

Повышение эксплуатационной производительности механизированных комбайновых комплексов калийных рудников

Шишлянников Д. И.^{1*}, Трифанов М. Г.¹, Просовский К. А.²,
Лосев Д. А.², Тюбеев И. Х.¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия

² АО «ВНИИ Галургии», г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: dish844@gmail.com

Реферат

Введение. Представлены сведения о процессе добычи калийных руд механизированным способом. Показано, что эксплуатационная производительность проходческо-очистных комбайнов, входящих в состав механизированных комплексов, ограничивается производительностью доставочных машин. Обоснована актуальность задачи поиска технических и технологических решений по увеличению эксплуатационной производительности комбайновых комплексов калийных рудников.

Методология исследования. Изложены методические основы расчета эксплуатационной производительности механизированных комбайновых комплексов калийных рудников. Показано, что при проходке каждой очистной камеры четко различимы типичные участки работы проходческо-очистных комбайнов: участок непрерывной работы комбайна, где эксплуатационная производительность комбайна равна технической; участок работы проходческо-очистного комбайна с возрастающим количеством кратковременных остановок во время загрузки шахтного самоходного вагона (ШСВ); участок, на котором комбайн простаивает во время ожидания ШСВ и его загрузки. Расчетным путем показано, что эксплуатационная производительность комбайнового комплекса в условиях калийного рудника снижается при увеличении плеча доставки руды от забоя до рудоспускной скважины.

Результаты. Проанализированы схемы работы механизированных комбайновых комплексов, в состав которых включены два ШСВ. Теоретически исследована возможность замены самоходных вагонов средствами непрерывного транспорта. Предложен способ повышения производительности механизированной добычи калийных руд. Суть способа заключается в том, что при увеличении расстояния доставки в очистной камере транспортирование отбитой руды осуществляется двумя самоходными вагонами. Второй ШСВ транспортирует руду из соседней отработанной очистной камеры через сбойку, проводимую в межкамерном целике.

Выводы. Использование описанного технологического решения обеспечит увеличение эксплуатационной производительности проходческо-очистных комбайнов, работающих в составе механизированных комбайновых комплексов, что позволит повысить интенсивность разработки калийных месторождений.

Ключевые слова: проходческо-очистной комбайн; самоходный вагон; эксплуатационная производительность; калийная руда; комбайновый комплекс.

Введение. На территории России с 30-х годов XX века осуществляется добыча калийно-магниевого руд подземным способом. В настоящее время широкое применение получила камерная система обработки продуктивных пластов механизированным способом с использованием комбайновых комплексов. Каждый комбайновый комплекс включает добычную машину (проходческо-

очистной комбайн), оборудование для аккумуляции отделившейся от массива руды (бункер-перегрузатель) и транспортирующую машину (шахтный самоходный вагон) [1–4].

Таблица 1. Зависимость производительности шахтных самоходных вагонов от расстояния транспортировки
Table 1. Dependence between the SPMC capacity and the transportation distance

Грузоподъемность вагона, т	Производительность ШСВ, т/мин, при длине доставки, м			
	35	100	150	200
15	4,15	3,18	2,75	2,38
18	4,98	3,82	3,30	2,86
22	5,62	4,38	3,80	3,30
30	7,12	5,64	4,93	4,32

Увеличение установленной мощности приводов отечественных и зарубежных комбайнов для добычи калийных руд способствует увеличению их технической производительности до 7–8 т/мин. Однако производительность шахтных самоходных вагонов (ШСВ), используемых для доставки калийной руды от бункера-перегрузателя до рудоспусков и конвейерного транспорта, в 2–2,5 раза ниже, чем у добычных машин. Техническая производительность ШСВ определяется их грузоподъемностью и существенно зависит от плеча доставки руды, которое увеличивается в процессе прохождения каждой очистной камеры (табл. 1). Из указанного следует, что эксплуатационная производительность комбайновых комплексов калийных рудников ограничивается производительностью транспортирующих машин, выполняющих доставку добытой руды до средств магистрального транспорта.

В настоящее время актуальной является задача поиска технических и технологических решений повышения эксплуатационной производительности комбайновых комплексов калийных рудников.

Методология исследования. Эксплуатационную производительность механизированных комбайновых комплексов калийных рудников принято относить к различным временным интервалам. Таким образом, различают часовую, среднесменную, среднесуточную, среднемесячную и годовую производительность комбайновых комплексов [5–7].

