

Автоматизация и роботизация добычи твердых полезных ископаемых

И. В. Тищенко^{1}, Ю. В. Ванэг¹*

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

*e-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru

Аннотация. Повышение конкурентоспособности предприятий горного кластера неразрывно связано с повышением эффективности труда и уровнем его безопасности. Решение поставленных задач может быть осуществлено за счет более широкого внедрения роботизированных систем как на этапе добычи, так и транспортировки полезных ископаемых. В статье проанализировано современное состояние, перспективы и общие направления развития роботизированного горного оборудования. Рассмотрены передовые виды зарубежной и российской автоматизированной техники, а также основные концепции и программы развития в сфере роботизации. На сегодняшний день области применения робототехники в горнодобывающей промышленности включают автоматизированное дозирование, выемку породы и транспортировку, картирование и геодезию, бурение и обработку взрывчатых веществ. Внедрение роботов в горном деле предъявляет особые требования к их надежности и качеству, порождает многочисленные проблемы и нерешенные вопросы, которые должны быть совместно определены и решены как научными кругами, так и промышленностью. Широкое применение роботизированной техники на открытых и подземных горных работах может привести к существенным изменениям при проектировании карьеров, шахт и правил безопасности, а также способствовать разработке новых видов горных машин и оборудования, что обеспечит значительное повышение эффективности добычи полезных ископаемых.

Ключевые слова: горное дело, добыча, полезные ископаемые, роботизированная техника, автоматизированные системы, карьерные машины

Automation and robotization of solid mineral mining

I. V. Tishchenko^{1}, Yu. V. Vanag¹*

¹ Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk,
Russian Federation

*e-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru

Abstract. Improvement in competitiveness of mining clusters is inextricably linked with enhancement of labor safety and efficiency. Meeting these objectives is possible through wider implementation of robotic systems both at the stages of mining and transportation of minerals. The paper analyzes the current state, prospects and a general trend of development of robotic mining equipment. The advanced types of foreign and Russian automated equipment, and also the basic concepts and programs of robotization are considered. To date the areas of application of robotics in the mining industry include automated batching, rock excavation and transportation, mapping and geodesy, drilling and explosives processing. The introduction of robots in mining places special demands on their reliability and quality, and raises numerous problems and unresolved issues that both academia and industry must jointly identify and address. The widespread use of robotic technology in surface and underground mining can lead to significant changes in the design of quarries and mines, as well as in

the safety regulations, and contribute to the development of new types of mining machinery and equipment, which will provide a significant increase in mining efficiency.

Keywords: mining, extraction, minerals, robotics, automated systems, open-pit machines

Согласно нормативным документам к промышленным роботам относятся стационарные или передвижные автоматические машины, состоящие из исполнительного устройства в виде манипулятора и перепрограммируемого устройства управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих функций [1, 2]. В различных отраслях промышленности наряду с манипуляционными используются информационные, коллаборативные и полевые промышленные роботы [3 – 6] (рис. 1). К последним относятся автономные транспортные средства, буровые установки, добычные комплексы и другие виды карьерной и шахтной техники. Они могут выполняться стационарными и мобильными с колесным или гусеничным движителем.

