

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИЗНОСА ФУТЕРОВОК ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ И ГОРНО-ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Голиков Н.С.¹, Шашурин Н.С.¹, Михалченков Е.В.¹, Крепов К.С.¹, Деревянко А.А.¹,
Соколов М.В.²

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург;

²Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты

Ключевые слова: мониторинг износа футеровок, ультразвуковой контроль толщины, датчик износа футеровок, интернет вещей, дробильно-измельчительное оборудование, горнотранспортные машины.

Аннотация. В статье представлен обзор современных систем, обеспечивающих автоматизированный удаленный мониторинг износа футеровок широкого спектра машин и оборудования горной отрасли, составленный на базе открытых источников – интернет-сайтов и рекламных брошюр производителей, научных публикаций, а также патентного поиска по отечественным, иностранным и международным базам. На фоне анализа традиционных подходов к оценке состояния изношенных футеровок описана актуальность применения отмеченной инновационной системы и реализуемого с её помощью подхода к обслуживанию машин и оборудования. Описано назначение, область применения и структурная компоновка отмеченных систем, а также рассмотрены недостатки, ограничивающие их широкое внедрение на производстве. Выполнен сравнительный анализ конструкций и технических характеристик современных коммерчески доступных решений. Дана оценка динамики рынка и перспектив его роста.

OVERVIEW OF MODERN AUTOMATED REMOTE MONITORING SYSTEMS FOR LINING WEAR OF MINING AND PROCESSING MACHINERY AND EQUIPMENT

Golikov N.S.¹, Shashurin N.S.¹, Mikhilchenkov E.V.¹, Krepov K.S.¹, Derevyanko A.A.¹,
Sokolov M.V.²

¹Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg;

²Mining Institute Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity

Keywords: lining wear monitoring, ultrasonic thickness monitoring, lining wear sensor, Internet of things, crushing and crushing equipment, mining vehicles.

Abstract. The article presents an overview of modern systems providing automated remote monitoring of lining wear of a wide range of mining machinery and equipment, compiled on the basis of open sources – Internet sites and promotional brochures of manufacturers, scientific publications, as well as patent search on domestic, foreign and international databases. Against the background of an analysis of traditional approaches to assessing the condition of worn linings, the relevance of using the noted innovative system and the approach to machine and equipment maintenance implemented with its help is described. The purpose, scope and structural layout of the mentioned systems are described, as well as the disadvantages limiting their widespread implementation in production. A comparative analysis of the designs and technical characteristics of modern commercially available solutions has been performed. An assessment of the market dynamics and its growth prospects is given.

Актуальность проблематики. Стремительное развитие горной промышленности, наблюдаемое в последнее время, определяется главным образом потребностями в существенном наращивании производительности горных предприятий, повышении качества выпускаемой продукции и снижении затрат на эксплуатацию технологических машин и оборудования, что обеспечивается в числе прочего внедрением средств автоматизации [1], повышением эффективности работы машин [2] и увеличением коэффициента их технического использования [3].

Надо отметить, что ощутимая доля плановых и аварийных простоев оборудования, а также эксплуатационных расходов (до 30% общих расходов горной отрасли) связаны с интенсивным изнашиванием и заменой футеровок [4-6], имеющих ко всему прочему высокую себестоимость (до 10-15% от стоимости оборудования [7]) и являющихся одними из наиболее часто заменяемых элементов горных машин (до 1-ого раза в месяц [8]).

Наиболее остро вопрос обстоит в области дробления и измельчения, где футеровка не только защищает элементы рабочего органа машины от контактов с горной породой, как, скажем у ковша экскаватора или кузова автосамосвала [9], но в значительной степени определяет эффективность технологического процесса, характеризующегося целым набором показателей (крупность и форма кусков перерабатываемого материала, степень дробления и измельчения, пропускная способность и производительность, выход требуемых классов, энергоемкость, в том числе удельная и т.д. [10, 11]), колебания которых вынуждают технологов либо увеличивать количество стадий переработки, либо с помощью дополнительных единиц техники замыкать производственный цикл, создавая циркуляционную нагрузку, что в любом случае неизбежно приводит к росту капитальных и эксплуатационных затрат предприятия [12].

В среднем затраты на техническое обслуживание в горной отрасли колеблются в пределах 20-60% всех эксплуатационных расходов [13]. В наиболее капиталоемких машинах перерабатывающей промышленности, барабанных мельницах, доля затрат на изнашиваемые детали максимально высока и, например, для шарового измельчения составляет 62% общих затрат на эксплуатацию, при этом на втором месте находятся расходы на техническое обслуживание [14].

