

Оценка эксплуатационной производительности комбайновых комплексов для добычи калийной руды

Сенькин А. В.¹, Зверев В. Ю.¹, Лосев Д. А.¹, Грибов Д. С.¹, Ситников Д. А.^{1*}

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

*e-mail: st.dmitry2018@yandex.ru

Реферат

Введение. Рассмотрены основные факторы, влияющие на эксплуатационную производительность комбайновых комплексов калийных рудников, приведены методические основы определения рациональных параметров работы горно-шахтного оборудования, обеспечивающих максимальную эксплуатационную производительность комбайновых комплексов при добыче калийной руды.

Методология исследования. Проведен анализ существующих методик расчетов эксплуатационной производительности комбайновых комплексов. Выполнен ряд аналитических расчетов для получения зависимостей изменения годовой производительности от параметров работы комбайнового комплекса.

Результаты. Выявлены принципиальные отличия расчетных моделей рассматриваемых типовых методик, связанные с принятыми в них допущениями. Получена система уравнений, математически описывающая взаимосвязь основных режимных параметров работы оборудования комбайновых комплексов для добычи калийной руды.

Выводы. Каждая из рассмотренных типовых методик расчета параметров работы оборудования комбайновых комплексов для добычи калийной руды имеет свою область применения, которая ограничивается принятыми в них допущениями. Существующие типовые методики используются для сравнения разных технологий ведения горных работ в границах своей области применения. В уникальных случаях требуется доработка типовых методик. Результаты выполненных аналитических расчетов показали, что наиболее перспективным направлением повышения эксплуатационной производительности комбайновых комплексов для добычи калийной руды является увеличение коэффициента использования по времени проходческо-очистных комбайнов и производительности средств доставки руды в очистных камерах.

Ключевые слова: расчет производительности; комбайновый комплекс; очистной комбайн; средства доставки; самоходный вагон; бункер-перегрузатель.

Введение. При разработке калийных месторождений используется механизированный способ добычи, предусматривающий использование комбайновых комплексов. В состав каждого комбайнового комплекса (КК) для добычи калийной руды входит проходческо-очистной комбайн, бункер-перегрузатель (БП) и самоходный вагон (СВ). КК для добычи калийной руды являются производственными единицами, количество и производительность которых определяют производственные мощности калийного рудника.

Одной из главных задач любого горнодобывающего предприятия является обеспечение максимальной добычи полезного ископаемого с наименьшими операционными затратами, к которым, в том числе, относится и содержание горно-шахтного оборудования. Повышение эффективности использования оборудования КК возможно посредством оценки влияния технологических и технических параметров работы на процесс функционирования КК в условиях калийного рудника.

Обзор типовых методик расчета эксплуатационной производительности КК. Для выполнения производственных планов рудника важно иметь не только необходимое количество КК, но и количественный прогноз их производительности, подтверждающий достаточность добычных единиц для выполнения плана.

Учитывая многообразие и сложность процессов, сопровождающих ведение горных работ, эксплуатационная производительность КК может быть спрогнозирована по разным методикам расчета. Математическая модель, положенная в основу каждой типовой методики, имеет ряд допущений, которые позволяют упростить выполнение расчетов, обеспечивая достаточную точность для предварительной количественной оценки эксплуатационной производительности. Эксплуатационная производительность КК может быть определена достоверно только в процессе опытно-промышленных испытаний с выполнением хронометража соответствующих операций.

Существует несколько широко используемых методик расчета эксплуатационной производительности КК калийных рудников. Среди них методики П. А. Лыхина [1], В. Л. Пинского [2], В. А. Соловьева (*Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках ОАО «Сильвинит» / отв. ред. Соловьев В. А. Новосибирск: Наука, 2011. 487 с.*), И. П. Амана [3] и т. д. В работе В. А. Романова и М. С. Озорнина [4] предложена перспективная методика определения эксплуатационной производительности КК, не нашедшая, однако, применения в инженерной практике в настоящее время. Также имеется методика определения средневзвешенной производительности КК, позволяющая с высокой достоверностью прогнозировать эксплуатационную производительность КК при отработке отрезков очистных камер [5–7].