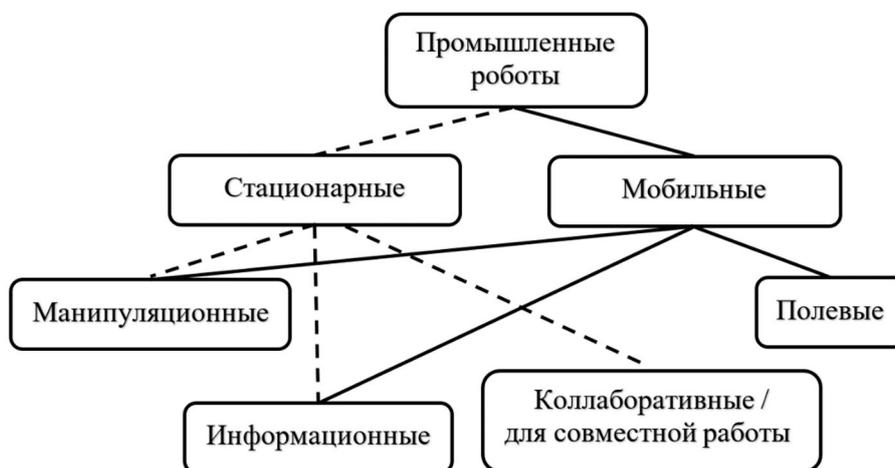


Рис. 1. Виды промышленных роботов

Манипуляционный робот состоит из манипулятора и программного блока управления, задающего требуемые движения исполнительного органа. Применяется для перестановки объектов производства и выполнения различных технологических функций.

К информационным роботам относятся автоматические комплексы, предназначенные для мониторинга, сбора и передачи информации о состоянии исследуемых объектов [7]. Для этого они оснащаются пакетом разнообразных датчиков и измерительных систем.

Коллаборативный робот предназначен для совместной работы с человеком. Он находит применение там, где невозможно полностью автоматизировать производственный цикл и требуется постоянный контроль и коррекция со стороны оператора. Такие устройства проектируются так, чтобы не подвергать опасности находящегося рядом работника.

Горнодобывающая промышленность является наиболее тяжелой отраслью в отношении выполнения технологических процессов. Среда, в которой производятся работы, характеризуется следующими факторами: взрывоопасностью и загрязненностью атмосферы, высокими температурами и влажностью, шумом и вибрациями, внезапными выбросами угля и газа и др. Их неблагоприятное воздействие усиливается с повышением темпов работ и переходом на более глубокие горизонты при подземной добыче полезных ископаемых. Кроме того, неблагоприятный климат Арктики и Сибири, суровые условия гор и пустынь, необходимость освоения районов с недостаточно развитой инфраструктурой существенно осложняют участие людей в технологии добычи полезных ископаемых и вызывают проблемы нехватки квалифицированного персонала. Все это приводит к снижению производительности труда и увеличивает влияние факторов риска для жизни и здоровья человека. При этом основным направлением для достижения безлюдной выемки полезных ископаемых является комплексная механизация и автоматизация производства с последующим внедрением робототехники, выполняющей тяжелые операции в опасных условиях шахт и рудников [8].

Автоматизация горной промышленности осуществляется по нескольким направлениям и касается как непосредственно самого добывающего оборудования, так и технологического транспорта и других технических средств. С 2016 года значительно увеличилось применение роботизированных систем в качестве которых можно выделить автономные самосвалы, поезда, буровые установки, позволившие поднять эффективность добычи полезных ископаемых и снизить нехватку рабочих кадров, что существенно для экономически развитых стран с высоким уровнем средней заработной платы [9, 10]. При этом можно выделить три типа автоматизированных систем:

1. Роботы разведчики (картографы).
2. Автономные вскрышные и добычные комплексы.
3. Автоматизированные транспортные системы и конвейеры по вывозу сырья из шахт, рудников и карьеров.



Рис. 2. Робот разведчик на пневмоколесном ходу

Применение мобильных роботов-разведчиков (рис. 2) дает возможность повысить производственную безопасность как людей, так и оборудования. Они подходят для разведки, картографирования и контроля за деятельностью предприятия [11]. Небезопасные, способные к обрушению выработки лучше всего обследовать с использованием роботизированных устройств, поскольку потеря машины не несет столь сложных этических и моральных последствий по сравнению с человеческой жизнью. С их помощью можно осуществлять комплексный мониторинг производственных условий и выполнение монотонных рутинных операций, что позволяет повысить культуру производства, своевременно выполнять мероприятия по охране труда и высвободить персонал, задействованный на наиболее тяжелых участках. Основными трудностями использования роботов на подземных рудниках являются возникающие трудности в использовании *GPS* или других систем навигации, сложность рельефа подземных участков.