Слишком ранняя замена футеровок приводит к увеличению числа плановых остановок, а слишком поздняя – к появлению внеплановых. Упущенная выгода при этом доходит до 1,5 млн. руб. за один час простоя. Так, например, один день простоя мельницы может обернуться предприятию убытком в 50 млн. руб. Помимо прочего, запущенное после остановки оборудование выходит на номинальный режим не сразу, из-за чего выработка продукта дополнительно снижается. Даже после возобновления подачи материала в машину типичный период снижения производительности составляет не менее 5 минут [12].

Отмеченные факторы указывают на то, что у современных горнодобывающих и горно-перерабатывающих предприятий в целях сокращения издержек и наращивания выхода полезного продукта возникает отчетливая потребность во всё более широком внедрении в производство инструментов отслеживания изменений состояния футеровок на этапе их эксплуатации [15, 16].

Традиционные средства контроля износа футеровок. Часто при принятии решения о замене футеровок на предприятиях перерабатывающей промышленности руководствуются данными косвенного мониторинга, например, наблюдая за изменяющейся мощностью, потребляемой приводом [17], или гранулометрической характеристикой продукта. При всей простоте отмеченных подходов они не дают точных данных, поскольку показатели такого мониторинга в значительной степени зависят от физико-механических характеристик перерабатываемой руды, равномерности и полноты загрузки рабочей камеры, выбранного режима работы машины и многих других факторов, которые не могут оставаться постоянными даже на протяжении отдельно взятой смены. Помимо прочего для транспортных машин такие решения не пригодны в принципе.

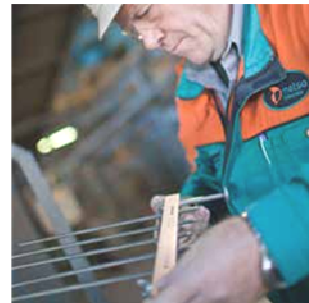
Ручное измерение (рис. 1), наиболее распространенное ввиду своей простоты и дешевизны, обеспечивает прямой контроль, но предполагает остановку технологических линий, невозможность ведения непрерывного и удаленного наблюдения, часто отсутствие количественной оценки состояния машин, высокую трудоемкость выполняемых работ и наличие рисков для здоровья и жизни человека, а также высокую стоимость оборудования и связанных с его обслуживанием операций [18, 19]. К тому же в данном случае измерения снимаются с ограниченного количества контрольных точек, что не позволяет полностью передать топологию износа, но является особенно важным, если процесс изнашивания на разных участках поверхности протекает неравномерно.



а



б

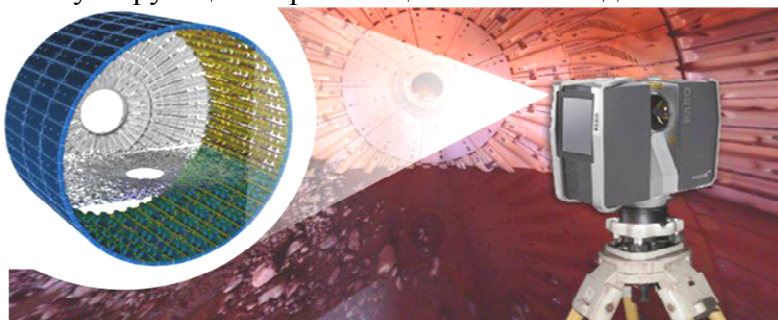


в

Рис. 1. Ручные методы оценки профиля износа: а) графическая фиксация контура осевого сечения изношенной брони конусной дробилки на картонной подложке; б) контактно-механическое измерение профиля брони конусной дробилки зондом; в) контроль износа мельничной футеровки с применением профилометра (Metso:Outotec, Финляндия)

В последнее время появились и получили широкое распространение системы лазерного сканирования (лидары), применяемые для точного построения топологии поверхности футеровок (рис. 2), предлагаемые некоторыми отечественными компаниями, такими как ООО «Рубиус Групп» и ООО «Промышленные Технологии», а также рядом зарубежных компаний, такими как Metso:Outotec (Финляндия), Bradken (Австралия) [20, 21] и многими другими. Однако эти системы не лишены основных ограничений традиционного ручного контроля, реализуемого при плановом техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) – предполагают остановку и очистку рабочей камеры машины, участие человека и т.д. Помимо прочего они имеют и собственные недостатки: высокую стоимость и дополнительные требования по квалификации обслуживающего персонала.

Получается, наиболее точные решения обеспечивают лишь разовые замеры, которые проводятся либо по окончании срока службы футеровок, либо совмещаются с плановым ТОиР, что в виду небольшой дискретности наблюдений не обеспечивает полноты информации о процессе изнашивания и её своевременного поступления для оперативного принятия решений эксплуатирующими организациями о необходимости замены отработавших частей.



