

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
METHODS AND DEVICES FOR MONITORING AND DIAGNOSTICS
OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL
ENVIRONMENT**

Научная статья

УДК 621.791.05:620.179

DOI: 10.26730/1999-4125-2022-6-50-58

**ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО
ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ
СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И ПОЛЕЙ ВНУТРЕННИХ
НАПРЯЖЕНИЙ МЕТАЛЛА**

Смирнов Александр Николаевич¹, Абабков Николай Викторович^{1,2},
Никитенко Михаил Сергеевич^{1,2}, Пимонов Максим Владимирович^{1,2},
Телегуз Александр Сергеевич², Нестеренко Кирилл Сергеевич,
Медведчиков Максим Николаевич

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

²Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

*для корреспонденции: n.ababkov@rambler.ru



Информация о статье

Поступила:

28 октября 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 декабря 2022 г.

Принята к публикации:

08 декабря 2022 г.

Ключевые слова:

программный модуль,
горнодобывающее
оборудование, неразрушающий
контроль, структурно-
фазовое состояние,
внутренние напряжения

Аннотация.

Большая часть горнодобывающего оборудования морально устарела и отработала свой ресурс в настоящее время. Для оценки качества и надежности объекта контроля и его элементов без выведения его из эксплуатации или демонтажа применяют различные физические методы неразрушающего контроля. Однако многие традиционные методы неразрушающего контроля, применяемые для оценки состояния горнодобывающего оборудования (ГДО), имеют ряд существенных ограничений, главное из которых – все эти методы позволяют уверенно выявить уже образовавшиеся, сравнительно крупные дефекты. Кроме того, большую роль при их обнаружении играет человеческий фактор. В работе описан алгоритм работы программного модуля оценки текущего состояния ГДО на основе закономерностей изменения структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений металла и использования спектрально-акустического метода неразрушающего контроля. Разработанный программный модуль оценки текущего состояния горнодобывающего оборудования позволяет автоматизировать процесс оценки работоспособности оборудования опасных производственных объектов, а также интегрировать систему мониторинга текущего состояния металлоконструкций, работающих под нагрузкой и давлением, в существующие центры обработки данных для отображения оператору диспетчерского пульта, что позволит значительно сократить трудоемкость работ по оценке ресурса.

Для цитирования: Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Никитенко М.С., Пимонов М.В., Телегуз А.С., Нестеренко К.С., Медведчиков М.Н. Программный модуль оценки состояния горнодобывающего

оборудования на основе закономерностей изменения структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений металла // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. № 6 (154). С. 50-58. doi: 10.26730/1999-4125-2022-6-50-58

Введение

Долгосрочная Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года, утвержденная в 2014 году, предусматривает значительную интенсификацию производства [1]. Поставлены вызовы по кардинальному повышению производительности труда, модернизации и обновлению производственных мощностей по добыче угля [2]. Импортозамещение и развитие собственной машиностроительной базы, обеспечение мировых стандартов в области промышленной и экологической безопасности, снижение аварийности, повышение уровня автоматизации [3] становятся краеугольными камнями, на которые делается главный упор. Для достижения поставленных задач, по мнению авторов [4], важно обеспечить возможность прогнозирования появления дефектов как для вновь создаваемого ГДО (и иного оборудования опасных производственных объектов), так и на разных этапах жизненного цикла. При этом не менее важным является обеспечение постоянного отображения и мониторинга состояния объектов при эксплуатации на основе интеллектуальных инструментов оценки работоспособности элементов оборудования и передовых технологий построения интерфейсов нового поколения [3, 5, 6].

Для оценки качества и надежности объекта контроля и его элементов без выведения его из эксплуатации или демонтажа применяют различные физические методы неразрушающего контроля (НК). Однако многие традиционные методы НК, применяемые для оценки состояния оборудования, имеют ряд существенных ограничений, главное из которых – все эти методы позволяют уверенно выявить уже образовавшиеся, относительно крупные дефекты. Кроме того, большую роль при их обнаружении играет человеческий фактор.