Особый класс машин представляют демонтажные роботы с дистанционным управлением [12]. Изначально они предназначались для использования в строительной отрасли, однако благодаря своим качествам, находят все большее применение и в горнодобывающем кластере. Так немецкая фирма *TopTec* разработала и выпускает роботизированное демонтажное оборудование, рассчитанное на эксплуатацию в сложных условиях горных выработок [13]. В качестве сменного быстросъемного рабочего органа используется экскаваторный ковш обратной лопаты, гидромолот, челюстной захват (рис. 3а - в). Такая комплектация позволяет выполнять разборку завалов, погрузку породы в транспортные средства, дробление негабаритов, зарядание скважин взрывчатым веществом в незакрепленных выработках.



Рис. 3. Демонтажный робот с комплектом рабочего оборудования

Оборудование *Sandvik Mining and Construction (Sandvik)* широко применяется на самых эффективных и современных угольных шахтах во всех угледобывающих странах мира [14]. В 2018 году компания модернизировала серийный проходческий комбайн *Alpine AM-105*, оснастив его системой дистанционного управления с «искусственным интеллектом» (рис. 4). Благодаря этому достигнут

высокий уровень автоматизации оборудования и производственного процесса в целом, отпадает необходимость нахождения оператора непосредственно в зоне забоя, повышается производительность и эффективность использования дорогостоящей добычной техники. При этом система *AutoMine* от *Sandvik* объединяется с программами планирования производства работ для лучшей их совместимости с процессами управления операциями подземных горных работ. Это обеспечивает постоянную загруженность добычных комплексов в течение всей смены, сокращение простоев оборудования и уменьшение затрат на его техническое обслуживание.



Рис. 4. Роботизированный проходческий комбайн *Alpine AM-105*

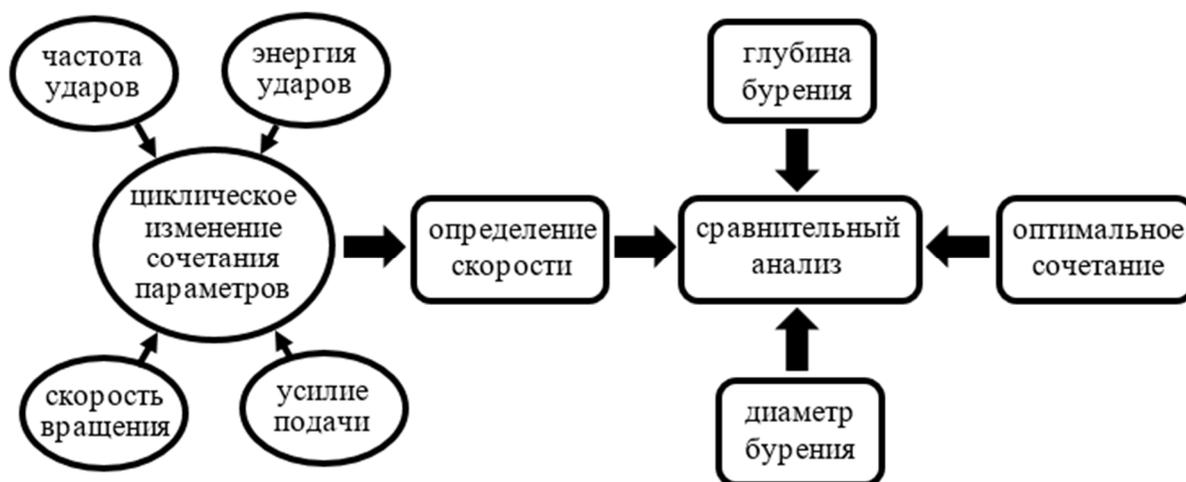


Рис. 5. Интеллектуальная схема управления ударно-вращательным бурением

Еще одна сфера широкого применения робототехники - автоматизация процесса бурения взрывных скважин для вскрыши породы и добычи сырья. Компании *Terex Mining*, *Atlas Copco*, *Montabert*, специализирующиеся на буровом оборудовании, разработали для своих станков, оснащенных погружными пневмо-

ударниками высокого давления программное обеспечение и комплекс телематики, базирующийся на GPS-позиционировании [15]. При этом для оптимизации скорости процесса подбирается оптимальное сочетание энергии и частоты ударов пневмоударного механизма, скорости вращения и усилия подачи бурового става в зависимости от глубины и диаметра бурения (рис. 5) [16]. После выбора площадки для проведения работ оператором и получения от него соответствующей команды робот в автономном режиме перемещается в заданную точку, осуществляет бурение, загружает взрывчатку, собирает данные с участка и передает их в диспетчерский пункт.