Кратко проанализируем типовые методики расчета в части принятых в них допущений, которые могут оказать влияние на достоверность результата расчета. Типовые методики расчета сводятся к определению средней эксплуатационной производительности КК на характерных участках очистной камеры. П. А. Лыхин и В. Л. Пинский выделяют два характерных участка очистной камеры. Эксплуатационная производительность КК на первом участке определяется технической производительностью проходческо-очистного комбайна, а на втором – производительностью средств доставки, то есть СВ [1, 2]. В. А. Соловьев и И. П. Аман выделяют, помимо перечисленных, третий (переходный) характерный участок, эксплуатационная производительность КК на котором определяется технической производительностью проходческо-очистного комбайна при работе с кратковременными остановками на разгрузку бункер-перегрузателя (*Методическое руководство по ведению горных работ ...*), [3].

Все существующие типовые методики используют коэффициент использования проходческо-очистного комбайна по времени как справочную величину, полученную опытным путем. Такой подход ограничивает применение расчетных моделей в случаях, когда требуется сравнить несколько вариантов ведения горных работ с различными технологиями, при которых сокращается время на выполнение или исключается какая-либо вспомогательная операция, например, возведение крепи, наращивание вентиляционного става, укладка силового кабеля и т. д.

В методиках В. А. Соловьева и И. П. Амана скорость СВ принимается с разными значениями для двух длин доставки: условных коротких и длинных (*Методическое руководство по ведению горных работ ...*), [3], в то время как в методике В. Л. Пинского используется среднее значение между скоростями груженого и порожнего СВ [2], а в методике П. А. Лыхина средняя скорость СВ принимается в зависимости от длины доставки [1].

Во всех перечисленных методиках при расчете объема руды, доставленной при одном цикле работы, отсутствует поправка на плотность руды, аккумулируемой БП и транспортируемой СВ, т. е. не учитывается вместимость кузовов аккумулирующих и транспортирующих машин. В типовых методиках расчета используется паспортная грузоподъемность указанного горно-шахтного оборудования, что также оказывает влияние на достоверность результата.

Методики В. А. Соловьева и И. П. Амана учитывают поправку на изменение технической производительности проходческо-очистного комбайна и объем транспортируемой руды от угла наклона выработки (Методическое руководство по ведению горных работ ...), [3], в то время как в остальных