Методические основы определения эксплуатационной производительности комбайновых комплексов калийных рудников при отработке очистных камер приведены в [8]. Расчет эксплуатационной производительности осуществляется с учетом технических показателей работы комбайновых комплексов и конструктивных параметров используемых добычных и транспортирующих машин, горно-геологических условий работы, потерь времени на выполнение вспомогательных операций.

При проходке каждой очистной камеры определяются три характерных участка работы комбайна (рис. 1):

– участок непрерывной работы L^I , на котором эксплуатационная производительность комбайна соответствует технической;

– участок L^{II} – комбайн работает с кратковременными возрастающими перерывами, связанными с необходимостью загрузки ШСВ рудой из бункера-перегрузателя;

– участок L^{III} – проходческо-очистной комбайн простаивает во время ожидания вагона и его загрузки [9, 10].

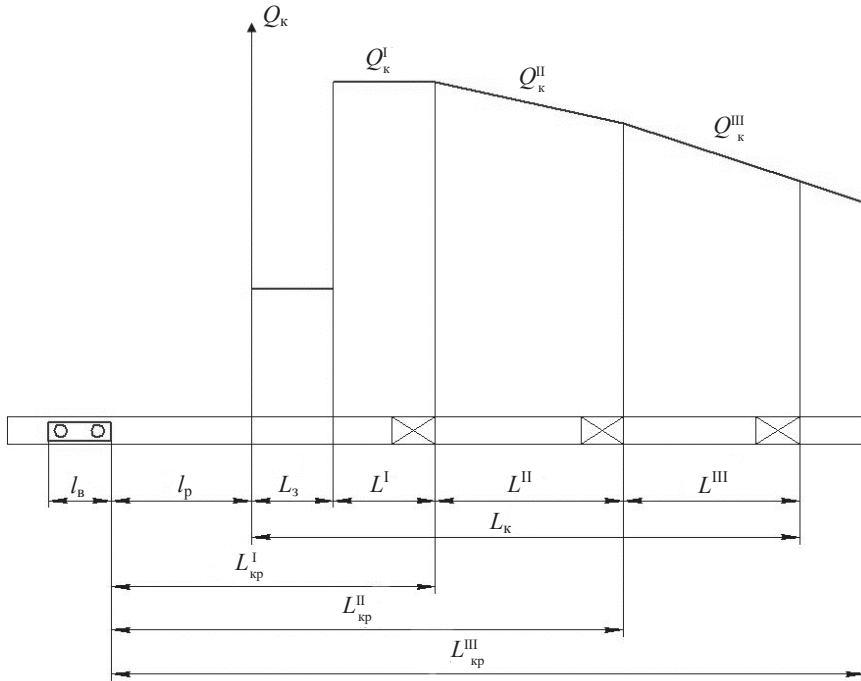


Рисунок 1. Изменение производительности комбайнового комплекса по длине камеры: L_k – длина камеры, м; l_p – расстояние транспортировки от устья камеры до пункта разгрузки, м; l_b – длина вагона, м; L_3 – длина участка зарубки комбайнового комплекса, м; L^I, L^II, L^III – длины типичных участков очистной камеры, м; $L_{кр}^I, L_{кр}^II, L_{кр}^III$ – критические длины характерных участков, м; Q_k – производительность комбайна, т/мин; Q_k^I, Q_k^II, Q_k^III – производительность механизированного комбайнового комплекса на типичных участках, т/мин

Figure 1. The variation of the combine system capacity across the chamber length: L_k is the chamber length, m; l_p is the transportation distance from the the chamber collar to the unloading point, m; l_b is the car length, m; L_3 is the length of the combine system cutting section, m; L^I, L^II, L^III are the lengths of typical sections of the stope, m; $L_{кр}^I, L_{кр}^II, L_{кр}^III$ are critical lengths of characteristic sections, m; Q_k – combine capacity, t/min; Q_k^I, Q_k^II, Q_k^III – capacity of a mechanized combine system in typical areas, t/min

Длина участка L^I непрерывной работы комбайна рассчитывается по формуле (см. рис. 1):

$$L^I = L_{кр}^I - l_p - L_3,$$

где l_p – расстояние транспортировки от устья камеры до пункта разгрузки, м; L_3 – длина участка зарубки комбайнового комплекса, м.

