверждается результатами визуально-измерительного контроля, осуществленного в рамках плановых ремонтных мероприятий.

Новизна предложенной в рамках выполнения настоящего исследования математической модели заключается в использовании в качестве моделируемых параметров новых единых диагностических критериев, призванных повысить точность оценки технического состояния объектов диагностирования за счет комплексного подхода к результатам анализа параметров вибрации энерго-механического оборудования горных машин. Прогнозная модель деградации технического состояния создавалась с учетом допущения о том, что фактическое состояние исследуемого объекта напрямую зависит от его исходных технических параметров, режима эксплуатации и истории поломок и ремонтов. При неизвестном законе распределения диагностических данных было решено применять точечные оценки среднего и гамма-процентного ресурсов с учетом их доверительных интервалов [1, 12, 13, 14, 15].

Практика виброанализа на объектах угольной и горнорудной промышленности показала, что в силу особенностей действующей системы плановых ремонтов осуществление долгосрочного прогнозирования процессов изменения технического состояния сложных механических систем не имеет практической ценности, именно поэтому для решения поставленных в рамках настоящей работы задач наибольший интерес представляют результаты кратко- и среднесрочного прогнозирования, позволяющие получить ответ на вопрос, сможет ли данное техническое устройство безаварийно эксплуатироваться до момента проведения ближайшего планового ремонта, или нет? Для условий системы ППР в угольной промышленности целесообразно ограничиться достаточно узким временным интервалом, который условно можно принять за 30 или 60 календарных дней (один или два интервала диагностирования). Таким образом, для заданных технических условий необходимо было решить задачу распознавания фактического состояния, в котором находится горное оборудование на момент проведения диагностики. Обычно, при проведении сбора диагностических данных часть регистрируемых характеристик бывает искажена или зашумлена [1, 2, 7], поэтому в рамках выполнения данной работы для выявления тренда значимой составляющей из зашумленной совокупности данных, используемых в дальнейших расчетах при построении прогноза, применялась оценка входящих данных на отсутствие тренда по критерию Стьюдента.

Решение классической задачи среднесрочного прогнозирования предусматривает проведение моделирования на два диагностических интервала вперед, таким образом, за точку отчета был выбран период прогнозирования, равный шестидесяти календарным дням. Поскольку анализ исходной диагностической информации позволяет сделать предположение о наличии непериодического тренда в регистрируемых данных, то последующей задачей моделирования стал поиск аналитической зависимости для более точного описания детерминированной составляющей сигналов вибрации.

В рамках выполнения настоящей работы предельное техническое состояние исследуемого энерго-механического оборудования горной техники определялось на основе анализа единых диагностических критериев, позволяющих получить довольно точное описание фактического состояния объектов диагностирования. Таким образом, для решения задачи по прогнозированию развития деградационных процессов на энерго-механическом оборудовании горной техники осуществлялась экстраполяция найденного полезного диагностического тренда, а также поиск точек пересечения искомого тренда с линиями пограничного технического состояния, что позволило отыскать предполагаемый оптимистический и пессимистический момент времени, в который осуществляется переход между границами технического состояния объекта исследований (см. пример на рисунке 2). Кроме прочего, были определены зависимости между

погрешностями результатов прогнозирования и количеством измерений, а также минимальное количество данных, необходимых для того, чтобы построить эффективный прогноз деградации технического состояния энерго-механического оборудования горных машин.

Как следует из анализа проведенных расчетов и графиков, уровень АВАРИЯ на заданном интервале диагностирования (Т=60 календарных дней) не будет достигнут (см. рисунок 2). Уровень $ЕДК_{АВАРИЯ_ПК}$=82,99, при этом доверительные границы прогноза уровня АВАРИЯ - пессимистическая 75,23 и оптимистическая 90,75, при прогнозе на 60 суток в момент наработки 42440 часов ЕДК=59,32. Величина достоверности аппроксимации R^2=0,5161.Низкий уровень R^2 обусловлен значительным разбросом диагностических данных, собранных на различном динамическом оборудовании карьерных экскаваторов (лебедки подъема и напора, механизмы поворота, преобразовательные агрегаты, компрессора) при значительном периоде наблюдений, увеличить достоверность аппроксимации можно путем увеличения выборки диагностических данных. В данном конкретном случае рекомендовано продолжить эксплуатацию оборудования с соблюдением режимных параметров.