Рис. 6. Роботизированный буровой станок

Российская компания ВИСТ групп (резидент Сколково) на разрезе «Тугнуйский» в Республике Бурятия начала промышленные испытания роботизированного бурового оборудования на базе станка *Epiroc Pit Viper* (рис. 6). При этом, опираясь на мировой опыт, в качестве ожидаемых эффектов от внедрения таких технических новаций заявлены следующие:

- рост производительности труда на 10 – 20%;
- улучшение гранулированного состава материала благодаря более точному соблюдению сетки бурения;
- сокращение затрат на взрывчатку;
- повышение коэффициента технической готовности бурового оборудования на 5 – 10%;
- повышение коэффициента использования станка на 15 – 25%.

Робот оснащен системой экстренной остановки в случае возникновения аварийной ситуации, что должно обеспечить безопасность людей на том участке, где он задействован. Диспетчер может в любой момент перехватить управление, переключив его на диспетчерский пункт, оборудованный необходимыми для этого техническими средствами.

Важной составляющей добычи полезных ископаемых является горнотранспортный комплекс, поэтому роботизация автомобильной и железнодорожной техники на открытых и подземных работах служит одним из главных направлений повышения эффективности и безопасности труда [17]. На сегодняшний момент коли-

чество роботизированных большегрузных автомобилей, работающих в горной промышленности по всему миру, исчисляется сотнями. В 2016 году компания Komatsu представила свой инновационный проект - автономный карьерный самосвал без кабины водителя, которого заменил центральный контроллер. При этом существенно изменена компоновка и эргономика машины (рис. 7а).



Рис. 7. Роботизированный автомобильный транспорт: *Komatsu 930E-4AT* (а) и *Белаз-75137R* (б)



Рис. 8. Распределение датчиков для беспилотного вождения

Основным отличием таких автомобилей является их способность двигаться вперед и назад с равной скоростью, полный привод и управление, как вращением всеми четырьмя колесами, так и их поворотом. Вследствие этого уменьшается время на постановку под погрузку и выгрузку. Кроме того, отсутствие необходимости в развороте автомобиля существенно экономит место в призабойной и разгрузочной зонах и требуется минимум вскрышных работ. Использование в управлении транспортными средствами лидаров, радаров, ультразвуковых датчиков и оптико-электронной системы (рис. 8) обеспечивает точность позициони-

рования самосвала до 1 см. При этом вся информация поступает в центральный компьютеризированный пункт, направляющий автомобиль к определенному экскаватору. После окончания погрузки самосвал движется с оптимальной скоростью по выбранному компьютером маршруту к заданной точке разгрузки, что заменяет работу водителя. Каждое место выгрузки сыпучего материала записывается для более равномерного его распределения.

Автомобильный гигант ОАО «БЕЛАЗ», компания «Вист Групп» при поддержке Института комплексного освоения недр завершили промышленные испытания опытной модели 130-тонного самосвала БЕЛАЗ-75137R (Рис. 76), выполненного в беспилотном варианте, на угольном разрезе «Абаканский» (Хакасия) [18].

Выводы

1. Рост производственных затрат, в том числе за счет заработной платы, уменьшает сроки окупаемости автоматизированных технологий добычи полезных ископаемых. Это стимулирует горнодобывающие предприятия все активнее внедрять беспилотную технику. Дополнительным стимулом является снижение числа несчастных случаев и повышение эффективности использования оборудования за счет отказа от человеческого труда.

2. По данным резидента Сколково компании «Вист Групп» роботизированная беспилотная горнотранспортная техника способна обеспечить прирост эффективности производства на 15 – 20%.