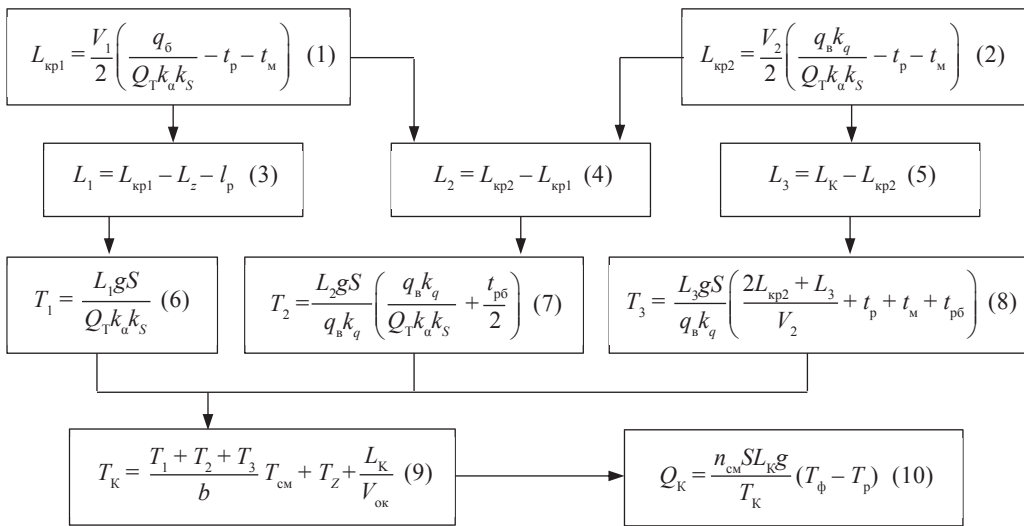


Рисунок 1. Блок-схема расчета эксплуатационной производительности комбайнового комплекса: L_{kp1}, L_{kp2} – критические длины доставки, м; V_1, V_2 – скорость СВ на условно коротких и длинных дистанциях доставки, м/мин; q_6, q_b – грузоподъемность бункер-перегрузателя и СВ, т; Q_T – техническая производительность проходческо-очистного комбайна, т/мин; k_a, k_s, k_q – поправочные коэффициенты на угол наклона выработки, площадь сечения выработки и грузоподъемность; t_p, t_m – время СВ на разгрузку и маневры, мин; l_p – длина доставки, м; L_z – длина зарубки, м; L_1, L_2, L_3 – длины участков, м; L_K – длина очистной камеры, м; T_1, T_2, T_3 – время отработки 1-го, 2-го и 3-го участка очистной камеры, мин; S – площадь выработки, м²; t_{p6} – время разгрузки бункер-перегрузателя, мин; T_K – время отработки всей очистной камеры, смен; b – коэффициент использования по времени; T_{cm} – продолжительность рабочей смены, мин; T_z – время зарубки, смен; $V_{ок}$ – скорость отгона проходческо-очистного комбайна, м/смену; Q_K – эксплуатационная производительность комбайнового комплекса, т/год; n_{cm} – количество смен в одном рабочем дне, смен/сут; T_ϕ – количество рабочих дней в году, сут/год; T_p – количество дней в году на ремонт, сут/год

Figure 1. Block diagram for calculating the working capacity of the combine system: L_{kp1}, L_{kp2} – the critical delivery lengths, m; V_1, V_2 – the speed of the self-propelled car at relatively short and long delivery distances, m/min; q_6, q_b – the loading capacity of the hopper-reloader and the self-propelled car, t; Q_T – technical productivity of the shearer-loader, t/min; k_a, k_s, k_q – correction factors for the mine working slope angle, cross-sectional area and load capacity; t_p, t_m – the self-propelled car’s time for unloading and maneuvers, min; l_p – delivery length, m; L_z – the cutting length, m; L_1, L_2, L_3 – the lengths of areas, m; L_K – the stope length, m; T_1, T_2, T_3 – the time of mining the 1st, 2nd and 3rd areas of the stope, min; S – the area of the mine working, m²; t_{p6} – unloading time of the hopper-reloader, min; T_K – the time of mining the entire stope, shifts; b – the time factor; T_{cm} – duration of the work shift, min; T_z – the cutting time, shifts; $V_{ок}$ – the speed of driving the shearer-loader away, m/shift; Q_K – working capacity of the combine system, t/year; n_{cm} – the number of shifts in one working day, shifts/day; T_ϕ – the number of working days per year, days/year; T_p – the number of days per year spent for repairs, days/year

методиках эта поправка отсутствует. При работе проходческо-очистного комбайна в очистных камерах неизбежны просыпи (потери) отбитой руды, поправку на просыпь при ведении очистных работ учитывает только методика И. П. Амана [3].

Таким образом, каждая из рассмотренных расчетных моделей типовых методик расчета эксплуатационной производительности КК построена на ряде принятых допущений, что делает прогноз эксплуатационной производительности комбайнового комплекса предварительным, характеризующимся заданной величиной допустимой погрешности. Уточнение прогнозных значений эксплуатационной производительности КК может быть обеспечено на основе результатов рудничных испытаний с выполнением хронометража выполняемых операций.