Вопрос контроля за текущим состоянием, работающего под нагрузкой и давлением металла, является не менее важным, чем обеспечение контроля за параметрами технологического процесса и систем безопасности при реализации концепции мобильного места оператора. Программный модуль оценки состояния позволит сократить время простоя оборудования (за счет исключения периодических проверок стандартными методами НК), тем самым повысив уровень автоматизации горнодобывающего производства. Совершенствование существующих и разработка более производительных и безопасных элементов оборудования в рамках утвержденной стратегии невозможны без обеспечения постоянного мониторинга воспринимаемых нагрузок, контроля эксплуатационных режимов и технической диагностики [7, 8]. Эти мероприятия нужны для своевременного обнаружения наиболее нагруженных и изношенных элементов оборудования, оценки остаточного ресурса и определения возможности их восстановления [3].

Диагностика технического состояния и остаточного ресурса конструкций и оборудования, проведенная не по графику или необъективно, может стать причиной преждевременного выхода их из строя и привести к серьезным авариям.

Поэтому разработка программного модуля оценки состояния ГДО на основе закономерностей изменения структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений металла является актуальной задачей. В отношении постоянного контроля и мониторинга перспективными являются системы акустической структурометрии [7]. Применение данного метода позволит проводить техническую диагностику и оценку напряжений в наиболее ответственных элементах конструкций ГДО, а в условиях эксплуатации осуществлять оценку режимов для выявления наиболее нагруженных узлов и единиц техники на протяжении всего срока службы [9–14].

Таким образом, цель работы заключается в повышении эффективности оценки остаточного ресурса и состояния металла оборудования путем разработки и использования программного модуля оценки состояния элементов горнодобывающего оборудования.

Методики и материалы исследований

Программный модуль оценки состояния горнодобывающего оборудования разрабатывался на основе спектрально-акустического метода контроля и, соответственно, измерительно-



Рис. 1. Внешний вид системы измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН»
Fig. 1. Appearance of the system of the measuring and computing complex "ASTRON"

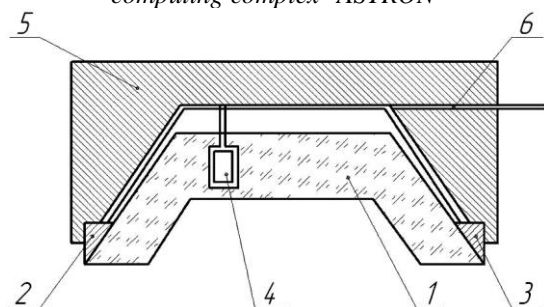


Рис. 2. Малобазный релеевский датчик:
1 – двусторонний клин из оргстекла; 2 – излучатель релеевских волн;
3 – приемник релеевских волн; 4 – излучатель-приемник термоимпульсов;
5 – корпус; 6 – высокочастотный кабель
Fig. 2. Low base Rayleigh sensor:
1 – double-sided wedge made of plexiglass; 2 – emitter of Rayleigh waves;
3 – receiver of Rayleigh waves; 4 – emitter-receiver of thermal impulses;
5 – body; 6 – high-frequency cable

вычислительного комплекса «АСТРОН» (рис. 1), который позволяет проводить прецизионные измерения времени распространения (задержек) и отношения размахов ультразвуковых импульсов (коэффициент затухания), распространяющихся в материале исследуемого объекта, и предназначен для оценки физико-механических характеристик и напряженно-деформированного состояния материала ответственных элементов различных технических объектов [8].

В основу работы аппаратной части комплекса положен способ учета всей серии отраженных акустических импульсов для последующей ее обработки средствами программного обеспечения комплекса. В обрабатываемую часть системы производится последовательное преобразование оциллограммы отраженных импульсов с определенным шагом дискретизации с момента зондирования исследуемого материала и до прихода n -го отраженного импульса для передачи первичной акустической информации. С комплексом «АСТРОН» используются преобразователи поверхностных волн, которые представляют собой выполненные в одном корпусе излучатель и приемник волн. В настоящей работе использовался преобразователь на 4 МГц с базой 18 мм (рис. 2).