На следующем этапе выполнения данной работы, разработанная в рамках настоящего исследования прогнозная математическая модель была использована для создания программного обеспечения, предназначенного для кратко- и среднесрочного прогнозирования деградационных процессов на энерго-механическом оборудовании электрических карьерных экскаваторов типа ЭКГ и ЭШ. Наиболее эффективного решения поставленной задачи получилось достичь при условии реализации алгоритмов адаптивного краткосрочного прогнозирования, основанных на данных наиболее актуальных замеров вибрации технологического оборудования, на основе анализа которых параметры модели корректировались, автоматически адаптируя модель к быстрому изменению свойств входящей диагностической информации.

По результатам выполненных исследований в среде программирования Python была создана программа, предназначенная для прогнозирования технического состояния энерго-механического оборудования горных машин на основании использования результатов вибродиагностики, которая может быть полезна для выполнения оценки работоспособности самых разнообразных технических устройств, эксплу-

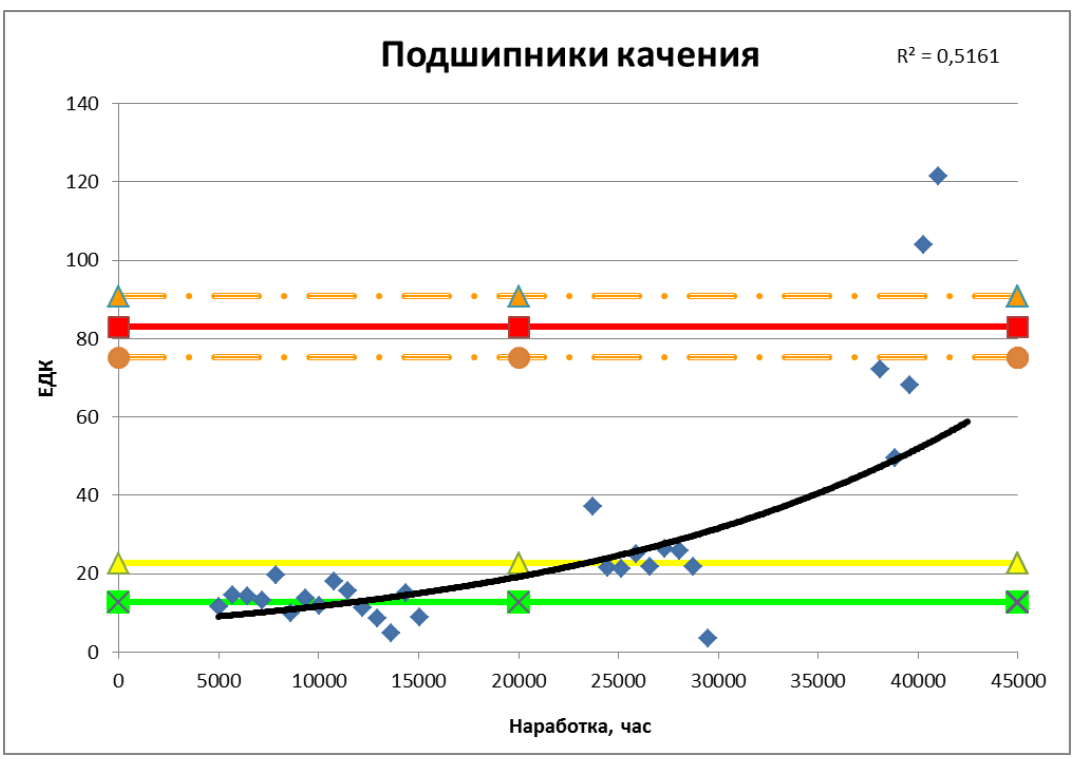


Рисунок 2. Пример графического представления результатов прогнозирования изменения уровня единого диагностического критерия для подшипников качения в зависимости от их наработки
Figure 2. An example of a graphical representation of the results of forecasting changes in the level of a single diagnostic criterion for rolling bearings, depending on their operating time

атируемых в условиях угольной и горнорудной промышленности (см. рисунок 3). Данные, полученные методом спектрального анализа, были дополнены результатами анализа огибающей спектра в области проявления искомых спектральных компонент в низко-, средне- и высокочастотном диапазоне, результатами анализа характеристики выбега роторных агрегатов и высокочастотного эксцесса, что позволило повысить корректность получаемых выводов о техническом состоянии обследуемых горных машин. Возможности созданной программы включают выполнение кратко- и среднесрочного прогноза изменения технического состояния диагностируемого оборудования, работу с базами данных, возможность выбора задействованных в прогнозировании единых диагностических критериев, работу с таблицами и графиками, а также формирование отчета по результатам прогнозирования технического состояния обследованной горной техники. При этом разработанная программа имеет минимальные системные требования к конфигурации персонального компьютера и используемой операционной системы. В настоящий момент авторами настоящей работы подготавливается заявка на получение свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных, а также патента РФ на способ неразрушающего контроля с применением новых единых диагностических критериев.