Первая критическая длина транспортировки:

$$L_{кр}^I = 0,5V_{\alpha 1} \left(\frac{q_H}{Q_k} - t_{p.в} \right),$$

где $V_{\alpha 1}$ – эквивалентная скорость движения самоходного вагона на первом участке с учетом угла наклона выработки, м/мин; q_H – начальная масса руды в бункере-

перегрузателе (масса руды, которая может разместиться в бункере-перегрузателе без перемещения ее донным конвейером), т; Q_k – техническая производительность комбайна, т/мин; $t_{p.в}$ – время разгрузки вагона, включая время маневров и пауз, мин.
Длина участка L^{II} :

$$L^{II} = L_{кр}^{II} - L_{кр}^I.$$

Вторая критическая длина транспортировки:

$$L_{кр}^{II} = 0,5V_{a2} \left(\frac{q_a}{Q_k} - t_{p.п} \right),$$

где V_{a2} – скорость движения вагона при длине транспортировки более 25 м, м/мин; q_a – грузоподъемность вагона с учетом угла наклона выработки, т; $t_{p.п}$ – время перегрузки руды из бункера-перегрузателя в самоходный вагон, мин.

Длина участка L^{III} (см. рис. 1):

$$L^{III} = L_k - L_3 - L^I - L^{II}.$$

Обычно длина очистной камеры на рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей составляет $L_k \approx 200$ м [5, 11].

Время отработки комбайном участка L^I рассчитывается по формуле:

$$T^I = \frac{S_k \rho L^I}{Q_k},$$

где T^I – время отработки комбайном участка камеры L^I , мин; S_k – площадь забоя, обрабатываемая исполнительным органом комбайна, м²; ρ – плотность руды в массиве, т/м³.

Время отработки комбайном участка L^{II} рассчитывается по формуле:

$$T^{II} = \left(\frac{S_k \rho L^{II}}{q_a} \right) \left(\frac{q_a}{Q_k} + 0,5t_{p.п} \right).$$

Время отработки комбайном участка L^{III} рассчитывается по формуле:

$$T^{III} = \left(\frac{S_k \rho L^{III}}{q_a} \right) \left(\frac{2L_{кр}^{II} + L^{III}}{V_{a2}} + t_{p.в} + t_{p.п} \right).$$

Количество смен T , за которое будет отработана камера, определяется выражением:

$$T = \frac{T^I + T^{II} + T^{III}}{T_{см} \beta} + T_3 + T_o,$$

где $T_{см}$ – продолжительность смены, мин; β – коэффициент использования комбайнового комплекса при проходке выработки во времени; T_3 – время зарубки, смен; T_o – время отвода оборудования из камеры, смен [8, 9, 12].