3. Достоверные оценки по рынку роботизации горнодобывающей промышленности отсутствуют. Тем не менее по данным Международной федерации робототехники в 2022 – 2025 годах рынок роботов будет расти на 10 - 12% в год.

4. Расширение применения робототехники в горном деле предъявляет особые требования к ее надежности и качеству, порождает ряд проблем и нерешенных вопросов, которые должны быть совместно определены и решены как научными, так и промышленными кругами.

5. На данном этапе Российская Федерация находится в начале пути роботизации. Беспилотная техника пока не получила широкого распространения вследствие ряда причин технического и экономического характера, а также особенностей государственного регулирования данной сферы народного хозяйства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 25686-85. Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200011747>.

2. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200162703>.

3. ГОСТ 25685-83. Роботы промышленные. Классификация // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200022205>.

4. Зенкевич С. Л. Основы управления манипуляционными роботами. 2-е изд. / С. Л. Зенкевич, А. С. Ющенко. – М., Изд-во МВТУ им. Баумана, 2004. – 480 с.
5. Макаров И. М. Робототехника: История и перспективы / И. М. Макаров, Ю. И. Топчиев. – М.: Наука, 2003. – 349 с.
6. Springer Handbook of Robotics / В. Siciliano, О. Khatib (Eds.). Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2016. – 2227 p. – DOI 10.1007/978-3-319-32552-1.
7. Катус Г.П., Мамиконов Ю.Д., Мельниченко И.К. Информационные роботы и манипуляторы / Г.П. Катус, Ю.Д. Мамиконов, И.К. Мельниченко, В.М. Ильинский, О.И. Карягин - Москва: Энергия, 1968. - 104 с.
8. Поезжаева Е.В. Роботизация шахтного дела / Е.В. Поезжаева, М. Н. Мисюров, А. А. Сергеев // Науковедение. – 2015. - № 3. – С. 52-57.
9. Чаплицкий Я. М. Горно-шахтное оборудование и системы. Теория и практика эксплуатации и надежности (пер. с англ.) / Я. М. Чаплицкий. Изд-во: Taylor & Francis Group, 2010 г. – 396 с.
10. Сафохин М.С. Горные машины и оборудование: Учеб. для вузов. / М.С. Сафохин, Б.А. Александров, В.И. Нестеров - М.: Недра, 1995. – 463 с.: ил.
11. Певзнер Л.Д., Ким М.Л. Робототехника в горном деле. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/robototekhnika-v-gornom-dele>
12. Boeing A., Douglas E. Remotely operated robotic rock breaker with collision avoidance for the mining industry // AusIMM Bulletin, 2015. – Vol.3.
13. Mascaró, M.; Parra-Tsunekawa, I.; Tampier, C.; Ruiz-del-Solar, J. Topological Navigation and Localization in Tunnels—Application to Autonomous Load-Haul-Dump Vehicles Operating in Underground Mines. Appl. Sci. 2021, 11, 6547. (27 p.) – <https://doi.org/10.3390/app11146547>.
14. Correa, M.; Cárdenas, D.; Carvajal, D.; Ruiz-del-Solar, J. Haptic Teleoperation of Impact Hammers in Underground Mining. Appl. Sci. 2022, 12, 1428. – <https://doi.org/10.3390/app12031428>.
15. Duff E., Roberts J., Corke P. Automation of an underground mining vehicle using reactive navigation and opportunistic localization. In Yuh, J (Ed.) Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 4. – pp. 3775-3780. – Режим доступа: <https://eprints.qut.edu.au/32673>.
16. Li J.-g., Zhan K. Intelligent mining technology for underground metal mine based on unmanned equipment // Engineering, 2018, 4, pp.381–391. – <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>.
17. Трубецкой К. Н. От системы «Карьер» к новому интеллектуальному укладу открытых горных работ / К. Н. Трубецкой, М. В. Рыльникова, Д. Я. Владимиров // Проблемы комплексного освоения недр. – 2019 - №3. С 39 – 47.
18. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т. 18, № 1. – С. 4–15. – <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-4-15>.

© И. В. Тищенко, Ю. В. Ваняг, 2022