Результаты апробации разработанной математической деградационной модели и созданного программного обеспечения были получены при использовании выборки диагностических данных, содержащих информацию по параметрам вибрации двадцати пяти карьерных экскаваторов. Результаты среднесрочного прогнозирования в рамках настоящего исследования подтверждены данными неразрушающего контроля, что позволяет утверждать об эффективности предложенного подхода к прогнозированию с использованием единых диагностических критериев и корректности алгоритмов прогнозирования разработанного оригинального программного обеспечения.

Вместе с тем, авторам представляется очевидным, что работу по совершенствованию предложенных новых единых диагностических критериев необходимо продолжить, особенно это касается ЕДК для диагностики зубчатых передач в составе редукторов горной техники, что объясняется недостаточным объемом используемой выборки данных, из-за чего было проведено только предварительное, грубое нормирование данного критерия, не позволяющее получать

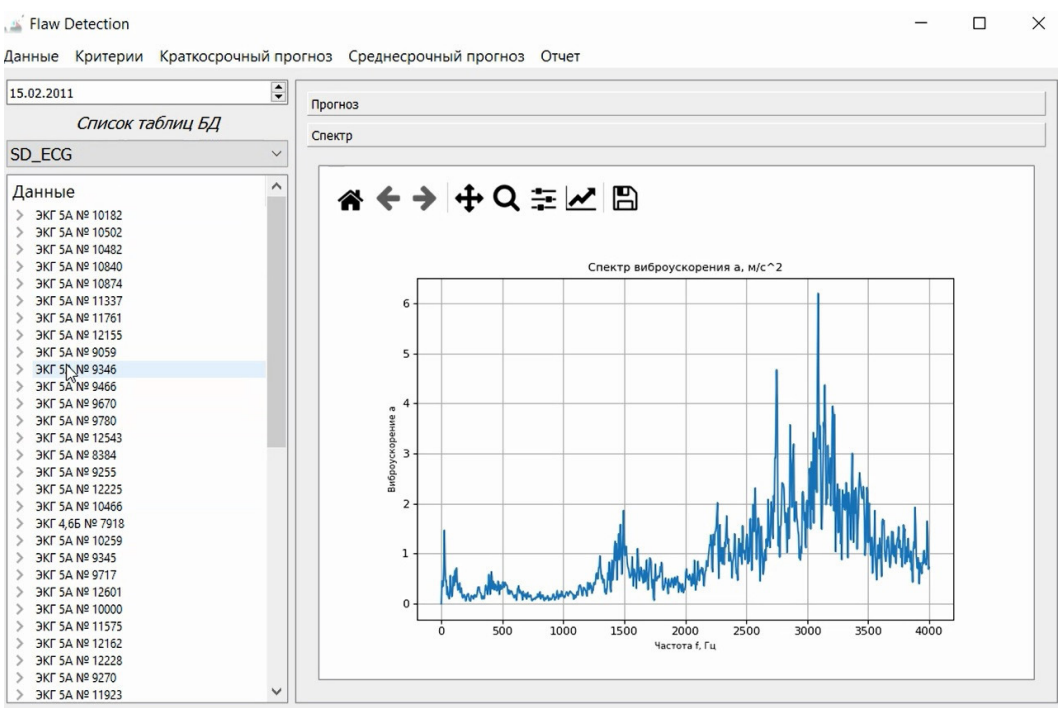


Рисунок 3. Пример диалогового окна разработанного программного обеспечения для прогноза деградации технического состояния оборудования горных машин
Figure 3. Example of a dialog box of the developed software for forecasting the degradation of the technical condition of mining machinery equipment

достаточно эффективные результаты прогнозирования технического состояния данных технических объектов.

Выводы.