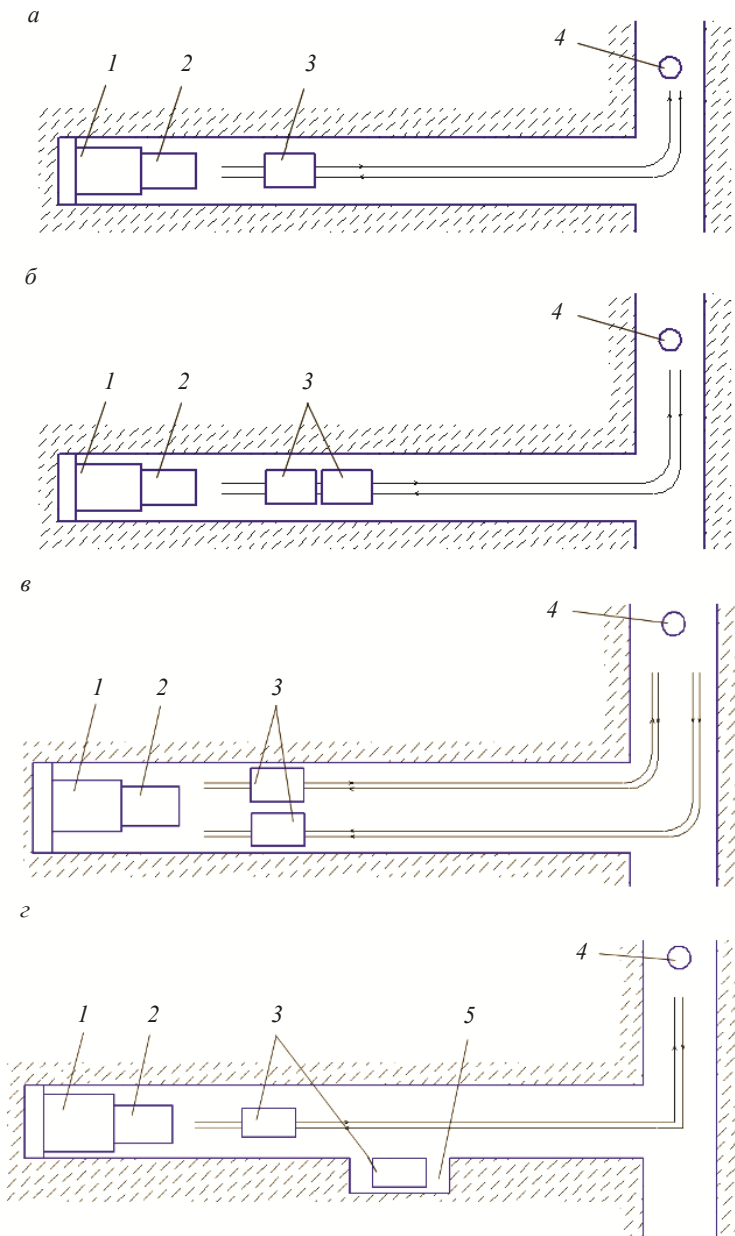


Рисунок 2. Типовые схемы работы комбайновых комплексов: а – схема работы комплекса с одним ШСВ; б – схема работы комплекса с двумя ШСВ с перегрузкой горной массы; в – схема работы комплекса с двумя ШСВ с разминкой; г – схема работы комплекса с двумя ШСВ с нишей в очистной камере; 1 – комбайн; 2 – бункер-перегрузатель; 3 – самоходный вагон; 4 – рудоспускная скважина; 5 – ниша

Figure 2. Typical schemes of combine system workflow: а – workflow of the system with one SPMC; б – workflow of the system with two SPMCs and rock mass reloading; в – workflow of the system with two SPMCs and bypass; г – workflow of the system with two SPMCs and a stable hole in the stope; 1 – combine; 2 – transfer hopper; 3 – self-propelled car; 4 – ore pass; 5 – stable hole

Анализ результатов исследования. Анализ приведенных расчетных зависимостей показывает, что производительность комбайнового комплекса уменьшается при увеличении плеча доставки руды от забоя до рудоспуска или магистрального конвейера.

Заданная эксплуатационная производительность механизированного комбайнового комплекса по всей длине очистной камеры может быть обеспечена за счет использования технических и технологических решений. К первым относится применение ШСВ повышенной грузоподъемности, а также телескопических раздвижных и самоходных конвейеров в очистной камере для транспортировки руды от комбайна, т. е. замена ШСВ средствами непрерывного транспорта. К технологическим решениям относится использование схем разработки руды, предусматривающих применение двух ШСВ в одном механизированном комплексе.

Применение ШСВ повышенной грузоподъемности в очистных камерах калийных рудников возможно только при использовании комбайнов с большим сечением породоразрушающих исполнительных органов (более 15 м²). При этом маневренность грузоподъемных трехосных вагонов существенно хуже двухосных ШСВ. При работе тяжелых ШСВ значительно повышается расход покрышек, увеличивается количество отказов узлов и деталей тяговых приводов вагонов. В то же время при увеличении расстояния доставки руды в камере более 100 м даже ШСВ грузоподъемностью 30 т существенно ограничивает производительность проходческо-очистного комбайна (см. табл. 1).

Использование самоходных изгибающихся конвейеров в очистных камерах калийных рудников ограничивается их высокой стоимостью. Кроме того, такие конвейеры выпускаются только зарубежными производителями горного оборудования, что в условиях экономических санкций негативно сказывается на возможности и стоимости закупки и эксплуатации данных машин.

Опытные образцы телескопических конвейеров, выпускаемые отечественными предприятиями горного машиностроения, не обеспечивают заданных показателей надежности для повсеместного их внедрения на калийных рудниках.

Перспективными являются разработка и внедрение технологических схем работы механизированных комбайновых комплексов калийных рудников с двумя ШСВ, транспортирующими руду от одного проходческо-очистного комбайна.

