

УДК 622

**СТАНДАРТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
БЕСПИЛОТНЫХ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ**

Купчихин М.А., студент гр. ДАРМРС-103, I курс
Научный руководитель: Мишин А.В., к.т.н., доцент
АНО ВО «Московский университет «Синергия»
г. Москва

AHS (Automatic Hauling System – Автоматизированные системы транспортировки) – комплекс технологий для беспилотной (автономной) работы карьерных самосвалов, которые могут быть применены в открытых горных работах. Их развитие началось во второй половине XX века как одно из ключевых решений проблемы повышения безопасности, снижение эксплуатационных затрат и увеличении производительности в горнодобывающей промышленности.

С начала 2000х японская компания производитель тяжелой специальной техники Komatsu совместно с британо-австралийской горно-металлургической Rio Tinto компанией проводила испытания собственной системы AHS на карьерах Чили и Австралии. Komatsu первая в мире проводит успешную промышленную эксплуатацию и коммерциализует систему AHS.

В 2010х годах к разработкам собственных AHS присоединяются другие производители тяжелой специальной техники: Caterpillar (система Cat MineStar), Hitachi и другие. Масштабные внедрения беспилотного транспорта в карьер происходят в Австралии, Чили, Канаде и Китае.

Россия находится на ранней стадии внедрения AHS. В 2011 году компания «ВИСТ Групп» начинает разработку системы «Интеллектуальный карьер» [1]. Совместно с БелАЗ выпускаются первые прототипы дистанционно управляемых карьерных самосвалов БелАЗ-7513. В 2019 году компания «СУЭК-Хакасия» провела испытания БелАЗ-7513R с системой управления «ВИСТ Групп» на угольном карьере «Черногорский» [2].

В 2020х годах ПАО «КАМАЗ» начинает разработку и испытания линейки карьерных самосвалов «Юпитер» с применением технологий AHS.

Накопленный опыт эксплуатации и применения AHS показывает увеличение производительности перевозок и безопасности [3; 4]. Прогноз совокупного среднегодового темпа роста рынка беспилотных самосвалов в период с 2025 по 2032 год составляет 11,5 % [5].

С учетом мировой тенденции цифровизации всех этапов жизненного цикла продукта, потребности в импортозамещении и нехватки кадров в отдаленных регионах России для отечественных предприятий является актуальной разработка и применение роботизированных карьерных самосвалов.

Проектирование беспилотной карьерной техники представляет собой сложную инженерную задачу. Одной из проблем являются условия эксплуатации на открытых горных разработках в виде рельефа, пыли и непрерывной работы. Взаимодействие с другой специальной техникой, инфраструктурой, персоналом, необходимость обеспечивать эффективный рабочий процесс также являются вызовами при проектировании.

В отсутствие водителя ответственность за безопасность полностью ложится на систему. Без системного подхода к безопасности автомобиль может не только выйти из строя, но и стать источником опасности. Эти положения делают стандарты безопасности фундаментальным элементом при проектировании, обеспечивающим бесперебойную работу, минимизацию рисков для персонала и охрану окружающей среды.

Традиционные подходы к безопасности в горнодобыче в виде постфактумных мер доказали свою ограниченность: человеческий фактор остается основной причиной инцидентов [6]. Беспилотные самосвалы устраняют непосредственное присутствие оператора в кабине, снижая роль человеческого фактора. Однако, в таком случае на первый план выходят системные риски: потери связи, отказ датчиков, искажение входящих данных, неопределенность в сложных сценариях, кибератаки. Именно поэтому стандарты безопасности должны закладываться при проектировании беспилотной техники.

В результате, центральным концепции при проектировании выступает Safety-by-Design. Этот подход подразумевает интеграцию анализа опасностей и снижения рисков в проектирование уже на ранних стадиях жизненного цикла системы - от требований к конструкции до валидации. Согласно [7], процесс начинается с определения границ применения автомобиля, идентификации опасных событий, оценки вероятности и тяжести ущерба и разработки мер по их устранению или минимизации. Тогда, в контексте беспилотных самосвалов Safety-by-Design означает:

- 1) Иерархический подход к защите – безопасность обеспечивается несколькими независимыми уровнями:
 - правила эксплуатации, обучение и процедуры со стороны пользователя;
 - физические барьеры, сигнализация и зоны исключения;
 - функции управления (трафик-контроль, маршрутизация, распознавание среды);
 - функции безопасности (автоматическое ограничение скорости в определенных сценариях, дистанционная остановка, аварийное выключение автомобиля);
- 2) Функциональная безопасность по стандартам [8; 9; 10]: системы должны переходить в безопасное состояние при любом отказе, иметь резервирование критических компонентов и верифицируемую производительность.