Датчик состоит из двустороннего клина из оргстекла 1 с углом ввода ультразвука 27° (для объектов контроля из стали), излучателя 2 и приемника 3 релеевских волн с центральной частотой 5 МГц. База (расстояние между поверхностями излучения и приема) может варьироваться в широких пределах в зависимости от геометрических размеров зон измерения.

Описание программного модуля

В приложении «Структурно-механический критерий» [15] используется форма с тремя вкладками. Вкладка «Главная» (рис. 3) предназначена как для оценки текущего состояния металла сварных соединений горнодобывающего оборудования, эксплуатируемого длительное время в сложных напряженных условиях [15], так и для прогнозирования остаточного ресурса.

Алгоритм работы с вкладкой «Главная» заключается в выборе типа датчика – 4 или 6 МГц, выборе соответствующей марки стали и срока эксплуатации в часах. После выбора этих параметров затем вручную вводятся значения характеристик, снятых с прибора R (нс) и $K_{зат}$ (1/мкс). Запускается расчет структурно-механического критерия и выводится результат расчета

Рис. 3. Пример расчета структурно-механического критерия и остаточного времени эксплуатации
 Fig. 3. An example of calculating the structural-mechanical criterion and the residual operating time

Марка стали	R	Kзат	A
Сталь 20	6,764091858037...	1,214535975866...	
Сталь 12Х1МФ	6,948316534419...	3,743743714325...	
Сталь 20		-1,00605275028...	157
Сталь 12Х1МФ	6,948316534419...	3,743743714325...	
Сталь 12Х1МФ	6,948316534419...	3,743743714325...	
Сталь 12Х1МФ	6,948316534419...	3,743743714325...	
Сталь 12Х1МФ	6,948316534419...	2,743238765017...	
Сталь 12Х1МФ	6,948316534419...	2,743238765017...	
Сталь 12Х1МФ	6,948316534419...	2,743238765017...	

Рис. 4. Вкладка «База данных», в которой сохраняются все результаты расчетов
 Fig. 4. The "Database" tab, in which all calculation results are saved

– металл может работать без проведения ремонтно-восстановительных работ либо металл нуждается в проведении ремонтно-восстановительных работ. В последнем случае выдается рекомендованное количество часов, на которое можно продлить ресурс.

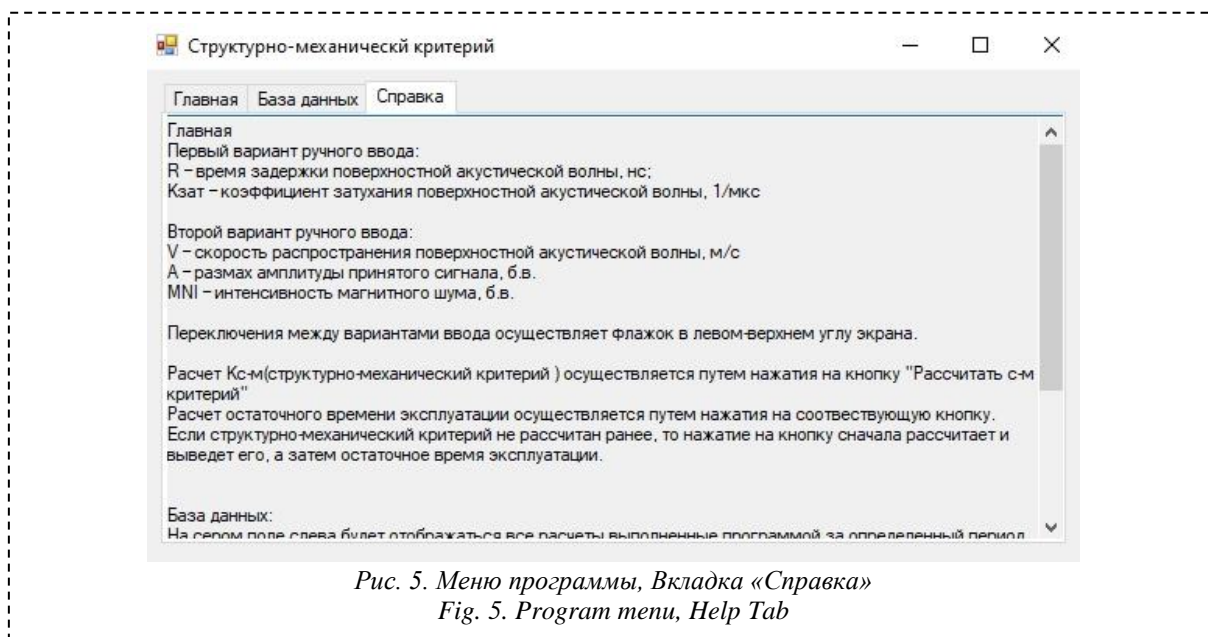
Используя вкладку «База данных» (рис. 4), можно обращаться к результатам предшествующих измерений по сталям 20 и 12Х1МФ. Кроме того, есть возможность внесения в базу данных новых результатов измерений как по сталям 20 и 12Х1МФ, так и по новым сталям, по которым производятся измерения. При этом для получения адекватных результатов расчета необходимо вносить данные по сталям как минимум в двух состояниях: в исходном (без эксплуатации) и после длительной эксплуатации до разрушения.