а



б

Рис. 2. Лазерная система контроля износа: а) система Vision Insight (Bradken, Австралия) для мельничных футеровок; б) система CrusherMapper (Metso:Outotec, Финляндия) для брони конусных дробилок

Концепция системы автоматизированного дистанционного мониторинга износа футеровок. В связи с вышеизложенным наиболее удачным решением выглядит *система автоматизированного дистанционного мониторинга износа футеровок (САДМИФ)* (рис. 3) на базе встраиваемых в саму футеровку датчиков, способных в режиме реального времени точно отслеживать ее изменяющуюся в процессе изнашивания толщину, осуществляя при этом непрерывную передачу данных в контрольный центр или на мобильное устройство оператора. И хотя идея таких систем существовала давно (первый патент датируется 2007 годом, а первая публикация по теме 1995-м годом [22]), на рынке они появились всего несколько лет назад, не получив пока широкой известности и имея лишь точечное внедрение на весьма ограниченном числе предприятий, видов оборудования и типов футеровок.

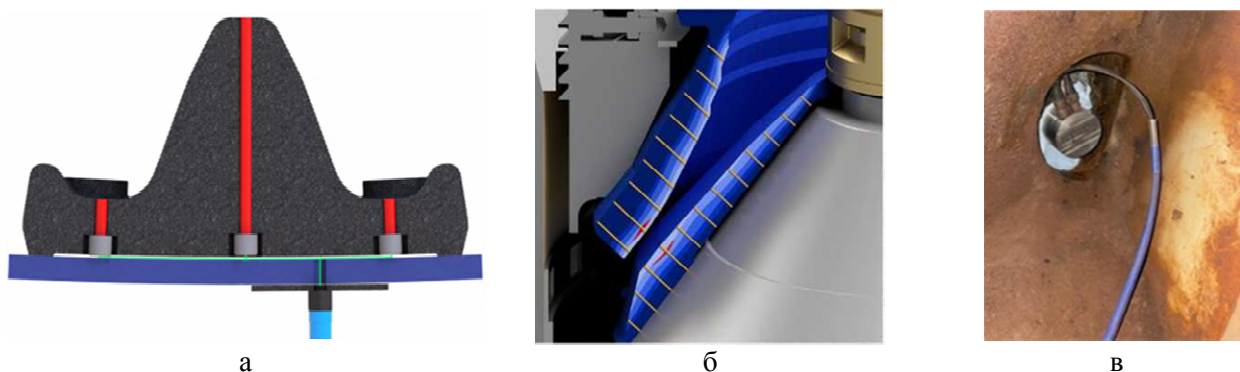


Рис. 3. Некоторые примеры доступных на рынке коммерческих решений САДМИФ: а) Wireless Wear Sensor (Bissalloy Digital Solutions, Австралия); б) WearVision (HEPI, США) для броней конусных дробилок; в) HotSense (Ionix, Великобритания) для футеровок перегружающих бункеров

Причинами, обуславливающими пока весьма сдержанный интерес к подобным системам со стороны производства являются: высокая стоимость; необходимость внесения изменений в конструкцию футеровок и прочих элементов машин, что помимо дополнительных затрат эксплуатирующих организаций может привести к потере гарантийных обязательств со стороны производителей оборудования; невозможность разработки универсального решения, т.к. конструкции датчиков существенно отличаются для разных видов машин, их типоразмеров и даже моделей разных производителей; уязвимости технологии интернета вещей (IoT) с точки зрения безопасности данных.

Несмотря на отмеченные недостатки, они предоставляют эксплуатирующим организациям широкие возможности, позволяя: предотвращать аварийные отказы оборудования, вызванные критическим уровнем износа; более полно использовать ресурс футеровок, увеличивая межремонтные периоды и сокращая объем промышленных отходов; корректировать и более точно планировать мероприятия по замене изношенных футеровок в рамках ТОиР, включая заказ, доставку и складирование запасных частей.

В наиболее общем виде структурная схема САДМИФ содержит следующие компоненты (рис. 4): 1) датчики износа футеровки (ДИФ), включающие в себя индикаторный элемент, систему контроля его длины и систему передачи данных с результатами снятых измерений; 2) систему сбора данных с нескольких датчиков и передачи их на сервер; 3) систему хранения данных в виде сервера и облачного хранилища; 4) систему обработки данных; 5) систему интерпретации данных на базе стационарных или мобильных устройств.