Таким образом подход Safety-by-Design при проектировании беспилотных карьерных самосвалов дает ряд преимуществ:

- 1) Опасности устраняются или минимизируются на этапе проектирования, а не компенсируются административными мерами;
- 2) Автономные системы работают предсказуемо, с минимальным влиянием человеческого фактора, обеспечивая непрерывную эксплуатацию со сниженным количеством столкновений и инцидентов с участием техники [11];
- 3) Соблюдение международных кодексов, упрощающее сертификацию и снижающее страховые риски и судебные издержки;
- 4) Легкая интеграция обновлений алгоритмов без потери уровня безопасности.

Ключевым международным стандартом, разработанным специально для автономной горнодобывающей техники, является стандарт [12]. Он устанавливает требования к беспилотным карьерным самосвалам, инфраструктуре, аппаратному и программному обеспечению. Стандарт обязывает проводить оценку рисков на протяжении всего жизненного цикла, раскрывать ограничения системы и обеспечивать безопасное взаимодействие с персоналом. Стандарт дополняет требования стандартов для горнодобывающей техники [13; 14] акцентируя внимание на дополнительных опасностях автономии.

Стандарт [14] устанавливает требования безопасности к самоходным мобильным машинам, эксплуатируемым в подземных горных выработках. Несмотря на то, что стандарт преимущественно ориентирован на подземные условия, он содержит общие подходы к идентификации опасностей, оценки и минимизации рисков, которые могут быть адаптированы для поверхностных карьерных операций с мобильным горным оборудованием. Документ может служить дополнением при анализе рисков, связанных с мобильностью и автономностью самосвалов в условиях ограниченного пространства или смешанных флотов.

Стандарт [15] является фундаментальным и определяет терминологию, принципы и методологию достижения безопасности в проектировании машин. Как писалось выше, он описывает последовательный процесс при решении вопросов безопасности на стадии проектирования и иерархию применения мер по снижению рисков, является основой принципа Safety-by-Design.

Стандарт [9] регулирует процессы проектирования и интеграции частей систем управления, связанных с безопасностью, включая программное обеспечение. Стандарт вводит понятия уровня эффективности защиты (Performance Level, PL) – свойство элемента выполнять свои функции безопасности. Стандарт применяется независимо от используемой технологии (электрика, гидравлика, пневматика, механика и т.д.). В контексте проектирования беспилотных карьерных самосвалов стандарт важен при

разработке систем контроля движения, аварийного торможения и других систем, отказ которых может привести к тяжелым последствиям.

Стандарт [8] является базовым международным стандартом функциональной безопасности электрических, электронных и программируемых электронных систем. Стандарт служит основой для разработки надежных систем управления, где программно-аппаратные комплексы выполняют критически важные функции безопасности.

Стандарт [15] представляет общие принципы и процессы управления рисками на организационном уровне. Стандарт охватывает идентификацию, анализ, оценку, обработку, мониторинг и коммуникацию рисков независимо от отрасли. В контексте проектирования беспилотной техники он дополняет технические стандарты, способствуя интеграции управления рисками в корпоративную систему горнодобывающей компании.

Стандарт [16] определяет требования к системе менеджмента охраны здоровья и безопасности труда. Применительно к беспилотным карьерным самосвалам он обеспечивает интеграцию технической безопасности машин с организационными мерами по защите персонала, минимизируя риски при взаимодействии людей с автономными системами.

Руководство [17] представляет собой отраслевое практическое руководство, дополняющее собой международные стандарты. Документ охватывает все этапы внедрения автономных систем в горнодобыче – от формирования бизнес-кейса до оценки рисков и обеспечения операционной готовности и развертывания. Руководство учитывает специфику поверхностных и подземных операций, включая операции в карьерах, и предлагает рекомендации по взаимодействию заинтересованных сторон (горнодобывающие компании, производителя оборудования, регуляторы и т.д.). Оно напрямую ссылается на [12] и подчеркивает необходимость комплексного подхода к безопасности и подчеркивает, что автономия не заменяет, а дополняет существующие нормы – требуется доказать эквивалентный или более высокий уровень защиты.