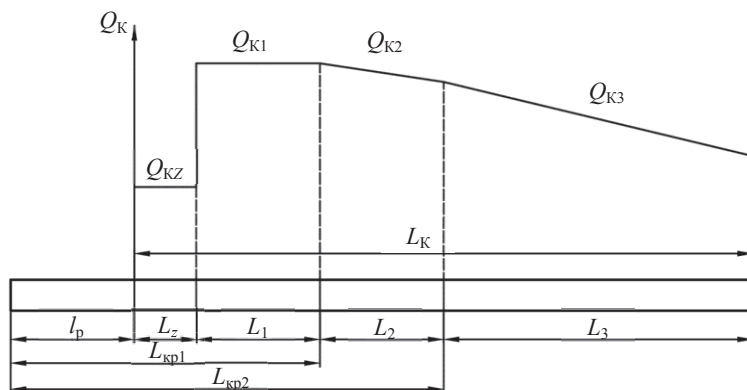


Рисунок 2. Изменение эксплуатационной производительности комбайнового комплекса по длине очистной камеры: Q_{KZ} – эксплуатационная производительность комбайнового комплекса при зарубке, т/год; Q_{K1} , Q_{K2} , Q_{K3} – эксплуатационная производительность комбайнового комплекса на участках, т/год

Figure 2. Change in the working capacity of the combine system along the length of the slope: Q_{KZ} – the working capacity of the combine system when cutting, t/year; Q_{K1} , Q_{K2} , Q_{K3} – the working capacity of the combine system in the areas, t/year

Анализ типовой методики расчета эксплуатационной производительности комбайнового комплекса В. А. Соловьева. Проанализируем методику расчета, рассмотренную в *Методическом руководстве по ведению горных работ...*, более детально, как наиболее распространенную для расчета эксплуатационной производительности КК на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (ВМКМС). Блок-схема расчета эксплуатационной производительности КК по данной типовой методике приведена на рис. 1.

Расчет по указанной методике выполняется в четыре этапа:

- определение критических длин доставки руды от БП в очистной камере до мест разгрузки по формулам (1) и (2);
- определение длин характерных участков в очистной камере по формулам (3), (4) и (5);
- определение времени ведения очистных работ на каждом участке и по всей длине очистной камеры по формулам (6), (7), (8) и (9);
- определение эксплуатационной производительности КК по формуле (10).

График изменения эксплуатационной производительности КК по длине очистной камеры приведен на рис. 2.

При зарубке на участке длиной L_2 эксплуатационная производительность КК минимальна, так как процесс зарубки проходческо-очистного комбайна в массив достаточно сложен и требует дополнительных трудозатрат на выполнение вспомогательных операций. На участке L_1 эксплуатационная производительность комбайнового комплекса максимальная, так как на этом участке проходческо-очистной комбайн работает без перерывов, а СВ простаивает в ожидании заполнения БП. Участок L_2 характеризуется наличием простоев проходческо-очистного комбайна, связанных с разгрузкой БП, эксплуатационная производительность КК снижается. На участке L_3 работа проходческо-очистного комбайна сопровождается длительными, увеличивающимися во времени простоями в ожидании СВ, и эксплуатационная производительность КК значительно снижается. Границы перечисленных участков определяются критическими расстояниями доставки $L_{кр1}$ и $L_{кр2}$ и длиной очистной камеры L_K .

Таблица 1. Первоначальные значения параметров работы комбайнового комплекса и заданный интервал их изменения

Table 1. Initial values of the working parameters of the combine system and the specified variation interval

Параметр	Значение параметра	Заданный интервал изменения
Скорость СВ (ВС-30), м/мин	150	–50...50 %
Время разгрузки БП (БПС-25), мин	1,5	–50...50 %
Длина зарубки (комбайн «Урал-20Р»), м	20	–50...50 %
Длина очистной камеры, м	200	–50...50 %
Время зарубки (комбайн «Урал-20Р»), смен	1,2	–50...50 %
Скорость отгона проходческо-очистного комбайна («Урал-20Р»), м/смену	115	–50...50 %
Время разгрузки СВ (ВС-30), мин	1,5	–50...50 %
Время маневров СВ (ВС-30), мин	1,0	–50...50 %
Коэффициент использования по времени (комбайн «Урал-20Р»)	0,48	–30...30 %
Количество рабочих дней в году, сут	325	–20...20 %