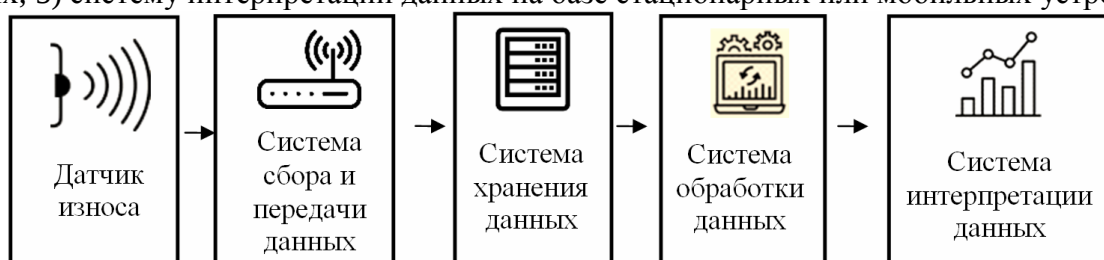


Рис. 4. Структурная схема САДМИФ

Конструкция индикаторного элемента (см. табл. 1), тип измерительной системы и способ передачи данных могут существенно отличаться у разных производителей. В случае ультразвукового контроля собственный индикаторный элемент в САДМИФ может отсутствовать, а ультразвуковой датчик устанавливаться непосредственно на саму футеровку машины (рис. 3, в).

Индикаторный элемент конструктивно может быть реализован в виде болта, шпильки или штифта (рис. 3, б). Он устанавливается непосредственно в тело футеровки так, чтобы одна из его торцевых поверхностей располагалась заподлицо с изнашиваемой поверхностью футеровки. Болтовое исполнение (WearSense, WearMon, Smart Bolt, ArcoBolt, Synertex)

предполагает совмещение в индикаторном элементе сразу двух функций – крепежной и измерительной, что в некоторых случаях позволяет даже избежать модернизации футеровочных плит и корпуса машины, поскольку отверстия под футеровочные болты в них уже заранее предусмотрены. Система контроля длины и система беспроводной передачи данных монтируются в едином корпусе и устанавливаются на выступающем с наружной стороны корпуса машины резьбовом участке футеровочного болта, играя роль либо основной несущей гайки, либо контргайки. Штифтовое исполнение индикаторного элемента (WearVision, WearVue, Wireless Wear Sensor) применяется при безболтовом креплении футеровок, при ограниченном пространстве с опорной стороны футеровок или при высокой плотности расположения датчиков, что актуально для футеровок, изнашивание поверхности которых протекает неравномерно, вследствие чего их кривизна в процессе работы существенно меняется. В этом случае в футеровке дополнительно выполняются отверстия, в которые запрессовываются цилиндрические индикаторные штифты. Шпильное исполнение реализовано только в одном из существующих продуктов (WearVue) как опциональный вариант и применяется для тонколистовых футеровок, в том числе выполненных из мягких материалов.

Табл. 1. Обзор рынка современных САДМИФ (часть 1 из 3-х)

№	1	2	3	4	5
Продукт	Wear Sense	WearMon	Smart Bolt	Wear Vision	Wireless Wear Sensor
Производитель	Metso: Outotec	S5 System	Plover Smart Mining	HEPI	Bisalloy Digital Solutions
Страна	FIN	AU	AU	USA	AU
Год	2022	2021	2022	2021	2023
Тип индикаторного элемента	болт	болт	болт	штифт	штифт
Материал индикаторного элемента	сталь	сталь	сталь	сталь	сталь
Технология измерения (1)	ЭЛ	?	?	УЗ	ЭЛ
Машины и оборудование	дробилкибункера, кузова	универсален (2)	мельницы	дробилки	универсален

Технология измерения длины индикаторного элемента в САДМИФ может быть реализована тремя принципиально отличающимися методами: электрическим, ультразвуковым и оптическим. Электрический метод (WearSense, Wireless Wear Sensor, SmartLiner, Wear Asset Monitoring, Synertrex) заключается в измерении силы тока электрической цепи лестничного сопротивления, размещенной в теле индикаторного элемента таким образом, что в процессе его изнашивания происходит поочередное удаление резисторов с конца цепи, приводящее к изменению её общего сопротивления. Ультразвуковой метод (WearVision, HotSense, Wearnetics, Liner Wear on SAG and Rotating Mills) заключается в измерении времени прохождения через индикаторный элемент ультразвукового импульса, сгенерированного на его внешнем торце и отраженного от торца, совмещенного с изнашиваемой поверхностью футеровки. Оптический метод (WearVue) заключается в фиксации средствами визуального осмотра или видеомониторинга изменения окраски торцевой поверхности цилиндрического индикаторного элемента, изготовленного из резины или эпоксидной смолы и имеющего от двух до четырёх продольных участков разных цветов (голубой, зеленый, желтый, красный).