Примером успешной реализации новых практических подходов к нормированию и оценке параметров вибрации, генерируемой при работе энерго-механического оборудования горных машин, может служить попытка создания единых диагностических критериев, призванных заменить собой большое количество признаков и правил выявления дефектов ответственного горного оборудования. В алгоритме создания данных критериев использовался принцип фильтрации исходных данных, что позволило исключить из дальнейших расчетов априори недостоверную диагностическую информацию и сделать новые критерии подходящими для осуществления среднесрочного прогнозирования процессов деградации фактического состояния сложных технических устройств, эксплуатируемых в условиях угольных предприятий Кузбасса. Научные результаты, полученные при использование новых критериев в качестве параметров адаптивной математической модели позволяют утверждать, что результаты среднесрочного прогнозирования технического состояния объектов эксперимента показали высокую эффективность с учетом специфики использованной выборки технических устройств, что в итоге позволило спрогнозировать развитие таких дефектов, как, например, нарушение жесткости системы или дисбаланс ротора электрической машины, а также спланировать рекомендации по устранению повышенного уровня механических колебаний и проведению виброналадки эксплуатируемого оборудования. Результаты прогнозирования позволили получить информацию о том, проработает ли объект исследования до момента наступления ближайшего ремонта. Данная информация является крайне ценной именно для условий системы плановых ремонтов горной техники, что представляется наиболее важным, если принять во внимание долю эксплуатируемой горной техники, выработавшей свой нормативный срок эксплуатации и фактически находящейся в предельно допустимом, или даже в недопустимом техническом состоянии. Известные подходы (такие как выделение трендов детерминированной составляющей виброакустического сигнала и оптимальная скаляризация диагностических данных), использованные при разработке новых критериев, позволили найти ключ к решению проблемы, связанной с узкой областью применения существующих прогнозных моделей [6]. Ценность предложенной прогнозной модели и ее отличие от существующих аналогов заключается в том, что здесь, в рамках создания среднесрочного прогноза развития таких базовых дефектов энерго-механического оборудования горных машин, как дисбаланс, расцентровка, нарушение жесткости и тому подобное, была осуществлена попытка комплексного использования новых моделируемых параметров, описывающих изменение фактического состояния сложных технических устройств, в состав которых входит большое количество различных узлов и агрегатов, что в итоге позволит приблизить решение решению задачи по эффективному прогнозированию процессов изменения состояния сложного и дорогостоящего горного оборудования.

Заключение.

Таким образом, подводя итог вышесказанному, можно заключить, что полученные в рамках проведенных исследований результаты среднесрочного прогнозирования процессов изменения технического состояния оборудования горных машин обладают высокой степенью достоверности и могут применяться для решения практических задач системы управления снабжением и ремонтами оборудования на горных предприятиях. Результаты исследований прямо свидетельствуют об эффективности использования разработанных единых диагностических критериев для оценки фактического состояния и прогнозирования процессов развития всех базовых типов дефектов на энерго-механическом оборудовании горных машин. В условиях морально устаревшей, но все еще действующей в условиях угольной промышленности Кузбасса системы плановых ремонтов, предложенный подход, связанный с использованием новых диагностических критериев в качестве параметров адаптивной математической модели, поможет открыть инновационное окно возможностей для эффективного решения проблем снабжения и логистики ремонтных подразделений угольных разрезов и обогатительных фабрик. Именно поэтому работы по совершенствованию подходов к нормированию вибрации горных машин должны быть продолжены. Направлением дальнейших исследований данной работы станет совершенствование предложенных единых критериев (в