Рассматриваемая методика применима для расчетов эксплуатационной производительности КК для добычи калийной руды, в состав которых входит проходческо-очистной комбайн, БП и СВ, при циклической доставке руды от забоя к рудоспускной скважине.

Оценка влияния параметров работы комбайнового комплекса на эксплуатационную производительность. В соответствии с *Методическим руководством по ведению горных работ...* проведены аналитические расчеты для определения зависимости изменения эксплуатационной производительности при варьировании параметров работы КК. За первоначальные значения принимались параметры работы комбайнового комплекса, состоящего из проходческо-очистного комбайна Урал-20Р, бункер-перегрузателя БПС-25 и шахтного самоходного вагона ВС-30, как наиболее распространенного на ВМКМС. Характеристики указанного оборудования приведены в [8–11], (*Руководство по эксплуатации «Вагон шахтный самоходный», 530-00.00.0000 РЭ / ООО «УГМК Рудормаши-Воронеж», 2015. 173 с.*). Первоначальные значения параметров работы комбайнового комплекса приведены в табл. 1 (Методическое руководство по ведению горных работ ...).

В расчетах последовательно изменялись параметры работы оборудования в заданном интервале (табл. 1): пять значений с равным шагом в сторону уменьшения и пять – в сторону увеличения. После выполнения каждого расчета результаты фиксировались на графике зависимости годовой производительности КК в тыс. т в год от изменения параметра в процентах. Результаты выполненных расчетов приведены на рис. 3: видно, что при увеличении таких параметров как количество рабочих дней в году, коэффициент использования по времени по времени, скорость СВ и скорость отгона проходческо-очистного комбайна, годовая производительность КК увеличивается, в то время как при увеличении остальных параметров – годовая производительность уменьшается.