Во вкладке «Справка» (рис. 5) можно узнать теоретическую информацию по величинам, используемым в расчетах.

Результаты и обсуждение

Далее приведены результаты внедрения разработанных решений по прогнозированию работоспособности и оценке остаточного ресурса длительного работающего энергооборудования в промышленности в виде автоматизированной системы.

Процесс расчета структурно-механического критерия и прогнозирование работоспособности на его основе требуют высокой квалификации оператора и занимают относительно продолжительное время. Поэтому для упрощения процесса расчета и уменьшения трудоемкости была разработана автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности длительно работающего энергооборудования на базе критериев предельного состояния и структурно-механического критерия.



Автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности была апробирована в промышленных условиях на ряде участков паропроводов пара и горячей воды, изготовленных из сталей 20 и 12Х1МФ. Так, для 36 паротводящих труб, изготовленных из стали 20, после эксплуатации в 219–242 тыс. часов была произведена оценка остаточного ресурса, которая показала, что для 70% труб остаточный ресурс составил 50–75 тыс. часов, 20% – 25–50 тыс. часов, а для 10% необходимо произвести замену в связи с исчерпанием ресурса работоспособности. Для 29 паропроводов пара и горячей воды, изготовленных из стали 12Х1МФ после эксплуатации 180–263 тыс. часов, расчет показал, что для 60% паропроводов остаточный ресурс составил 50–70 тыс. часов, 25% – 25–50 тыс. часов, а для 15% необходимо произвести замену в связи с исчерпанием ресурса работоспособности.

Предложенный и обоснованный подход к оценке и прогнозированию работоспособности и остаточного ресурса длительно работающего энергооборудования, основанный на выявленных взаимосвязях между структурным и субструктурным состояниями, полями внутренних напряжений и устойчивой локализации деформаций с характеристиками неразрушающих испытаний и расчете структурно-механического критерия был применен на ряде электростанций Кемеровской области.

Результаты расчета остаточного ресурса по структурно-механическому критерию были сопоставлены с результатами, полученными экспертной организацией при выполнении экспертизы промышленной безопасности. Совпадение результатов оценки остаточного ресурса составило 95%.

Выводы

1. Разработанный программный модуль оценки текущего состояния горнодобывающего оборудования позволяет автоматизировать процесс оценки работоспособности оборудования опасных производственных объектов, а также интегрировать систему мониторинга текущего состояния металлоконструкций, работающих под нагрузкой и давлением в существующие центры обработки данных оператору диспетчерского пульта для отображения.