частности, критерия для диагностики зубчатых передач) и проведение их широкой апробации, а также расширение функционала созданного программного обеспечения до уровня программного комплекса, способного решать большинство задач, связанных с прогнозированием технического состояния горной техники. Таким образом, дальнейшее совершенствование предложенного в рамках настоящего исследования методологического подхода к моделированию процессов деградации и анализу параметров вибрации горного оборудования позволит на практике в условиях угольных предприятий Кузбасса реализовать базовые аспекты обслуживания горной техники по ее фактическому состоянию, что приведет к минимизации вероятности возникновения рисков аварийных ситуаций и снижению доли непроизводительных простоев экскаваторного парка, и в итоге позволит повысить общий уровень безопасности при проведении открытых горных работ.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2021-0002 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы» (рег. № АААА-А21-121012290021-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В.В. Клюева, т.7 – Москва, 2005. – 828 с.
2. Герике П.Б. Краткосрочное прогнозирование расцентровки валов динамического оборудования горных машин /П. Б. Герике, Б. Л. Герике // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, №3. – Кемерово. – 2023. С. 60-66.
3. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings 2053, 040090 (2018). https://doi.org/10.1063/1.5084528
4. Wang, T., Han, Q., Chu, F., Feng, Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : A review. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. V.126,. Pp. 662-685. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051
5. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. https://doi.org/10.1115/1.1379745
6. Исследование процессов формирования и распространения виброакустических волн для создания единых диагностических критериев оценки технического состояния горных машин. Герике П.Б. НИР: грант № 20-48-420010. Российский фонд фундаментальных исследований. 2020.
7. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
8. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. … канд. техн. наук. – М. – МИФИ. – 2007. – 170 с.
9. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. Applied Condition Monitoring. 2018, Vol. 9. Pp 91-101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9
10. Schreiber, R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCC 2016. Pp. 668-672. https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179
11. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. Journal of Mechanical Design. 2008. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. https://doi.org/10.1115/1.2976803
12. Герике П.Б. Влияние качества рабочей жидкости на параметр потока отказов буровых станков. /П. Б. Герике, П. В. Ещеркин // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: Материалы международной научно-практической конференции «Уголь и майнинг 2009». – Новокузнецк: СибГИУ, 2009 – С. 63-68.
13. Huňady, R., Pavelka, P., Lengvarský, P. Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol.121, Pp. 201-214. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024
14. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. / Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. – 230 с.
15. Клишин В.И. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. /В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев, А.В. Савченко/ Новосибирск, 2011. – 524 с.

REFERENCES

1. Non-destructive testing: Handbook. In 7 Vol. V.7 / Pod. red. V.V. Klyueva. Moscow: Mashinostroenie Publishers, 2005. 828 p. (rus)
2. Gericke P.B., Gericke B.L. Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. – 2023. #3. Pp. 60-66 (rus)

3. Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Crack diagnostics in a large-scale reinforced concrete structure based on the analysis of vibration processes. AIP Conference Proceedings 2053, 040090 (2018). https://doi.org/10.1063/1.5084528 (eng)
4. Wang, T., Han, Q., Chu, F., Feng, Z. Vibration based condition monitoring and fault diagnosis of wind turbine planetary gearbox : A review. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. V.126,. Pp. 662-685. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.02.051 (eng)
5. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. https://doi.org/10.1115/1.1379745 (eng)
6. Research of the processes of formation and propagation of vibroacoustic waves for the creation of uniform diagnostic criteria for assessing the technical condition of mining machines. Gericke P.B. Research work: grant No. 20-48-420010. Russian Foundation for Basic Research. 2020. (rus)
7. Krakovskiy, Yu. M. Matematicheskie i programmnye sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya [Mathematical and software evaluation of the technical state of equipment]. Novosibirsk, 2006. – 227 p. (rus)
8. Sushko A. E. Razrabotka spetsial'nogo matematicheskogo i programmnogo obespecheniya dlya avtomatizirovannoy diagnostiki slozhnykh system [Development special mathematical and software for automated diagnosis of complex systems]: PhD thesis excerpt. Moscow. 2007. (rus)
9. Puchalski A., Komorska I. Stable distributions and fractal diagnostic models of vibration signals of rotating systems. Applied Condition Monitoring. 2018, Vol. 9. Pp 91-101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61927-9_9 (eng)
10. Schreiber, R. Induction motor vibration diagnostics with the use of stator current analysis. Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference, ICCC 2016. Pp. 668-672. https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2016.7501179 (eng)
11. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. Journal of Mechanical Design. 2008. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. https://doi.org/10.1115/1.2976803 (eng)
12. Gericke P.B. The influence of the quality of the working fluid on the failure rate parameter of drilling rigs /P. B. Gerike, P. V. Eshherkin // Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources: Proceedings of the international scientific-practical conference "Coal and Mining 2009". - Novokuznetsk: SibGIU, 2009 - Pp. 63-68 (rus)
13. Huňady, R., Pavelka, P., Lengvarský, P. Vibration and modal analysis of a rotating disc using high-speed 3D digital image correlation. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol.121, Pp. 201-214. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.11.024 (eng)
14. Luk'yanov A.V. Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [The classifier of vibrodiagnostic symptoms of defects rotary machines.]. Irkutsk, 1999. – 230 p. (rus)
15. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy [Problems of safety and new technology of underground coal mining]. Novosibirsk, 2011. 524 p. (rus)

Развитие зон напряжения в породных массивах при проведении горных выработок различного поперечного сечения
стр.21