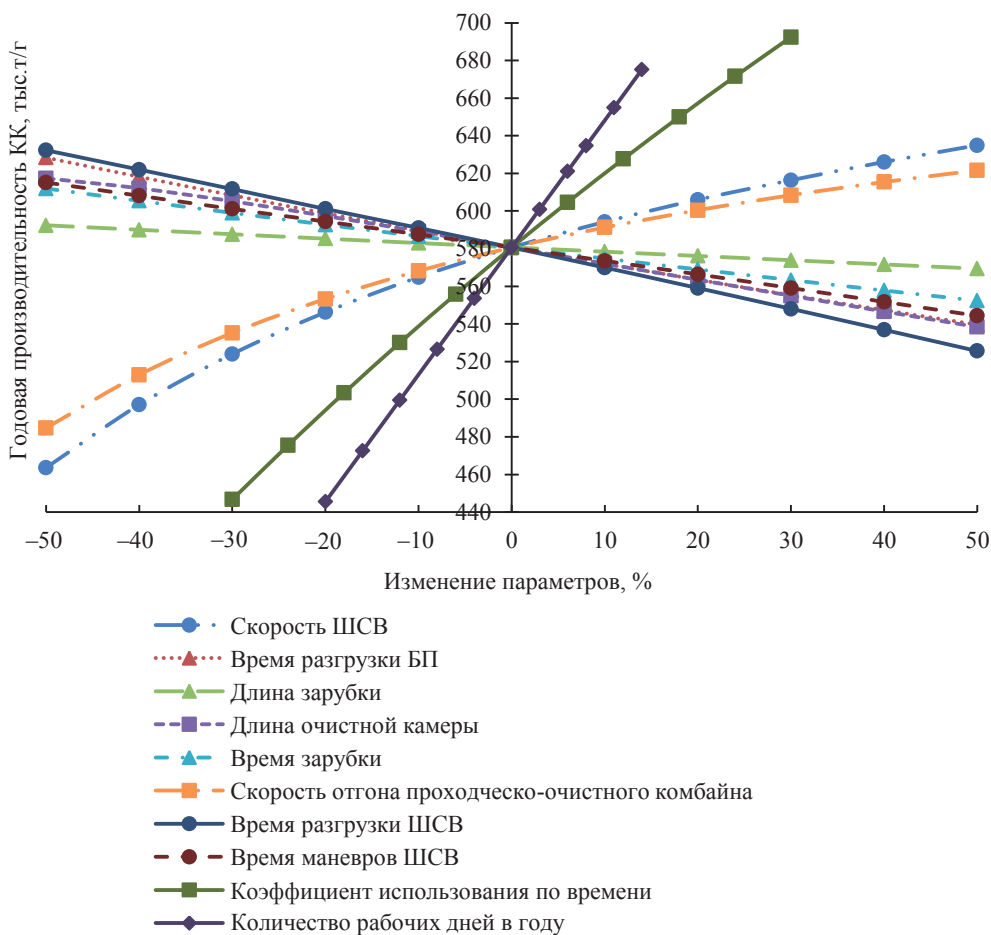


Рисунок 3. Изменение годовой производительности в зависимости от изменения параметров работы комбайнового комплекса

Figure 3. Change in annual capacity depending on changes in the combine system working parameters

Для получения зависимости годовой производительности КК от значений скорости СВ значения указанного параметра подставлялись в формулы (1) и (2). Согласно правилам безопасности, скорость СВ не должна превышать 20 км/ч (Руководство по эксплуатации «Вагон шахтный самоходный», 530-00.00.0000 РЭ / ООО «УГМК Рудгормаш-Воронеж», 2015. 173 с., Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» от 8 декабря 2020 г. № 505),

так как повышение скорости в условиях ограниченной видимости и габаритов очистных камер повышает опасность при ведении горных работ.

Время разгрузки бункер-перегрузателя, как и время разгрузки шахтного самоходного вагона, зависит от производительности донного скребкового конвейера, помимо этого время разгрузки шахтного самоходного вагона зависит от приемной способности рудоспускной скважины или участкового конвейера. Зависимость годовой производительности КК от изменения параметров времени разгрузки БП и СВ получена путем подстановки значений указанных параметров в формулы (1), (2), (7) и (8).

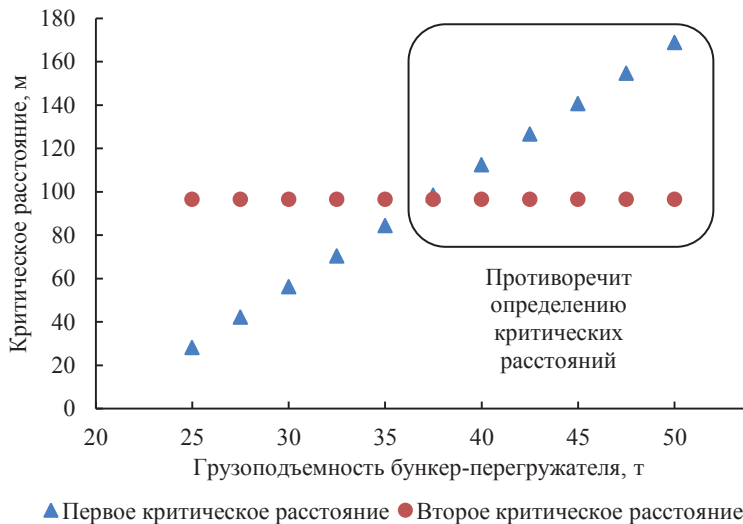


Рисунок 4. Изменение критических расстояний доставки при изменении грузоподъемности бункер-перегрузателя

Figure 4. Change in critical delivery distances under changing loading capacity of the hopper-reloader

Для получения зависимости годовой производительности КК от значений длины зарубки значения указанного параметра подставлялись в формулу (3). Длиной зарубки называется такое расстояние отработанной очистной камеры, при котором процесс зарубки завершается и КК выходит на номинальный режим работы.