2. В связи с тем, что структурно-механический критерий требует большого числа расчетов, была предложена автоматизированная система оценки и прогнозирования работоспособности. Данная система затем была апробирована в промышленных условиях на ряде участков паропроводов пара и горячей воды, изготовленных из сталей 20 и 12Х1МФ.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №22-29-20192.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение правительства РФ «Программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года» от 21.06.2014 № № 1099-Р // 2014.
2. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года // Министерство энергетики РФ URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1846> (дата обращения: 09.09.2022).
3. Петрова И. М., Гадолина И. В., Ботвина Л. Р., Демина Ю. А., Тютин М. Р. Влияние длительного старения на характеристики усталости стали 45 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2011. Т. 77. № 1. С. 58–67.
4. Пачурин Г. В. Влияние температуры на механические свойства листовых конструкционных сталей // Фундаментальные исследования. 2014. № 1. С. 18–23.
5. Nikitenko M. S. Evaluation of elements loading in the metal structures of powered support units. // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources" 2016. С. 012007.
6. Stepanova L. N., multi-channel strain-gauge systems for dynamic tests of structures // Automation and Remote Control. 2013. Т. 74. № 5. С. 891–897.
7. Бутусов Д. С. [и др.] Мониторинг и управление напряженно-деформированным состоянием технологических трубопроводов компрессорных станций как средства снижения уровня риска аварии от дефектов, вызванных коррозионным растрескиванием под напряжением // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2013. № 3 (93). С. 88–97.
8. Осипов К. О. [и др.] Комплексный контроль напряженно-деформированного состояния крупногабаритных металлоконструкций на основе акустико-эмиссионного и магнитного методов неразрушающего контроля // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Реальность – сумма информационных технологий». 2015. С. 125–129.
9. Ботвина Л. Р., Кушнаренко В. М., Тютин М. Р., Левин В. П., Морозов А. Е., Болотников А. И. Стадийность процесса разрушения и остаточная прочность трубной стали после длительной эксплуатации // Физическая мезомеханика. 2021. Т. 24. № 1. С. 50–61.
10. Лисин Ю. В., Махутов Н. А., Неганов Д. А., Студенов Е. П., Скородумов С. В. Комплексные механические испытания для расчетов прочности магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 4. С. 47–59.
11. Демина Ю. А., Тютин М. Р., Марченков А. Ю., Левин В. П., Ботвина Л. Р. Влияние длительной эксплуатации на физико-механические свойства и механизмы разрушения трубных сталей класса прочности х70 // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 12. С. 23–35.
12. Гафарова В. А., Абдулганиева О. Р., Иванова А. Д., Бугай Д. Е., Кузеев И. Р., Латыпов О. Р. Изменение микроструктуры стали 09Г2С при ударных нагрузках // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 6. С. 117–123.
13. Hutsaylyuk V., Maruschak P., Konovalenko I., Panin S., Bishchak R., Chausov M. Mechanical Properties of Gas Main Steels after Long-Term Operation and Peculiarities of Their Fracture Surface Morphology // Materials. 2019. V. 12 (3). P. 491.
14. Пачурин Г. В., Филиппов А. А., Гончарова Д. А., Кузьмин Н. А., Геворгян Г. А. Усталость конструкционных материалов в коррозионно-активных средах // Вестник машиностроения. 2020. № 12. С. 56–60.
15. Абабков Н. В. Программа для оценки состояния и прогнозирования работоспособности оборудования, длительное время эксплуатируемого в сложных напряженных условиях / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022611395, 25.01.2022. Заявка № 2021682263 от 29.12.2021.

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Смирнов Александр Николаевич, доктор техн. наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Абабков Николай Викторович, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского Отделения Российской академии наук, (650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10), e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Никитенко Михаил Сергеевич, канд. техн. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского Отделения Российской академии наук, (650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10)

Пимонов Максим Владимирович, канд. техн. наук, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук, (650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10)

Телегуз Александр Сергеевич, ведущий инженер лаборатории геофизических исследований горного массива, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского Отделения Российской академии наук, (650065, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10)

Нестеренко Кирилл Сергеевич, студент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Медведчиков Максим Николаевич, студент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Заявленный вклад авторов:

Смирнов Александр Николаевич – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования.

Абабков Николай Викторович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Никитенко Михаил Сергеевич – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Пимонов Максим Владимирович – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Телегуз Александр Сергеевич – написание и обсуждение программного продукта.

Нестеренко Кирилл Сергеевич – написание и обсуждение программного продукта.