Заводские (стендовые) и шахтные испытания крепи анкерной с предварительным натяжением
стр.62

Выпуск 4-2023 | Кемерово | ISSN 2072-6554 | DOI 10.26631/issn.2072-6554

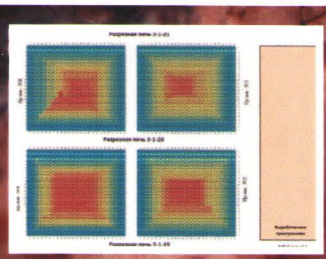
ВЕСТНИК

Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности

С наступающим Новым 2024 годом!
Слово редактора

АКТУАЛЬНО

ОСОБЕННОСТИ КАМЕРНО-СТОЛБОВОЙ ОТРАБОТКИ СКЛОННОГО К ГОРНЫМ УДАРАМ ПЛАСТА К4 В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ «ДЕНИСОВСКАЯ»
стр.6



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВООПАСНОСТИ И УЧАСТИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ВО ВЗРЫВАХ
стр.13

Подписка на журнал: Каталог Агентства “Роспечать” Подписной индекс **35939** | website: **http://www.ind-saf.ru/**
16+

ВЕСТНИК

Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности

Научно-технический журнал

ISSN 2072-6554

Кемерово 4-2023

© ООО «ВостЭКО», 2023
www.ind-saf.ru

ВЕСТНИК
Научного центра
по безопасности работ
в угольной промышленности
ISSN 2072-6554

№ 4-2023 **Выходит 4 раза в год**
Подписной индекс
в Каталоге Агентства
«Роспечать» 2023г. – 35939

ЖУРНАЛ ЗАРЕГИСТРИРОВАН
Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-71529 от 13.11.2017 г.

ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН
в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», сформированный ВАК при Минобрнауки России

Учредитель и издатель
научно-технического журнала «Вестник...»:
Общество с ограниченной
ответственностью «ВостЭКО»
(ООО «ВостЭКО»)
Адрес учредителя и издателя:
650002, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, Сосновый бульвар, дом 1, кабинет 415

Адрес редакции:
650002, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, Сосновый бульвар, дом 1

Редакторы: *Д. А. Трубицына, Л. С. Кузовкова, Т.В. Архипенко*

тел. 77-86-62, 64-26-51.
e-mail: tanya-adv@list.ru
dtrubitsyna@gmail.com
www.ind-saf.ru

Позиция редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикуемых материалов

В номере использованы материалы сайтов www.lori.ru, www.freeImages.com, www.unsplash.com и www.graphicriver.net

16+

© ООО «ВостЭКО», 2023

Адрес типографии:
630015, Россия, г. Новосибирск, ул. Комбинатская, 3А
тел. +7 (383) 207-85-22. Типография «Арт Черри».

Главный редактор: Н. В. Трубицына

Редакционная коллегия:

Н. В. Трубицына – главный редактор, заместитель директора по научной работе ООО «ВостЭКО», д-р техн. наук

А. С. Ярош – заместитель главного редактора, канд. техн. наук

Д. В. Исламов - депутат ГД ФС РФ, кандт. техн. наук

А. А. Трубицын – консультант по научной работе ООО «Горный-ЦОТ», НАО «НЦ ПБ», д-р техн. наук, проф.

А. А. Васильев – заведующий лабораторией ФГБУН «Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН», д-р физ.-мат. наук, проф.

А. М. Брюханов – директор МакНИИ, д-р техн. наук

В. И. Клишин – директор Института угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф.

А. В. Шадрин – главный научный сотрудник Института угля ФИЦ УУХ СО РАН, д-р техн. наук

В. Г. Казанцев – заведующий кафедрой «БТИ» (филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», д-р техн. наук

В. С. Зыков – заместитель генерального директора АО «НЦ ВостНИИ», д-р техн. наук, проф.

Д. А. Трубицына – выпускающий редактор ООО «ВостЭКО»

INDUSTRIAL SAFETY

Scientific-technical magazine

Kemerovo 4 - 2023

© Co Ltd «VostEKO», 2023
www.ind-saf.ru

INDUSTRIAL SAFETY
ISSN 2072-6554

№ 4- 2023 **Is issued 4 times a year**
Subscription index
in «Rospechat» Agency
Catalogue: Year 2023 – 35939

MAGAZINE IS REGISTERED
by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technologies and Mass Communications. Registration cerificate of mass information means PI № FS77-71529 dated by 13.11.2017 г.