Табл. 1. Обзор рынка современных САДМИФ (часть 2 из 3-х)

№	6	7	8	9
Продукт	HotSense	SmartLiner	Wear Asset Monitoring	Wearnetics
Производитель	IONIX	Bradken	Alloy Steel International	BMH Global
Страна	GB	AU	AU	AU
Год	2023	2025	2020	2025
Тип индикаторного элемента	-	болт / штифт	болт	-
Материал индикаторного элемента	-	сталь	сталь	-
Технология измерения (1)	УЗ	ЭЛ	ЭЛ	УЗ
Машины и оборудование	бункера, трубы	бункера, труба	универсален (2)	перегрузочный лоток между конвейерами

Дискретность измерений зависит от технологии измерения длины. При ультразвуковом методе она практически ничем не ограничена и может задаваться оператором в достаточно широком диапазоне значений, при электрическом – определяется количеством резисторов в цепи лестничного сопротивления, а при оптическом – количеством цветовых переходов, число которых на единицу меньше числа цветовых участков индикаторного стержня.

Материал индикаторного элемента, в датчике, реализующем ультразвуковой и электрический методы измерения, представлен сталью, а в датчике, реализующем оптический способ – эпоксидной смолой. Сталь позволяет индикаторному элементу выполнять функции крепёжного элемента в то время, как эпоксидная смола обеспечивает максимальную технологичность установки индикаторов в футеровку, а также возможность выполнения различной окраски для разных участков индикатора.

Табл. 1. Обзор рынка современных САДМИФ (часть 3 из 3-х)

№	10	11	12	13	14
Продукт	Liner Wear on SAG and RM	Smart Matrox	Abreco IoT	SYNER TREX	Wear Vue
Производитель	Innerspec Technologies	Rochling	Abreco	Weir Minerals	Wear Vue
Страна	USA	DE	CA	GB	AU
Год	?	2023	2021	2021	2024
Тип индикаторного элемента	-	?	?	-	Шпилька, штифт
Материал индикаторного элемента	-	?	?	-	Эпоксидная смола
Технология измерения (1)	УЗ	?	?	ЭЛ	ОП / ВО
Машины и оборудование	Мельницы	Универсален (2)	Универсален (3)	Насосы, грохоты,	Универсален (3)

Условные обозначения:

(1) – технология измерения: ЭЛ – электрическая; УЗ – ультразвуковая; ОП – оптическая; ВО – визуальный осмотр.

(2) – все, кроме ковшей экскаваторов, конвейерных лент и оборудования гидротранспорта.

(3) – все, кроме конвейерных лент и оборудования гидротранспорта.

Обзор рынка. Рынок САДМИФ начал формироваться всего 4 года назад. Однако за это небольшое время на него было выведено 14 коммерчески доступных решений, представленных иностранными компаниями преимущественно из Австралии (рис. 5, а). Пик выхода новых САДМИФ пришелся на 2021 год (рис. 6, б), после чего вплоть до сегодняшнего дня на рынке наблюдается спад предложений, что говорит о временной стабилизации спроса на данные решения.

Доступные сегодня на рынке САДМИФ предназначены для широкого спектра горнотранспортных и горно-перерабатывающих машин и оборудования (рис. 6, а). При этом наибольшее количество решений разработано для бункеров-перегрузателей, конусных дробилок, барабанных мельниц и трубопроводов. Наименее обеспеченными с точки зрения предлагаемых решений остаются ковши экскаваторов, кузова и шины карьерных автосамосвалов, вибрационные грохоты, гидроциклоны и шламовые насосы.

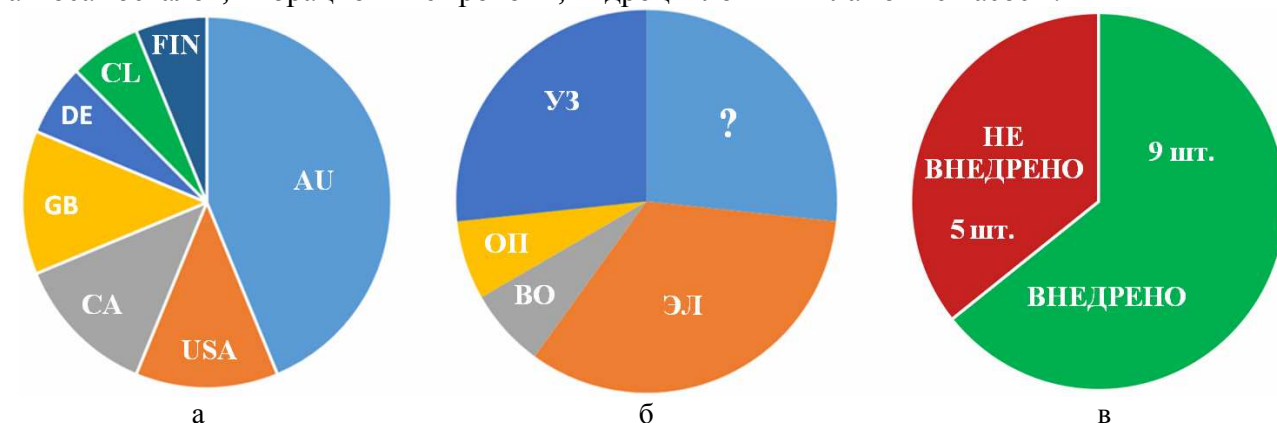


Рис. 5. Распределение САДМИФ по странам компаний-производителей (а), реализуемой технологии измерений (б) и долям внедренных решений (в)

Надо отметить, что не все существующие САДМИФ пока внедрены в производство (ну или как минимум не по всем из них информация о внедрении доступна в открытых источниках). Так, известно о 9-ти внедренных продуктах из 14-ти коммерчески доступных. При этом, что касается внедренных решений подробной информации практически нет.