На рис. 2 приведены типовые схемы функционирования комбайновых комплексов калийных рудников при ведении очистных и проходческих работ. Схема на рис. 2, а (комплекс состоит из комбайна 1, бункера-перегрузателя 2 и одного ШСВ 3) широко применяется при очистной выемке калийно-магниевого солей. Недостатком данной схемы является наличие простоев комбайна при увеличении плеча доставки руды, так как при увеличении длины камеры ШСВ не успевает выполнить цикл транспортировки горной массы за время наполнения бункера-перегрузателя. Схема на рис. 2, б (комплекс включает комбайн 1, бункер-перегрузатель 2 и два ШСВ 3) в основном используется при выполнении проходческих работ. Недостатками такой схемы являются большие временные затраты на перегрузку руды с одного самоходного вагона на другой, а также необходимость возведения эстакад, так как некоторые ШСВ не имеют устройств регулирования высоты разгрузки.

Обеспечение независимой работы ШСВ со свободной разминкой в очистной камере обеспечивает максимальную производительность комбайнового комплекса, в составе которого работают два самоходных вагона (рис. 2, в). Однако в этом случае для современных вагонов с грузоподъемностью 15–20 т ширина выработки должна

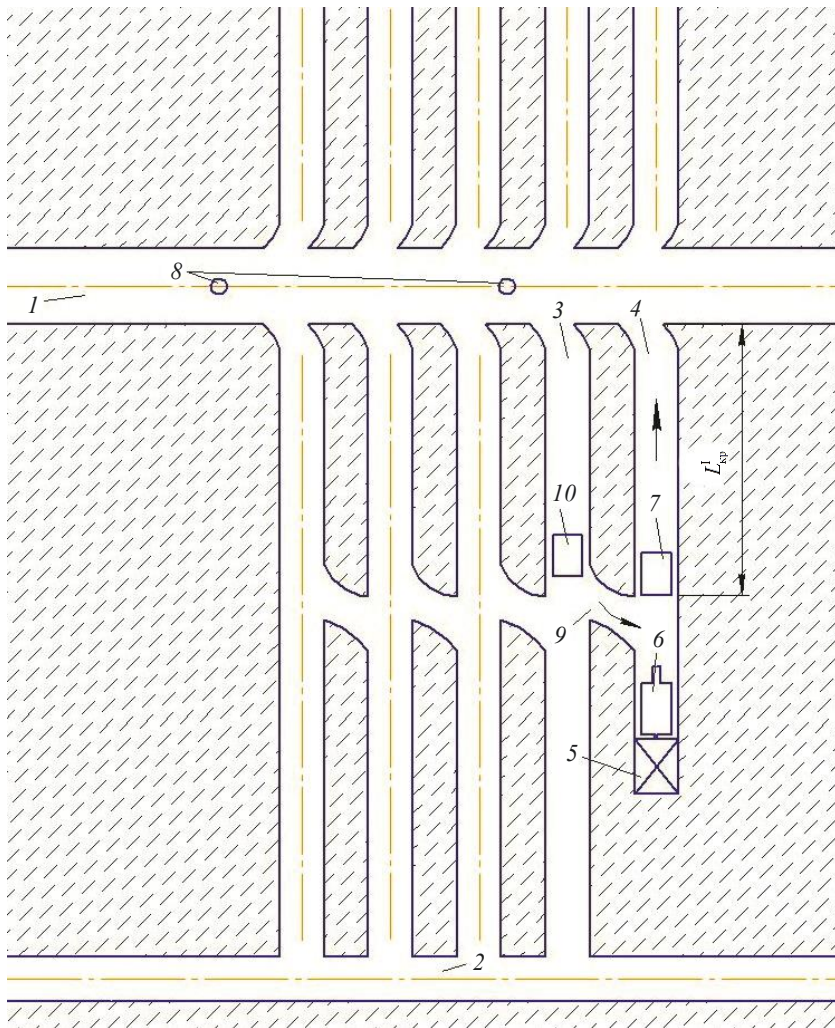


Рисунок 3. Схема работы комбайнового комплекса с двумя ШСВ, с транспортированием части руды через соседнюю отработанную камеру
 Figure 3. Scheme of combine system workflow with two SPMCs, and a part of the ore transportation through an adjacent empty stope

составлять не менее 8,0 м, что не обеспечивается существующими конструкциями исполнительных органов комбайнов и обуславливает трудности при обеспечении устойчивости кровли выработки.