Медведчиков Максим Николаевич – написание и обсуждение программного продукта.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

SOFTWARE MODULE FOR ASSESSING THE STATE OF MINING EQUIPMENT BASED ON REGULARITIES OF CHANGES IN THE STRUCTURAL-PHASE STATE AND FIELDS OF METAL INTERNAL STRESS

Alexander N. Smirnov¹, Nikolay V. Ababkov^{1,2}, Mikhail S. Nikitenko^{1,2}, Maxim V. Pimonov^{1,2}, Alexander S. Teleguz², Kirill S. Nesterenko¹, Maxim N. Medvedchikov¹

¹T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

²The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry SB RAS

*for correspondence: n.ababkov@rambler.ru



Article info

Submitted:

28 October 2022

Approved after reviewing:

01 December 2022

Accepted for publication:

08 December 2022

Keywords: software module, mining equipment, non-

Abstract.

Most of the mining equipment is morally obsolete and has exceeded its service life at the present time. To assess the quality and reliability of the object of control and its elements, without taking it out of operation or dismantling, various physical methods of non-destructive testing are used. However, many traditional non-destructive testing methods used to assess the state of mining equipment (SME) have a number of significant limitations, the main of which is that all these methods can confidently identify already formed, relatively large defects. In addition, the human factor plays an important role in their detection. The paper describes the operation algorithm of the software module for assessing the current state of the SME based on the patterns of changes in the structural-phase state and fields of internal stresses of the metal and the use of the spectral-acoustic method of non-destructive testing. The developed software module for assessing the current state of mining equipment makes it possible to automate the process of assessing the health of equipment at hazardous production facilities, as well as integrating a monitoring system for

destructive testing, structural-phase state, internal stresses

the current state of metal structures operating under load and pressure into existing data processing centers for display to the operator of the dispatcher console, which will significantly reduce the labor intensity of work on resource evaluation.

For citation: Smirnov A.N., Ababkov N.V., Nikitenko M.S., Pimonov M.V., Teleguz A.S., Nesterenko K.S., Medvedchikov M.N. Software module for assessing the state of mining equipment based on regularities of changes in the structural-phase state and fields of metal internal stress. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2022; 6(154):50-58. (In Russ., abstract in Eng.). doi: 10.26730/1999-4125-2022-6-50-58