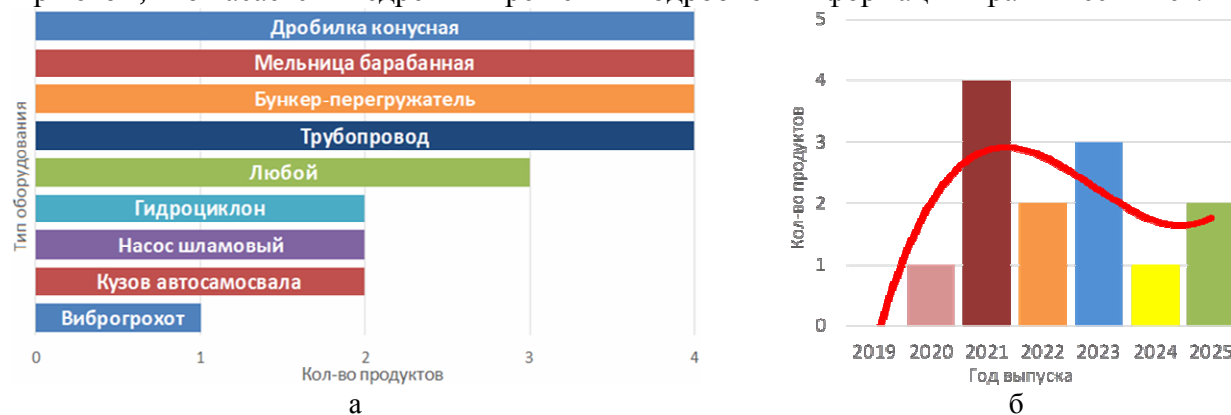


Рис. 6. Распределение доступных на рынке коммерческих решений САДМИФ по типамоборудования (а) и годам внедрения (б)

Так, на сайте компании Bisalloy Digital Solutions указано о реализации более 25-ти проектов с установкой более 150-ти датчиков без указания конкретных эксплуатирующих организаций. Значительная часть решений была внедрена в Австралии, например, система WearVision – на рудниках The Hope Downs mine (принадлежащих третьей по величине в мире транснациональной горно-металлургической компании Rio Tinto), а также на золотом руднике Newmont Boddington, принадлежащем американской компании Newmont Corporation. Система SmartLiner эксплуатируется где-то в регионе Пилбара (предприятие не указано) и т.д. Многие решения (WearSense, WearVision, WearVue) были внедрены международными

компаниями-гигантами, такими как BHP, Fortescue Metals Group, Rio Tinto. Компания IONIX внедряла свое решение HotSense для бункера по перегрузке железных руд (компания не указана), а также хвостовых трубопроводов в южноамериканском регионе.

Выводы. САДМИФ появились на рынке горнотранспортных и горно-перерабатывающих машин и оборудования всего 4 года назад, при этом отечественные решения пока отсутствуют, а некоторые зарубежные еще даже не внедрены в производство. Тем не менее, САДМИФ представляет совершенно новый, инновационный подход к эксплуатации техники, предлагая вместо традиционных методов контроля, непрерывный и удаленный сбор данных, позволяющий минимизировать человеческий фактор, более полно использовать ресурс футеровок, снижая риски аварийных отказов. А поскольку развитие этих систем полностью укладывается в русло ключевых тенденций горной отрасли, таких как повышение производительности предприятий и снижение эксплуатационных расходов, можно уверенно утверждать, что со временем САДМИФ ожидает значительно более широкое внедрение.