THE MAGAZINE IS INCLUDED
into «The list of russian reviewed scientific magazines in which main scientific results of dissertations for scientific degrees of a doctor and a candidate of sciences must be published». The list is formed by Higher Attestation Commossion of RF Ministry of Education and Science.

Promoter and publisher of «Industrial Safety» scientific-technical magazine:
Co Ltd «VostEKO»

Address of the promoter and publisher:
650002, Russia, Kemerovskaja oblast, Kemerovo, Sosnovyi bd., 1, office 415

Address of the editors:
650002, Russia, Kemerovskaja oblast, Kemerovo, Sosnovyi bd., 1

Editors: *L.S. Kuzovkova, D.A. Trubitsyna*, *T.V. Arhipenko*

Tel. 77-86-62, 64-26-51.
e-mail: tanya-adv@list.ru
dtrubitsyna@gmail.com

www.ind-saf.ru
www.indsafe.ru

The edition position not always coincides with the point of view of authors of published materials

In the issue of the magazine materials of sites www.lori.ru, www.freelmages.com, www.unsplash.com and www.graphicriver.net are used

16+

© Co Ltd «VostEKO», 2023

Address of the painting
3A Kombinatskaya str., Novosibirsk, 630015, Russia
, tel. +7 (383) 207-85-22. Art Cherry Printing House.

Chief editor: N. V. Trubistyna

Editorial board:

N. V. Trubitsyna – chief editor, deputy director for scientific work of OOO «VostEKO», doctor of technical sciences

A. S. Yarosh – deputy chief editor, candidate of technical sciences

D. V. Islamov - deputy of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation, candidate of technical sciences

A. A. Trubitsyn - scientific work consultant, OOO "Gorny COT", NAO "NC PB", doctor of technical sciences, professor

A. A. Vasil'ev - Head of the Laboratory FGBUN "M.A. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB of RAS, doctor of physical and mathematical sciences, professor

A. M. Brjuhanov - Director of MakNII, doctor of technical sciences

V. I. Klishin - director of the Institute of coal, Federal research center of coal and coal chemistry SB RAS, corresponding member of RAS, doctor of technical sciences, professor

A. V. Shadrin – main researcher of the Institute of Coal FIC UUH SB RAS, doctor of technical sciences

V. G. Kazantsev – chairman of «BTI» (branch) FGBOU VPO «AltGTU after I.I.Polzunov», doctor of technical sciences

V. S. Zykov – deputy general director JSC «ScC VostNII», doctor of technical sciences, professor

D. A. Trubitsyna – OOO «VostEKO» Commissioning Editor

СЛОВО РЕДАКТОРА // EDITORIAL

5 Трубицына Н.
Trubitsyna N.

АКТУАЛЬНО // IMPORTANT

6 Ширяев С.Н., Гречишкин П.В., Зыков В.С., Ли К.Х., Харитонов И.И., Лихоузов А.А.
Особенности камерно-столбовой отработки склонного к горным ударам пласта К4 в условиях шахты «Денисовская»
Shiryaev S.N., Grechishkin P.V., Zykov V.S., Lee K.H., Charitonov I.I., Lichouzov A.A.
Features of chamber-pillar mining of inclined to the mining impacts of the K4 formation in the conditions of the denisovskaya mine

13 Романченко С.Б. Экспериментальные исследования параметров взрывоопасности и участия угольной пыли во взрывах
Romanchenko S. B. Experimental studies of explosion hazard parameters and the participation of coal dust in explosions

I. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ГЕОМЕХАНИКА// INDUSTRIAL SAFETY AND GEOMECHANICS

21 Масаев Ю.А., Масаев В.Ю. Развитие зон напряжения в породных массивах при проведении горных выработок различного поперечного сечения
Masaev Yu.A., Masaev V.Yu. Development of stress zones in rock massifs during mining of various cross-sections

II. ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ // FIRE AND INDUSTRIAL SAFETY

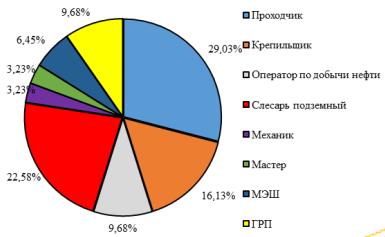
27 Фомин А.И., Неверов Е.Н., Бесперстов Д.А., Ли К.Х., Угарова И.М. Разработка методологического принципа обеспечения пожаробезопасности людей
Fomin A.I., Neverov E.N., Besperstov D.A., Lee K.H., Ugarova I.M. Development of the methodological principle of ensuring fire safety of people