REFERENCES

1. Rasporyazheniye pravitel'stva RF "Programma razvitiya ugol'noy promyshlennosti Rossii na period do 2030 goda" ot 21.06.2014 № № 1099-R // 2014.
2. Dolgosrochnaya programma razvitiya ugol'noy promyshlennosti rossii na period do 2030 goda. Ministerstvo energetiki RF. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1846> (data obrashcheniya: 09.09.2022).
3. Petrova I.M., Gadolina I.V., Botvina L.R., Demina Yu.A., Tyutin M.R. Vliyaniye dlitel'nogo stareniya na kharakteristiki ustalosti stali 45. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2011; 77(1)58–67.
4. Pachurin G.V. Vliyaniye temperatury na mekhanicheskiye svoystva listovykh konstruksionnykh staley. *Fundamental'nyye issledovaniya*. 2014; 1:18–23.
5. Nikitenko M.S. Evaluation of elements loading in the metal structures of powered support units. *V sbornike: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. "International Scientific and Research Conference on Knowledge-Based Technologies in Development and Utilization of Mineral Resources"*. 2016. 012007.
6. Stepanova L.N., Kabanov S.I., Bekher S.A., Nikitenko M.S. Microprocessor Microprocessor multi-channel strain-gauge systems for dynamic tests of structures. *Automation and Remote Control*. 2013; 74(5):891-897.
7. Butusov D.S. [et al.] Monitoring i upravleniye napryazhenno-deformirovannym sostoyaniyem tekhnologicheskikh truboprovodov kompressornykh stantsiy kak sredstva snizheniya urovnya riska avarii ot defektov, vyzvannykh korroziyonnyim rastreskivaniyem pod napryazheniyem. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*. 2013; 3(93):88–97.
8. Osipov K.O. [et al.] Kompleksnyy kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya krupnogabaritnykh metallokonstruktsiy na osnove akustiko-emissionnogo i magnitnogo metodov nerazrushayushchego kontrolya. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Real'nost' – summa informatsionnykh tekhnologiy"*. 2015:125–129.
9. Botvina L.R., Kushnarenko V.M., Tyutin M.R., Levin V.P., Morozov A.Ye., Bolotnikov A.I. Stadiynost' protsessa razrusheniya i ostatochnaya prochnost' trubnoy stali posle dlitel'noy ekspluatatsii. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2021; 24(1):50–61.
10. Lisin Yu.V., Makhutov N.A., Neganov D.A., Studenov Ye.P., Skorodumov S.V. Kompleksnyye mekhanicheskiye ispytaniya dlya raschetov prochnosti magistral'nogo truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2018;84(4):47–59.
11. Demina Yu.A., Tyutin M.R., Marchenkov A.Yu., Levin V.P., Botvina L.R. Vliyaniye dlitel'noy ekspluatatsii na fiziko-mekhanicheskiye svoystva i mekhanizmy razrusheniya trubnykh staley klassa prochnosti kh70. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. 2021; 12:23–35.
12. Gafarova V.A., Abdulganiyeva O.R., Ivanova A.D., Bugay D.Ye., Kuzeyev I.R., Latypov O.R. Izmeneniye mikrostruktury stali 09G2S pri udarnykh nagruzkakh. *Neftegazovoye delo*. 2021; 19(6):117–123.
13. Hutsaylyuk V., Maruschak P., Konovalenko I., Panin S., Bishchak R., Chausov M. Mechanical Properties of Gas Main Steels after Long-Term Operation and Peculiarities of Their Fracture Surface Morphology. *Materials*. 2019; 12(3):491.
14. Pachurin G.V., Filippov A.A., Goncharova D.A., Kuz'min N.A., Gevorgyan G.A. Ustalost' konstruksionnykh materialov v korroziyonno-aktivnykh sredakh. *Vestnik mashinostroyeniya*. 2020; 12:56–60.
15. Ababkov N.V. Programma dlya otsenki sostoyaniya i prognozirovaniya rabotosposobnosti oborudovaniya, dlitel'noye vremya ekspluatiruyemogo v slozhnykh napryazhennykh usloviyakh / Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM 2022611395, 25.01.2022. Zayavka № 2021682263 ot 29.12.2021.

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Nikolai V. Ababkov, C. Sc. in Engineering, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyyaya Str., 28), The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry SB RAS, (650065, Russia, Kemerovo, Sovetskiy Ave., 18), e-mail: n.ababkov@rambler.ru

Mikhail S. Nikitenko, C. Sc. in Engineering, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyyaya Str., 28), The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry SB RAS, (650065, Russia, Kemerovo, Sovetskiy Ave., 18)

Maxim V. Pimonov, C. Sc. in Engineering, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyyaya Str., 28), The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry SB RAS, (650065, Russia, Kemerovo, Sovetskiy Ave., 18)

Alexander N. Smirnov, Dr. Sc. in Engineering, Prof., T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyyaya Str., 28)

Alexander S. Teleguz, leading engineer of the geophysical research laboratory of the mountain range, The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry SB RAS, (650065, Russia, Kemerovo, Sovetskiy Ave., 18)

Kirill S. Nesterenko, student, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyyaya Str., 28)

Maxim N. Medvedchikov, student, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyyaya Str., 28)

Contribution of the authors:

Nikolai V. Ababkov– statement of the research problem, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of the study, data collection and analysis, conclusions, writing the text.

Mikhail S. Nikitenko– statement of the research problem, review of relevant literature, conceptualization of the study, data collection and analysis, conclusions, writing the text.

Maxim V. Pimonov– review of relevant literature, conceptualization of the study, data collection and analysis, conclusions, writing the text.

Alexander N. Smirnov– scientific management, review of relevant literature, conceptualization of the study.

Alexander S. Teleguz– writing and discussing a software product.

Kirill S. Nesterenko– writing and discussing a software product.

Maxim N. Medvedchikov– writing and discussing a software product.

All authors have read and approved the final manuscript.

