

УДК 622

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКЗОСКЕЛЕТОВ НА ШАХТАХ КУЗБАССА

Калабухов Д.М., студент гр. ПГс-201, IV курс

Чэн Цин, студент гр.ГЭаи-211, III курс

Си Тао, студент гр.ГЭаи-211, III курс

Ань ЧАО, студент гр. МТаи-212, III курс

Ву Гуанъюн студент гр.ГЭаи-211, III курс

Научный руководитель: Хорешок А.А., д.т.н., профессор

Чунцинский университет искусств и наук, г. Чунцин

Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово

Кузбасс является одним из главных индустриальных центров России. Горнодобывающая промышленность обеспечивает рабочие места для большей части населения региона и является одним из ключевых факторов его экономического развития. На сегодняшний день в Кемеровской области работают 38 угледобывающих шахт, из которых 21 предприятие обеспечивает добычу угля коксующихся марок и 17 предприятий, добывающих энергетический уголь [1].

Согласно стратегическому направлению в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса до 2030 года, утвержденного Правительством Российской Федерации от 12 марта 2024 года №581-р, одними из основных перспективных направлений развития «сквозных» цифровых технологий в организациях угольной отрасли являются: автоматизация производственных процессов; использование робототехники; технологии умного производства; комплексные технологии, обеспечивающие решение проблем безопасности при добыче угля [2].

Обеспечение промышленной безопасности и охраны труда работников является одной из приоритетных задач угледобывающего предприятия, поскольку добыча угля – это сложный и опасный процесс, связанный с риском возникновения аварийных ситуаций и профессиональных заболеваний [3]. Проблемы со здоровьем сотрудников предприятий, ведущих подземную разработку угольных месторождений, чаще всего возникают от тяжелых физических нагрузок. По результатам исследования, проведенного А. И.

Фоминым, 100% рабочих мест в шахтах Кузбасса отнесены к вредному классу условий труда [4].

Сегодня снизить риск возникновения профессиональных заболеваний, улучшить условия труда, а также повысить производительность работников возможно за счет внедрения на угледобывающие предприятия инновационных технологий, одними из которых являются промышленные экзоскелеты.

Промышленные экзоскелеты представляют собой технологии нового поколения, обеспечивающие безопасность трудового процесса горняков за счёт внешнего каркаса.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных А.С. Яцуном, показали, что применение экзоскелетов позволяет снизить класс условий труда с вредных (тяжелый труд) до оптимальных (легкая физическая нагрузка) [5]. Исходя из этого, можно сказать, что возможность применения носимых технологий, делающих добывчу полезных ископаемых более безопасной и производительной, в шахтах Кузбасса является актуальным направлением исследований.

Тектонически измененные мощные угленосные осадки, залегающие на территории Кузбасса, приобрели неравномерную складчатость, разделенную крупными, средними и малыми разломами, в результате активизации площадей Кузнецкого Алатау, Салаира, Горной Шории и Томь-Колыванской зоны. Горно-геологические условия, в том числе и высокая метанонасыщенность, Кузнецкого угольного бассейна обуславливают сложность подземной разработки угольных пластов на данной территории и предопределяют использование вспомогательного оборудования [6]. Чтобы рассматривать возможность внедрения экзоскелетов на действующие предприятия, необходимо детально изучить действующие классификации и нормативно-правовые документы характерные для данной области с целью обеспечения взрывобезопасности угольных шахт [7].

Задачей данного исследования является обзор существующих классификаций экзоскелетов для рассмотрения возможности их применения на угольных шахтах Кузбасса.

Неопределенность позиции носимых экзоскелетов в существовавших классификациях, в том числе в части отнесения таких устройств к горным машинам, а также отсутствие стандартизированного набора терминов, определений и требований, связанного с экзоскелетами и экзокостюмами, определяло низкий уровень взаимопонимания между исследователями-разработчиками этих высоких технологий. В связи с этим, в 2017 году [8] был сформирован комитет ASTM F48 International «Экзоскелеты и экзокостюмы»,

который работает над установлением стандартов для экзоскелетов и экзокостюмов.

В статье [9] были предложены рекомендации и руководства для разработки и использования промышленных экзоскелетов и экзокостюмов. По мнению авторов, при разработке носимых технологий нового поколения важно уделять внимание методам тестирования в рабочем пространстве. Исследования в этом направлении позволяют оценить степень снижения перенапряжения и риска получения травм пользователями во время выполнения задач.

На сегодняшний день стандартная терминология для экзоскелетов и экзокостюмов ASTM F3323-20, разработанная техническим комитетом, служит фундаментом для модифицированного отечественного нормативно-правового документа «ГОСТ Р 60.5.0.1–2023. Роботы и робототехнические устройства. Экзоскелеты. Термины и определения». Согласно данному государственному стандарту, экзоскелеты являются носимыми сервисными роботами, «предназначенными для увеличение нагрузочной способности, восполнения утраченных функций, оказания содействия и/или расширения амплитуды движений в процессе физической деятельности человека» [10].