Проведение дополнительной ниши для разминовки вагонов (рис. 2, з) требует существенных временных и материальных затрат, что негативно сказывается на производительности комбайнового комплекса в целом [13, 14]. Повышение эксплуатационной производительности комбайнового комплекса при ведении очистных работ обеспечивается посредством использования второго ШСВ, транспортирующего калийную руду по соседней пройденной камере [15, 16].

Авторами предложен способ разработки калийных пластов, суть которого поясняется схемой на рис. 3. На расстоянии $L_{кр}^1$ от устья отработанной камеры проходят сбойку в направлении обрабатываемой камеры таким образом, чтобы соединить

камеры и обеспечить возможность доставки руды от проходческо-очистного комбайна посредством второго самоходного вагона к рудоспускной скважине через сбойку и соседнюю отработанную камеру. Таким образом, при увеличении плеча доставки калийной руды от бункера-перегрузателя до рудоспускной камеры свыше критической $L_{кр}^1$ в комплексе с добычной машиной начинают работать два ШСВ, что обеспечивает повышение производительности комбайнового комплекса за счет увеличения времени непрерывной работы проходческо-очистного комбайна в ожидании ШСВ. При этом первый самоходный вагон перемещается от бункера-перегрузателя к рудоспускной скважине через отрабатываемую камеру, а второй – от бункера-перегрузателя к рудоспускной скважине через сбойку и соседнюю отработанную камеру.

Предлагаемое технологическое решение реализуется следующим образом. При подготовке панели или блока проходят выемочный 1 и вентиляционный 2 штреки (см. рис. 3). Очистные камеры 3 и 4 проходят перпендикулярно выемочному штреку 1. Добыча руды осуществляется комбайном 5, который грузит отделенную от массива горную массу в бункер-перегрузатель 6. Из бункера 6 руда перегружается на самоходный вагон 7, который обеспечивает доставку руды до рудоспуска 8.

На расстоянии $L_{кр}^1$ от устья отработанной камеры 3 в направлении отрабатываемой камеры 4 проходит сбойка 9. $L_{кр}^1$ – расстояние, равное длине транспортировки руды самоходным вагоном от забоя до устья очистной камеры, на котором осуществляется непрерывная работа добычной машины. Сбойка 9 между камерами 3 и 4 обеспечивает возможность транспортирования руды от добычной машины 5 и бункера-перегрузателя 6 вторым ШСВ 10 через отработанную камеру 3 к рудоспускной скважине 8.

Сбойка 9 может быть пройдена проходческим комбайном со стреловидным исполнительным органом, работающим в комплексе с погрузочно-доставочной машиной, при этом временные и материальные затраты на проведение сбойки будут незначительны.

Выводы. Использование предлагаемого технологического решения позволит увеличить время производительной работы проходческо-очистных комбайнов в составе механизированных комплексов и повысить скорость разработки калийных месторождений. При работе двух ШСВ на один комбайн техническая производительность добычной машины повышается до 10–12 т/мин (в настоящее время – 6–8 т/мин), а годовая эксплуатационная производительность механизированного комбайнового комплекса составляет 3–3,5 млн т в год.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мешков А. А., Казанин О. И., Сидоренко А. А. Реализация производственного потенциала высокопроизводительного оборудования – ключевое направление совершенствования подземной добычи энергетических углей // ГИАБ. 2020. № 12. С. 156–165. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-120-156-165
2. Bazhin V. Y., Kuskov V. B., Kuskova Y. V. Processing of low-demand coal and other carbon-containing materials for energy production purposes // Inzynieria Mineralna. 2019. Vol. 1. No. 43. P. 195–198. DOI: 10.29227/IM-2019-01-37
3. Ещин Е. К. Управление динамической нагруженностью забойных скребковых конвейеров // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 570–575. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.570
4. Лукин Д. Г., Юнгмейстер Д. А., Ячейкин А. И., Исаев А. И. Совершенствование работы исполнительного органа проходческого щита КТ1-5,6М // Горный журнал. 2018. № 12. С. 73–77. DOI: 10.17580/gzh.2018.12.15
5. Шендерович Ю. М., Ранько В. А. Зависимость производительности шахтных самоходных вагонов от скорости их движения // Механизация и автоматизация горных работ. 1975. С. 173–177.
6. Cakdi S., Cummings S., Punwani J. Heavy haul coal car wheel load environment-rolling contact fatigue investigation // Joint Rail Conference. San Jose, California, USA, March 23–26. 2015. Art. 112635. DOI: 10.1115/JRC2015-5640