Перечисленные стандарты и [17] образуют взаимодополняющую систему нормативных требований. Стандарты [9; 15] регулируют техническую основу проектирования, [8] – функциональную безопасность электронных систем, [12; 14] – отраслевую специализацию для горного оборудования, а [15; 16] – организационный и управленческий уровни. Совместное применение этих документов позволяет реализовать Safety-by-Design на практике, минимизировать риски и обеспечить соответствие лучшим мировым практикам.

Помимо международных стандартов, при проектировании беспилотных самосвалов необходимо учитывать национальные кодексы горнодобывающих регионов, где широко применяется беспилотная техника. Эти документы могут использоваться горнодобывающими компаниями, производителями оборудования и интеграторами как лучшие практики, дополняя вышеописанные стандарты и руководства.

Австралия - лидирующий регион по внедрению AHS. Ниже представлены актуальные кодекс и руководства Австралии, напрямую применимые к проектированию, внедрению и эксплуатации беспилотных карьерных самосвалов на разработках поверхностного вида.

Кодекс [18] - обязательный ориентир для мобильных автономных систем (включая самосвалы), является одним из первых в мире специализированных кодексов по автономному горному делу. Документ определяет желаемые результаты безопасности (desired safety outcomes) для мобильных автономных и полуавтономных систем и устанавливает требования к проектному плану управления. Кодекс акцентирует внимание на идентификации дополнительных рисков при интеграции автономных машин с персоналом, роли компетентного лица (competent person) в управлении опасностями, а также в необходимости демонстрации того, что система безопасна и работает в соответствие с требованиями на протяжении всего жизненного цикла. Уделяется внимание взаимодействию между поставщиками систем и горнодобывающим предприятием. Кодекс требует учета рисков потери контроля, взаимодействия с инфраструктурой, персоналом, а также верификации функциональной безопасности на этапах проектирования и эксплуатации.

Руководство [19] предназначено для управления рисками, возникающими при переходе на автономное оборудование. Руководство охватывает широкий спектр специальной техники, включая карьерные самосвалы. Ключевой акцент делается на идентификации и контроле новых опасностей, связанных с изменением процессов и функциональности машин. Документ требует всесторонней оценки рисков на протяжении жизненного цикла: от проектирования до вывода из эксплуатации, включая создание Autonomous Operating Zone (AOZ) – установленной области, в которой разрешено применение машин в автономном режиме, системы предотвращения столкновений, обеспечение возможности автономного останова, изоляции, управления трафиком, кибербезопасности и учет погодных воздействий. Особое внимание уделяется Critical Control Management (CCM) – управлению средствами контроля рисков для предотвращения Material Unwanted Events (MUE) – серьезные инциденты, приводящие к высоким затратам. Руководство прямо ссылается на [12; 17; 18], практически являясь дополнением к этим стандартам.

Нормативные требования и руководства MSHA (Mine Safety and Health Administration, США) представляют собой обязательную регуляторную базу для всех горных работ в США, включая карьеры. MSHA не имеет единого специализированного кодекса для автономной техники. Ключевыми документами являются [20; 21]. Первый обязывает управляющих месторождением разрабатывать письменные программы безопасности для поверхностного мобильного оборудования с обязательным участием работников и их представителей. Программа должны включать идентификацию опасностей и рисков, специфичных для объекта, а также меры

по их снижению. Второй документ акцентирует внимание на предотвращении аварий с участием карьерных самосвалов посредством камер, систем предупреждений столкновений, управления трафиком, коммуникаций и мероприятий по снижению рисков при разгрузке и загрузке. Документ не специализируется на автономной технике, однако, он к ним применим через требования к системам предупреждения или избежания столкновений, предпусковым проверкам и интеграции технологий.

В российской нормативно-правовой базе при проектировании беспилотных карьерных самосвалов можно опираться на принципы промышленной безопасности опасных производств (ОПО), технического регулирования и гармонизации отечественных стандартов с международными. В России отсутствует единый отраслевой кодекс исключительно для автономных систем в карьерах. Вместо этого применяются общие федеральные нормы и правила (ФНП), обязательные для всех организаций, ведущих горные работы, в сочетании с национальными стандартами (ГОСТ Р), полностью или частично гармонизированными с ISO. Ключевыми регуляторами выступают Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) и Евразийская экономическая комиссия (в части технических регламентов Таможенного союза). Ниже приведены основные документы, напрямую применимые к проектированию, изготовлению и эксплуатации беспилотных карьерных самосвалов.