Однако, не все экзоскелеты можно классифицировать как сервисных роботов. В стандарте «ГОСТ Р 60.0.0.4–2023. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения» примером для термина «робототехническое устройство» служит «экзоскелет без привода» [11]. Исходя из анализа этого документа, можно утверждать, что наличие исполнительных приводов является одним из определяющих признаков при классификации экзоскелетов как роботов. Данное утверждение подразумевает разнообразный генезис носимых экзоскелетов.

В ходе анализа научной литературы были выявлены две основные концепции разработки экзоскелетных устройств, предполагающие создание активных и пассивных экзоскелетов [12].

Различия между ними обусловлены источником энергии и принципом работы привода. Так, в качестве одного из источников энергии для активных экзоскелетов используют электрические двигатели. Внешние устройства преобразуют электрическую энергию в механическую, непосредственно приводящую в действие закрепленные на теле человека элементы конструкции. За счёт возможности программирования активные экзоскелеты с таким типом привода находят широкое применение в медицине: наличие системы управления позволяет решать задачи реабилитации людей с нарушением моторных функций.

Помимо электрических, различают пневматические, гидравлические и механические системы исполнительных приводов [13]. Источником энергии для пневмопривода служит пневмоцилиндр - двигатель, рабочим телом которого

является сжатый до требуемого давления воздух. Преобразование энергии сжатого воздуха в механическую энергию движения объекта управления осуществляется путем воздействия давления питания на поверхность поршня в одной из полостей, при этом создается усилие, приводящее поршень в движение [14]. В гидроприводах, подобно пневмоцилиндрам, используются гидравлические цилиндры, в которых для осуществления движения поршня вместо сжатого газа используют давление жидкости, поступающей из гидравлического насоса [15].

На базе лаборатории мехатроники и робототехники кафедры механики, мехатроники и робототехники Юго-западного государственного университета (ЮЗГУ), разработана линейка промышленных экзоскелетов различных моделей, предназначенных для повышения производительности и качества труда, снижения физических нагрузок и утомляемости при подъеме, удержании и переносе грузов, а также работе с ручным инструментом. Одной из разработок учёных является промышленный экзоскелет активного типа «ExoHeaver 1.5» (Рис.1). Носимый экзоскелет оснащен электрическим приводом, который позволяет оператору поднимать груз с пола, находясь при этом в вертикальном положении.

Пассивные экзоскелеты независимы от источников внешнего питания. Подвижная и адаптированная система поддерживающих соединений, устанавливаемая на активные суставы и мышцы перераспределяет кинетическую энергию и остаточные силы человека. Перераспределение нагрузки на конструкцию экзоскелета способствует выполнению тяжелых физических задач на производстве без риска для здоровья сотрудников [16].



Рис.1. Промышленный экзоскелет активного типа «ExoHeaver 1.5»

Ещё одним изобретением учёных ЮЗГУ стала модель пассивного экзоскелета «ExoHeaver Gravity Compensation», оснащенная гравитационными компенсаторами. Данное устройство предназначено для снижения нагрузки на работника при выполнении подъемных и удерживающих операций с грузами [17].

На сегодняшний день китайская модель пассивного экзоскелета второго поколения, спроектированная и разработанная научно-исследовательским центром Shandong High-End Equipment в сотрудничестве с Shanghai ULS Robot Intelligent Technology Co., Ltd., продемонстрировала возможность использования экзоскелетов в горном деле. Данная разработка представляет собой оборудование для защиты труда, используемое работниками первой линии горнодобывающего производства: помочь шахтерам при монтажных работах, погрузочно-разгрузочных работах, техническом обслуживании оборудования и других операциях. Испытания показали, что экзоскелет снижает переутомление, а также препятствует производственному травматизму.

Согласно предварительному анализу действующих государственных стандартов, можно сделать вывод о том, что активные экзоскелеты могут быть определены как сервисные роботы, в то время как пассивные экзоскелеты представляют собой робототехнические устройства.

Подземная добыча угля на территории Кузнецкого угольного бассейна может быть обусловлена повышенным содержанием метана в угольных пластах, а также осложнена газодинамическими явлениями [18]. В связи с этим, использование активных экзоскелетов с электроприводом представляет потенциальную опасность в связи с использованием электрических двигателей, поскольку любая искра в условиях загазованности может привести к взрыву. Поэтому применение активных экзоскелетов с электрическим приводом допустимо только при детальном исследовании возможности их интеграции в угольные шахты с соблюдением всех требований безопасности.

Более предпочтительным применительно к условиям угольных шахт Кузбасса представляются активные экзоскелеты с гидравлическим и пневматическим приводом, а также пассивные экзоскелеты. С одной стороны, интерес к экзоскелетам с гидравлическим приводом обусловлен широким использованием гидравлических систем в большинстве горно-шахтного оборудования, что говорит об изученности данного типа исполнительных приводов. В то же время простота конструкции и технического обслуживания пневмоприводов, их пожаробезопасность и взрывобезопасность, устойчивость к вибрации и нагрузкам, множество циклов включения и выключения также делают их одним из предпочтительных вариантов при выборе привода промышленного экзоскелета [19].