7. Jobes C. C., Bissert P., Mahmoudian N., Li B. Development of parameters for dynamic modeling of underground haulage vehicles // ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2016. Art. 128056. DOI: 10.1115/IMECE201665381
8. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках ОАО «Сильвинит». Новосибирск: Наука, 2011. 487 с.
9. Старовойтов Ю. В. К вопросу повышения эффективности и надежности работы горношахтного оборудования // ГИАБ. 2006. № 1. С. 252–261.
10. Теоретические и практические основы циклической организации работ по добыче калийных руд: моногр. Пермь: ГИ УрО РАН, 2009. 137 с.
11. Quiroz J. C., Mariun N., Mehriou M. R., Izadi M., Mison N., Mohd Radzi M. A. Fault detection of broken rotor bar in LS-PMSM using random forests // Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2017. Vol. 116. P. 273–280. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.11.004
12. Шишляников Д. И., Романов В. А., Звонарев И. Е. Определение наработки и остаточного срока службы шахтных самоходных вагонов калийных рудников на основании данных приборного контроля // Записки горного института. Т. 237. С. 508–512.
13. Holtzhausen W. H. A comparative study between shuttle cars and battery haulers // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Vol. 114. No. 4. P. 299–304.
14. Segopolo P. R. Optimization of shuttle car utilization at an underground coal mine // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. No. 4. P. 285–296.
15. Способ разработки пологих пластов калийных солей комбайновыми комплексами: пат. 2720863 С1 Рос. Федерация. МПК E21C41/20. № 2019122555; заявл. 15.07.2019; опубл. 13.05.2020. Бюл. № 14. 7 с.
16. Антипин Ю. Г., Рожков А. А., Барановский К. В. Обоснование параметров камерной системы разработки с оставлением неизвлекаемых целиков // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 4. С. 15–23. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23

Поступила в редакцию 15 марта 2023 года

Сведения об авторах:

Шишляников Дмитрий Игоревич – доктор технических наук, профессор, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: dish844@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7395-6869>

Трифанов Михаил Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: mt59@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-0135-592X>

Просовский Константин Александрович – инженер первой категории горного отдела АО «ВНИИ Галургии». E-mail: prosovskij86@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6856-3536>

Лосев Дмитрий Александрович – ведущий инженер АО «ВНИИ Галургии». E-mail: transporteur@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0078-6141>

Тюбеев Ибрагим Хизирович – студент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: tyubeev2001@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8772-7107>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-82-92

Improving the working capacity of mechanized combine systems at potash mines

Dmitrii I. Shishliannikov¹, Mikhail G. Trifanov¹, Konstantin A. Prosovskii², Dmitrii A. Losev², Ibragim Kh. Tiubeev¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

² VNIIGalurgii JSC, St. Petersburg, Russia.

Abstract

Introduction. The article provides information about the process of potash ore mining by mechanized method. It is shown that the working capacity of heading and winning machines as part of mechanized systems is limited by the capacity of load and haul dump machines. The article substantiates the relevance of searching for technical and process solutions to increase the working capacity of combine systems at potash mines.

Methods of research. The basic procedures for calculating the working capacity of mechanized combine systems at potash mines are outlined. It is shown that when driving each stope, typical areas of heading and winning machines activity are clearly distinguishable: the area of

continuous operation of the combine, where the combine working capacity is equal to the technical performance; area of heading and winning machine activity with a growing number short stops during self-propelled mine car (SPMC) loading; the area where the combine stands idle while waiting for SPMC and its loading. It is shown by calculation that the combine system working capacity in the conditions of a potash mine decreases with the growth of the ore delivery arm from the face to the ore pass.

Results. The roadmaps of mechanized combine systems with two SPMCs are analyzed. The possibility of replacing self-propelled cars by continuous transport is theoretically investigated. A method is proposed for increasing the performance of potash ore mechanized mining. The key point of the method is that with longer delivery distance in the stope, the broken ore is transported by two self-propelled cars. The second SPMC transports the ore from the adjacent empty stope through the linkage in the interchamber pillar.

Conclusions. The described process solution will improve the working capacity of heading and winning machines as part of mechanized combine systems, which will improve the intensity of potash deposits development.

Keywords: heading and winning machine; self-propelled car; working capacity; potash ore; combine system.