Список литературы

1. Гришин И.А., Бочков В.С., Великанов В.С., Дёрина Н.В., Суровцов М.М., Морева Ю.А. О возможности реализации системы контроля ширины разгрузочной щели в конусных дробилках // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2022. – Т. 20, №2. – С. 13-22. – doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22.
2. Господариков А.П., Ефимов Д.А. О некоторых аспектах повышения эффективности дробильного оборудования на рудоподготовительном переделе // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №18. – С. 128-133. – DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-128-133.
3. Журавлев А.Г., Чендырев М.А., Глебов И.А., Черепанов В.А. Методический подход к разработке регламентов технического обслуживания и ремонта дробильного оборудования горнодобывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №3-1. – С. 543-556. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-543-556.
4. Белов Н.В., Бородина М.Б., Смирнова О.А., Часовских А.С. Анализ отказов элементов конусных дробилок и причин их возникновения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №3. – С. 17-27. – DOI: 10.25018/0236-1493-20213-0-17-27.
5. Sinha R.S., Mukhopadhyay A.K. Failure rate analysis of Jaw Crusher: a case study // Sādhanā. 2019, vol. 44, p. 17. doi.org/10.1007/s12046-018-1026-4.
6. Bogdanovská G., Benková M., Bednářová D. Analysis of Causes and Consequences of Failures in Process of Andesite Crushing by Jaw Crusher // Processes. 2025, vol. 13(1), p. 225. doi.org/10.3390/pr13010225.
7. Härkisaari P. Wear and friction effects on energy consumption in the mining industry: Master of science thesis. – Tampere: Tampere University of Technology, 2015.
8. Терехин Е.П., Тулинов Р.А. Модернизация футеровочных броней конусных дробилок мелкого дробления // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – №2. – С. 146-155. – DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-146-155.
9. Болобов В.И., Ахмеров Э.В., Ракитин И.В. Влияние вида горной породы на закономерности изнашивания коронки зуба ковша экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №6-2. – С. 189-204. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_189.
10. Липатов А.Г., Фуринов В.О., Холодков А.А., Журавлев А.Г. Инновационные решения в повышении эффективности крупного дробления на железорудных горно-обогастительных комбинатах // Горная промышленность. – 2023. – №3. – С. 93-100. – DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-93-100.
11. Бочкова К.В., Потапов В.Я., Комиссаров А.П., Бочков В.С., Потапов В.В. Повышение эффективности дробильного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – №6(176). – С. 15-25. – DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-15-25.
12. Hulthén E. Real-time optimization of cone crushers. – Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2010.
13. Sharma N.R., Mishra A.K., Jain S. OEE improvement of mining shovels by survival analysis and linear optimisation as per sustainable development goals // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2022, vol. 36, no. 5, pp. 323-355. DOI: 10.1080/17480930.2022.2044138.
14. Sayadi A.R., Khalesi M.R., Borji M.K. A parametric cost model for mineral grinding mills // Minerals Engineering. 2014, vol. 55, pp. 96-102. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.09.013.
15. Ou T., Chen W. Modelling of gyratory crusher liner wear using a digital wireless sensor // Sensors. 2023, vol. 23, no. 21, p. 8818. DOI: 10.3390/s23218818.
16. Castañeda-Quilcaro F.D., Cordova-Yavar C.L., Vidal Endara R.F. Product Design to Improve the Measurement and Projection of Mill Liner Wear // Engineering Proceedings. 2025, vol. 83, no. 1, p. 4. doi.org/10.3390/engproc2025083004.

17. Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Малькова Я.М. Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 686-700. – DOI: 10.31897/PMI.2022.91.
18. Coandă P., Avram M., Constantin V. A state of the art of predictive maintenance techniques // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 997, no. 1, p. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/997/1/012039.
19. Андреева Л.И. Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники // Известия вузов. Горный журнал. – 2021. – №4. – С. 83-91. – DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.
20. Franke J., Redman N., Johnson G., Michalek S. Mill Management Using MillMapper™ – An Answer to the Skills Shortage – A Tool for Cost Cutting // Tenth Mill Operators' Conference 2009. – Adelaide, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series Number 11/2009, pp. 71-80.
21. Toor P., Franke J., Powell M., Bird M., Waters T. Designing liners for performance not life // Minerals Engineering. 2013, vol. 43, pp. 22-28. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.07.004.
22. Moshghbar M., Bearman R.A., Parkin R. Optimum control of cone crushers utilizing an adaptive strategy for wear compensation // Minerals engineering. 1995, vol. 8(4-5), pp. 367-376. DOI: 10.1016/0892-6875(95)00002-8.