Федеральный закон [22] является фундаментальным актом, определяющим правовой статус карьеров как ОПО. Закон устанавливает обязательные требования к идентификации опасностей, оценке рисков, разработке деклараций промышленной безопасности, созданию системы управления промышленной безопасностью (СУПБ) и проведению экспертизы промышленной безопасности. Применительно к беспилотным карьерным самосвалам закон обязывает учитывать дополнительные риски, связанные с отсутствием оператора. Соблюдение закона является условием получения разрешения на эксплуатацию ОПО.

Правила [23] - основной отраслевой документ, регулирующий безопасность на объектах открытых горных работ (глава V «Ведение горных работ открытым способом»). Правила содержат требования к проектированию, эксплуатации и техническому состоянию систем мобильного горного оборудования: системы торможения, освещения, сигнализации, предотвращения столкновений, а также к геометрическим параметрам дорог и организации движения. Документ обязывает применять иерархический подход к снижению рисков и проводить оценку рисков для технологических процессов. Для беспилотных самосвалов правила применяются через обязательную экспертизу проектной документации и интеграцию систем мониторинга и противоаварийной защиты. В настоящее время Российский союз промышленников и предпринимателей инициировал работу по внесению изменений в ФНП с целью учета специфики автономных технологий.

Стандарт [24] представляет собой адаптацию международного стандарта [12]. Стандарт устанавливает требования безопасности к автономным (ASAM) и полуавтономным (ASAMS) машинным системам, включая карьерные самосвалы, на всех этапах жизненного цикла. Стандарт акцентирует внимание на идентификации опасностей, оценке рисков, проектировании систем управления, инфраструктуры и взаимодействии с операциями, выполняемыми человеком. Документ обязателен при проектировании беспилотных карьерных самосвалов и обеспечивает принцип Safety-by-Design и преемственность с международными практиками.

Технический регламент [25] устанавливает минимально необходимые требования к безопасности машин и оборудования. Регламент требует подтверждения соответствия по перечню существенных требований безопасности, охватывающих риски в механике, электрике, эргономике и т.д. Для беспилотных систем применяются дополнительные требования к системам управления и программному обеспечению.

Дополнительно применяются гармонизированные национальные стандарты, такие как [26] (аналог [15]), [27] (аналог [9]) и другие, обеспечивающие требования к оценке рисков и проектированию частей систем управления, связанных с безопасностью. Охрана труда регулируется кодексом [28] и федеральным законом [29], однако в горных предприятиях эти вопросы интегрированы в ФНП Ростехнадзора.

Проведенный обзор нормативно-правовой базы и мировых практик показывает, что проектирование беспилотных карьерных самосвалов невозможно без применения принципа Safety-by-Design на всех этапах жизненного цикла как с точки зрения конкурентоспособности, так и с точки зрения нормативно-правовых актов. Международные стандарты и отраслевые руководства формируют единый глобальный каркас требований к функциональной безопасности, оценке рисков и интеграции автономных систем в горные работы. Российская нормативная база соответствует мировому уровню, имеет как собственные нормативы, так и гармонизированные с международными стандартами. Имеется тенденция увеличения акцента на автономных системах в национальных стандартах и нормативных актах.

Продолжение внедрения АНС в России является перспективным. Обязательным является применение Safety-by-Design при проектировании с использованием российской нормативной базы. Необходимо поддерживать стремление к разработке новых национальных или гармонизированных с международными стандартов и руководств с большим акцентом на автономную технику и с поправкой на отечественный опыт эксплуатации.

Таким образом, комплексное применение международных и национальных нормативных требований превращает безопасность из дополнительного требования в неотъемлемую часть инженерного решения, открывая путь к устойчивому развитию автономного транспорта в Российской Федерации.