REFERENCES

1. Meshkov A. A., Kazanin O. I., Sidorenko A. A. Implementation of production potential of high-performance equipment – a key trend of improvement in underground mining of power-generating coal. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 12: 156–165. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2020-120-156-165
2. Bazhin V. Iu., Kuskov V. B., Kuskova Ia. V. Processing of low-demand coal and other carbon-containing materials for energy production purposes. *Inzynieria Mineralna*. 2019; 1(43): 195–198. Available from: doi: 10.29227/IM-2019-01-37
3. Eshchin E. K. Controlling the dynamic load of armoured face conveyors. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2019; 239: 570–575. (In Russ.) Available from: doi: 10.31897/pmi.2019.5.570
4. Lukin D. G., Iungmeister D. A., Iacheikin A. I., Isaev A. I. Improvement of shield machine KT1-5.6m cutterhead operation. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2018; 12: 73–77. (In Russ.) Available from: doi: 10.17580/gzh.2018.12.15
5. Shenderovich Iu. M., Ranko V. A. Dependence between the capacity of the self-propelled mine cars and their road speed. *Mekhanizatsiia i avtomatizatsiia gornyykh rabot = Mechanization and Automation of Mining*. 1975; 173–177. (In Russ.)
6. Cakdi S., Cummings S., Punwani J. Heavy haul coal car wheel load environment-rolling contact fatigue investigation. *Joint Rail Conference. San Jose, California, USA, March 23–26*. 2015; 112635. Available from: doi: 10.1115/JRC2015-5640
7. Jobes C. C., Bissert P., Mahmoudian N., Li B. Development of parameters for dynamic modeling of underground haulage vehicles. *ASME 2016 international mechanical engineering congress and exposition, IMECE*. 2016; 128056. Available from: doi: 10.1115/IMECE201665381
8. *Guidance on mining at the mines of OAO Sylvinita*. Novosibirsk: Nauka Publishing; 2011. (In Russ.)
9. Starovoitov Iu. V. Improving the efficiency and reliability of mining equipment operation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2006; 1: 252–261. (In Russ.)
10. *Theoretical and practical fundamentals of cyclic organization of work on potash ore mining: monograph*. Perm: IM UB RAS Publishing; 2009. (In Russ.)
11. Quiroz J. C., Mariun N., Mehrjou M. R., Izadi M., Misron N., Mohd Radzi M. A. Fault detection of broken rotor bar in LS-PMSM using random forests. *Measurement: Journal of the international measurement confederation*. 2017; 116: 273–280. Available from: doi: 10.1016/j.measurement.2017.11.004
12. Shishliannikov D. I., Romanov V. A., Zvonarev I. E. Determining the operating time and residual service life of self-propelled mine cars at potash mines based instrumental control data. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 237: 508–512. (In Russ.)
13. Holtzhausen W. H. A comparative study between shuttle cars and battery haulers. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014; 114(4): 299–304.
14. Segopolo P. R. Optimization of shuttle car utilization at an underground coal mine. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2015; 115(4): 285–296.
15. Shishliannikov D. I., Romanov V. A., Ozornin M. S. *Method for development of gently sloping formations of potassium salts by combine machines*. Patent RF no. 2720863; 2020.

16. Antipin Iu. G., Rozhkov A. A., Baranovskii K. V. Substantiation of the parameters of open stoping mining method with abandonment of unrecoverable pillars. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 4: 15–23 (In Russ.). Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-4-15-23

Received 15 March 2023

Information about the authors:

Dmitrii I. Shishliannikov – DSc (Engineering), Professor, associate professor of the Department of Mining Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: dish844@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7395-6869>

Mikhail G. Trifanov – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mining Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: mt59@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-0135-592X>

Konstantin A. Prosovskii – category 1 engineer, mining department, VNII Galurgii JSC. E-mail: prosovskij86@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6856-3536>

Dmitrii A. Losev – leading engineer, VNII Galurgii JSC. E-mail: transporteur@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0078-6141>

Ibragim Kh. Tiubeev – student, Department of Mining Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: tyubeev2001@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8772-7107>

Для цитирования: Шишлянников Д. И., Трифанов М. Г., Просовский К. А., Лосев Д. А., Тюбеев И. Х. Повышение эксплуатационной производительности механизированных комбайновых комплексов калийных рудников // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 4. С. 82–92. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-82-92

For citation: Shishliannikov D. I., Trifanov M. G., Prosovskii K. A., Losev D. A., Tiubeev I. Kh. Improving the working capacity of mechanized combine systems at potash mines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 4: 82–92 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-82-92