References

1. Grishin I.A., Bochkov V.S., Velikanov V.S., Dyorina N.V., Surovtsov M.M., Moreva Yu.A. Implementing a Discharge Slot Width Control System in Cone Crushers // Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 13-22. doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-13-22.
2. Gospodarikov A.P., Efimov D.A. On some aspects of increasing the efficiency of crushing equipment at ore processing // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023, no. 18, pp. 128-133. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-18-128-133.
3. Zhuravlev A.G., Chendyrev M.A., Glebov I.A., Cherepanov V.A. A methodical approach to the development of regulations for the maintenance and repair of crushing equipment of mining enterprises // Mining Information and Analytical Bulletin. 2020, no. 3-1, pp. 543-556. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-543-556.
4. Belov N.V., Borodina M.B., Smirnova O.A., Chasovskikh A.S. Failure analysis of main components of cone crushers // Mining Information and Analytical Bulletin. 2021, no. 3, pp. 17-27. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-17-27.
5. Sinha R.S., Mukhopadhyay A.K. Failure rate analysis of Jaw Crusher: a case study // Sādhanā. 2019, vol. 44, p. 17. doi.org/10.1007/s12046-018-1026-4.
6. Bogdanovská G., Benková M., Bednárová D. Analysis of Causes and Consequences of Failures in Process of Andesite Crushing by Jaw Crusher // Processes. 2025, vol. 13(1), p. 225. doi.org/10.3390/pr13010225.
7. Härkisaari P. Wear and friction effects on energy consumption in the mining industry: Master of science thesis. – Tampere: Tampere University of Technology, 2015.
8. Terekhin E.P., Tulinov R.A. Modernization of lining armor of cone crushers of small crushing // Mining information and analytical bulletin. 2019, no. 2, pp. 146-155. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-146-155.
9. Bolobov V.I., Akhmerov E.V., Rakitin I.V. Influence of the type of rock on the patterns of wear of the excavator bucket tooth crown // Mining Information and Analytical Bulletin. 2022, no. 6-2, pp. 189-204. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_189.
10. Lipatov A.G., Furin V.O., Kholodkov A.A., Zhuravlev A.G. Innovative solutions in increasing the efficiency of coarse crushing at iron ore mining and processing plants // Mining industry. 2023, no. 3, pp. 93-100. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-3-93-100.
11. Bochkova K.V., Potapov V.Ya., Komissarov A.P., Bochkov V.S., Potapov V.V. Improving the efficiency of crushing equipment // Mining equipment and electromechanics. 2024, no. 6(176), pp.15-25. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-15-25.
12. Hulthén E. Real-time optimization of cone crushers. – Chalmers Tekniska Högskola (Sweden), 2010.
13. Sharma N.R., Mishra A.K., Jain S. OEE improvement of mining shovels by survival analysis and linear optimisation as per sustainable development goals // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2022, vol. 36, no. 5, pp. 323-355. DOI: 10.1080/17480930.2022.2044138.
14. Sayadi A.R., Khalesi M.R., Borji M.K. A parametric cost model for mineral grinding mills // Minerals Engineering. 2014, vol. 55, pp. 96-102. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.09.013.
15. Ou T., Chen W. Modelling of gyratory crusher liner wear using a digital wireless sensor // Sensors. 2023, vol. 23, no. 21, p. 8818. DOI: 10.3390/s23218818.
16. Castañeda-Quilcaro F.D., Cordova-Yavar C.L., Vidal Endara R.F. Product Design to Improve the Measurement and Projection of Mill Liner Wear // Engineering Proceedings. 2025, vol. 83, no. 1, p. 4. doi.org/10.3390/engproc2025083004.
17. Zhukovsky Yu.L., Korolev N.A., Malkova Ya.M. Monitoring of the grinding state in drum mills by the resultant moment on the shaft // Journal of Mining Institute. 2022, vol. 256, pp. 686-700. DOI: 10.1088/1757-899X/997/1/012039.
18. Coandă P., Avram M., Constantin V. A state of the art of predictive maintenance techniques // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 997, no. 1, p. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/997/1/012039.

19. Andreeva L.I. Choosing a strategy for repair maintenance of mining equipment // News of universities. Mining journal. 2021, no. 4, pp. 83-91. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-83-91.
20. Franke J., Redman N., Johnson G., Michalek S. Mill Management Using MillMapper™ – An Answer to the Skills Shortage – A Tool for Cost Cutting // Tenth Mill Operators' Conference 2009. – Adelaide, Australia: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Publication Series Number 11/2009, pp. 71-80.
21. Toor P., Franke J., Powell M., Bird M., Waters T. Designing liners for performance not life // Minerals Engineering. 2013, vol. 43, pp. 22-28. DOI: 10.1016/j.mineng.2012.07.004.
22. Moshgbar M., Bearman R.A., Parkin R. Optimum control of cone crushers utilizing an adaptive strategy for wear compensation // Minerals engineering. 1995, vol. 8(4-5), pp. 367-376. DOI: 10.1016/0892-6875(95)00002-8.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Голиков Николай Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Машиностроения	Golikov Nikolay Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of mechanical engineering
Шашурин Никита Сергеевич – студент	Shashurin Nikita Sergeevich – student
Михалченков Евгений Витальевич – студент	Mikhalchenkov Evgeniy Vitalievich – student
Крепов Кирилл Сергеевич – студент	Krepov Kirill Sergeevich – student
Деревянко Александр Алексеевич – студент	Derevyanko Aleksandr Alekseevich – student
Соколов Матвей Васильевич – аспирант	Sokolov Matvey Vasilievich – postgraduate student
yvnggeen@yandex.ru	

Получена 10.10.2025