В настоящее время использование активных экзоскелетов с гидравлическим и пневматическим приводом, а также пассивных экзоскелетов представляется наиболее безопасным, учитывая текущий уровень изученности этой технологии. Дальнейшие исследования в области применения экзоскелетов на горнодобывающих предприятиях могут способствовать разработке более эффективных и безопасных методов использования этого оборудования в различных геологических условиях.

В рамках данного исследования был осуществлен обзор отечественных и зарубежных стандартов для экзоскелетов, на основании которых были выявлены признаки, классифицирующие экзоскелетов как роботов и робототехнических устройств. Наглядно были рассмотрены основные концепции разработки носимых экзоскелетов. Были даны рекомендации при выборе типа исполнительного привода экзоскелетов для возможности их применения на угольных шахтах Кузбасса.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-082-2).

#### **Список литературы:**

1. Министерство угольной промышленности Кузбасса [Электронный ресурс]. – URL: <https://mirk42.ru/ru/> (дата обращения: 04.03.2024).
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 марта 2024 года №581-р.: стратегическое направление в области цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса до 2030 года.
3. Смагина С. С., Кадникова О. В., Рольгайзер А. А. Управление охраной труда и промышленной безопасностью на угледобывающих предприятиях Кузбасса // Экономика труда. – 2018. – № 2 (5). – С. 541–554. DOI: 10.18334/et.5.2.39141.
4. Фомин А. И., Соболев В. В., Сазонов М. С., Анисимов И. М., Малышева М. Н. Риск формирования профессиональных заболеваний при разработке угольных месторождений открытым способом // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 10. – С. 65–71. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-65-71.
5. Яцун А. С., Постольный А. А., Савельева Е. В., Никулин Я. С. Опыт применения промышленных экзоскелетов на горнодобывающих предприятиях // Экстремальная робототехника. – 2021. – № 1 (32). – С. 245–250.
6. Ненашева, Р. И. Горно-геологические условия при разработке угольных пластов Кузбасса / Ненашева, Р. И. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2012. – 371 с.
7. Смирнова А. Д. Проблема совершенствования технологии дегазации Тутуяской площади Кузбасса / Смирнова А. Д., Михайлова Т. В. // Проблемы

извлечения метана из угольных пластов. Тезисы докладов. X научно-практическая конференция молодых специалистов и работников ООО «Газпром добыча Кузнецк». – Кемерово, 2023. – С. 7–8.

8. ASTM International - Standards Worldwide [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.astm.org/> (дата обращения: 01.03.2024).

9. Brian D. Lowe, William G. Billotte & Donald R. Peterson (2019): ASTM F48 Formation and Standards for Industrial Exoskeletons and Exosuits, IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors, DOI: 10.1080/24725838.2019.1579769.

10. ГОСТ Р 60.5.0.1–2023. Роботы и робототехнические устройства. Экзоскелеты. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 ноября 2023 г. № 1420–ст: введен впервые.

11. ГОСТ Р 60.0.0.4–2019/ИСО 8373:2021 Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 апреля 2023 г. № 255–ст: взамен ГОСТ Р 60.0.0.4–2019.

12. Суханов А. Н. Построение многосвязной мехатронной системы (экзоскелета) с полуавтоматическим управлением, использующим биоэлектрические потенциалы: Диссертация к. т. н. – М.:ИПМех РАН, 2021. – 177 с.

13. Оразов А. Т. Разработка и исследование гидропневматического привода экзоскелетного устройства: Автреф. дис. канд. техн. наук. – М.: УГАТУ, 2018. – 19 с.

14. Камоцци Пневматика [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.camozzi.ru/> (дата обращения: 19.02.2024).

15. M. Mutuku and K. John, “Bond graph modeling of interactuator in teractions in a multi-cylinder hydraulicsystem,” World Academy of Science,” Engineering and Technology, vol. 74, pp. 32–41, 2011.

16. Воробьев А. А., Андрющенко Ф. А., Засыпкина О. А., Соловьева И. О., Кривоножкина П. С., Поздняков А. М. Терминология и классификация экзоскелетов // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 3 (55). – С. 71–77.

17. Юго-западный государственный университет [Электронный ресурс]. – URL: <https://swsu.ru/> (дата обращения: 01.03.2024).

18. Козлов Р. Д. Заблаговременная дегазация угольных пластов методом плазменно-импульсного воздействия / Козлов Р. Д., Долбня О.В. // Россия

молодая: сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Кемерово, 2021. – С. 10108.1–10108.4.

19. Ананьев К. А. Изменение привода скребкового конвейера СР-70 / Ананьев К. А., Долбня О. В. // Повышение качества образования, современные инновации в науке и производстве. – Экибастуз, 2023. – С. 7–11.