35 Тарасов В.М., Фомин А.И., Тарасов Д.В. Исследование некоторых нормативных правовых актов
Tarasov V.M., Fomin A.I., Tarasov D.V. Study of some regulatory legal acts

47 Ушакова А.С., Гришин А.С., Фомин А.И., Просин М.В. Психология безопасности труда как ключевое звено в мероприятиях по обеспечению безопасной деятельности человека
Ushakova A.S., Grichin A.S., Fomin A.I., Prosin M.V. Labor safety psychology as a key link in measures to ensure safe human activities

53 Мишенина Н.А., Абдулаев Э.К., Бузакова Е.Ю. Организация физкультурно-оздоровительной работы на предприятиях угольной промышленности
Michenina N.A., Abdulaev E.K., Buzakova Ye.Yu. Organization of physical culture and recreation work at coal industry enterprises

57 Фомин А.И, Грунской Т.В., Белкин И.А. Анализ травматизма в нефтешахтной добывающей отрасли республики Коми
Fomin A.I., Grunsky T.V., Belkin I.A. Analysis of injuries in the oil-mining industry of the Komi republic

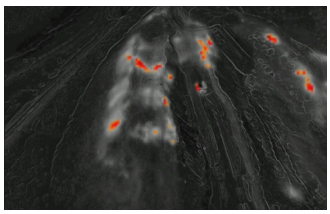


III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ // TECHNOLOGICAL QUESTIONS OF MINING WORK SAFETY

62 Тациенко В.П., Бубнов К.А., Нашатырев А.Г., Царев Д.В., Заволокина Е.А. Заводские (стендовые) и шахтные испытания крепи анкерной с предварительным натяжением
Tatsiekno V.P., Bubnov K.A., Nashatyrev A.G., Tsarev D.V., Zavolokina Ye.A. Factory (bench) and mine tests of anchor fasteners with pretensioning

69 Герике П.Б., Герике Б.Л. Результаты анализа среднесрочного прогнозирования технического состояния горных машин
Gericke P.B., Gericke B. L. Some results of the analysis of medium-term forecasting of the technical condition of mining machinery

79 Масаев Ю.А., Масаев В.Ю., Дрозденко Ю.В. Исследование линейных отклонений фактического контура горной выработки от условий производства буровзрывных работ
Masaev Yu.A., Masaev V.Yu., Drozdenko Yu.V. Investigation of linear deviations the actual contour of mining depends on the conditions of drilling and blasting operations



84 Портола В.А., Серегин Е.А., Протасов С.И., Ярош А.С., Бобровникова А.А. Контроль теплового состояния породных отвалов и объектов открытых горных работ с использованием беспилотных летательных аппаратов
Portola V.A., Seregin E.A., Protasov S.I., Yarosh A.S. ,Bobrovnikova A.A. Control of the thermal condition of rock dumps and open mining facilities using unpiloted aircraft vehicles

91 Дягилева А.В., Пылов П.А., Майтак Р.В. Интеллектуальная автоматизация процесса сейсмоакустического мониторинга на основе метода парзеновского окна
Dyagileva A.V., Pylov P.A., Maitak R.V. Intelligent automation of seismo-acoustic monitoring process based on the parzen window method

IV. ПРОБЛЕМЫ И СУЖДЕНИЯ // PROBLEMS AND OPINIONS

95 Бычков С.В. Агония наук о Земле или как некомпетентность геофизиков в основах точных наук отражается на процессе изучения недр нашей планеты
Bychkov S.V. The agony of earth sciences or how incompetence of geophysicists in the fundamentals of exact sciences is reflected in the process of studying the bowels of our planet

107 ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МАТЕРИАЛАМ // ADVERTISING MATERIALS REQUIREMENTS

108 ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ // DEMANDS TO ARTICLES

110 СОДЕРЖАНИЕ // CONTENT

Подписано в печать 29.12.2023. Тираж 1000 экз. Формат 60х90 1/8.
Выпуск 4-2023, дата выхода в свет 29.12.2023
Объем 10 п. л. Заказ № 2 2022 г. Цена свободная.
Типография «Арт Черри».
630015, Россия, г. Новосибирск, ул. Комбинатская, 3А
Тел. 8 (3842) 657889.