Список источников:

1. Клебанов, Д. А. Разработка технико-технологических решений по созданию и применению роботизированных систем грузоперевозок на открытых горных работах [Текст]: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.22 / Д. А. Клебанов; науч. рук. К. Н. Трубецкой; Ин-ъ проблем комплексного освоения недр РАН. – Москва, 2015. – 145 с.
2. СУЭК испытывает беспилотные БЕЛАЗы на разрезе в Хакасии [Электронный ресурс] // Добывающая промышленность. – 19.08.2019. – URL: <https://dprom.online/mining/suek-ispytyvaet-bespilotnye-belazy-na-razreze-v-hakassii/> (дата обращения: 26.03.2025).
3. Autonomous Haulage System [Электронный ресурс] // Komatsu New Zealand. – URL: <https://www.komatsu.co.nz/innovation/autonomous-haulage-system> (дата обращения: 26.03.2025).
4. Accelerating the realization of automation, autonomous operation, and remote control – 700+ Autonomous trucks operating worldwide with Komatsu FrontRunner system [Электронный ресурс] // Komatsu global site/ - 14.03.2024. – URL: <https://www.komatsu.jp/en/newsroom/2024/20240314> (дата обращения: 26.03.2025).
5. Autonomous Mining Truck Market Size, Share, Growth | CAGR Forecast 2032 [Электронный ресурс] // Future Market Report. – URL: https://www.futuremarketreport.com/industry-report/autonomous-mining-truck-market/?utm_source=chatgpt.com (дата обращения: 26.03.2025). 5
6. Guidelines Autonomous Hauling System (AHS) [Текст] / Alberta Mine Safety Association; accepted and approved by Alberta Occupational Health and Safety. – January 2020. – 11 с.
7. ISO 12100:2010. Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction. – Geneva: International Organization for Standardization, 2010. – 77 с.
8. IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements. - Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010. – 105 с.
9. ISO 13849-1:2023. Safety of machinery — Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design - Geneva: International Organization for Standardization, 2023. – 152 с.
10. IEC 62061:2021. Functional safety of safety-related control systems. - Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021. – 310 с.
11. How are Autonomous Trucks Reducing Risks in Mining Operations? [Электронный ресурс] // Hetherington. – 13.12.2024. – URL: <https://hetherington.net.au/autonomous-trucks-reducing-risks-in-mining-operations/> (дата обращения: 26.03.2025).
12. ISO 17757:2019. Earth-moving machinery and mining – Autonomous and semi-autonomous machine system safety. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019. – 47 с.

13. ISO 20474:2017. Earth-moving machinery - Safety. – Geneva: International Organization for Standardization, 2017. – 9 с.
14. ISO 19296:2018. Mining – Mobile machines working underground – Machine safety. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – 43 с.
15. ISO 31000:2018. Risk management - Guidelines. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – 16 с.
16. ISO 45001:2018. Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – 41 с.
17. Guidelines for the implementation of autonomous systems in mining [Текст] / Global Mining Guidelines Group (GMG). – 2024. – 61 с.
18. Code of Practice for Safe Mobile Autonomous Mining. – Western Australia: Department of Mines, Industry Regulation and Safety, 2022. – 40 с.
19. Guideline for Autonomous Mobile Plant. – New South Wales: NSW Resources Regulator, 2021. – 10 с.
20. Safety Program for Surface Mobile Equipment. Final rule (88 FR 87904-87928, Dec. 20, 2023). – Federal Register. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration. – Effective Jan. 19, 2024. – 25 с.
21. Safety Program for Surface Mobile Equipment. Proposed rule (86 FR 50496-50513, Sept. 9, 2021). – Federal Register. Department of Labor, Mine Safety and Health Administration. – 18 с.
22. Федеральный закон РФ № 116-ФЗ. О промышленной безопасности опасных производственных объектов. - М.: Собрание законодательства РФ, 2023.
23. Федеральные нормы и правила (ФНП). Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых. - М.: Росгидромет/Ростехнадзор, 2022.
24. ГОСТ Р 70952-2023. Системы управления безопасностью. Общие требования. — М.: Стандартинформ, 2023. – 42 с.
25. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 010/2011. О безопасности машин и оборудования. - М.: Евразийская экономическая комиссия, 2011.
26. ГОСТ Р ИСО 12100-2012. Безопасность машин. Общие принципы проектирования. Оценка риска и снижение риска. — М.: Стандартинформ, 2012. – 70 с.
27. ГОСТ ISO 13849-1-2023. Безопасность машин. Части систем управления безопасностью. Часть 1: Общие положения. - М.: Стандартинформ, 2023. – 69 с.
28. Трудовой кодекс РФ. - М.: Собрание законодательства РФ, 2023.
29. Федеральный закон № 181-ФЗ. О социальном партнерстве в сфере труда. - М.: Собрание законодательства РФ, 2001.