При увеличении длин очистных камер увеличивается расстояние доставки отбитой породы до места разгрузки, что значительно влияет на производительность средств доставки и, соответственно, на эксплуатационную производительность в целом. Согласно принятым системам разработки на калийных рудниках длина очистной камеры в основном составляет 200 м (наиболее рациональная) [12]. Теоретически обосновано, что длину очистной камеры можно увеличить до 300–350 м при использовании большегрузных СВ [13, 14], но на практике указанный подход не получил широкого применения. Зависимость годовой производительности КК от изменения параметра длины очистной камеры получена путем подстановки значений указанного параметра в формулы (5), (9) и (10).

Для получения зависимости годовой производительности КК от значений времени зарубки значения указанного параметра подставлялись в формулу (9). Время зарубки выделяется от основного времени работы комбайнового

комплекса, поскольку зарубка проходческо-очистного комбайна на очередную очистную камеру либо на второй ход производится в наиболее тяжелых условиях по сравнению с непосредственно очистными работами, так как контакт исполнительного органа проходческо-очистного комбайна с забоем во время зарубки происходит под углом.

По завершении проходки одного хода проходческо-очистному комбайну требуется вернуться на исходную позицию для зарубки на второй ход либо на зарубку следующей очистной камеры. При отгоне выполняются разные вспомогательные операции (демонтаж вентиляционного става, снятие силового кабеля и т. д.), которые значительно влияют на скорость отгона проходческо-очистного комбайна. Зависимость годовой производительности КК от изменения параметра скорости отгона проходческо-очистного комбайна получена путем подстановки значений указанного параметра в формулу (9).

Для получения зависимости годовой производительности КК от значений времени маневра СВ значения указанного параметра подставлялись в формулы (1), (2) и (8). Время маневров самоходного вагона определяется затратами времени на направление разгрузочного органа на скважину или загрузочный стол конвейера по прибытии СВ к месту разгрузки. В расчетной модели принимается время маневров СВ при разгрузке на участковый конвейер.

Коэффициент использования по времени определяется отношением времени работы проходческо-очистного комбайна к общему времени работы комбайнового комплекса. Очистные работы КК сопровождаются многочисленными вспомогательными операциями (крепление кровли анкерами, укладка силового кабеля, корректировка направления движения проходческо-очистного комбайна и т. д.), что значительно увеличивает временные затраты на производственные операции, а следовательно, влияет на общую эксплуатационную производительность комбайнового комплекса. Зависимость годовой производительности КК от изменения параметра коэффициента использования по времени получена путем подстановки значений указанного параметра в формулу (9).

Для получения зависимости годовой производительности КК от количества рабочих дней в году значения указанного параметра подставлялись в формулу (10). Согласно действующим регламентам рудников ВМКМС, количество рабочих дней в году в основном составляет 325. Остальные дни отводятся на непредвиденные простои, капитальный ремонт горно-шахтного оборудования и т. д.

Также были определены средние приращения годовой производительности комбайнового комплекса при изменении рассматриваемых параметров на 1 % как в большую, так и в меньшую сторону в заданном интервале (табл. 1).

Приращение годовой производительности $\Delta Q_{\text{ср}}$ КК, тыс. т/г, при изменении параметра на 1 %

Скорость СВ.....	1,71
Время разгрузки БП.....	0,89
Длина зарубки.....	0,20
Длина очистной камеры.....	0,79
Время зарубки.....	0,60
Скорость отгона комбайна.....	1,37
Время разгрузки СВ.....	1,07
Время маневров СВ.....	0,71
Коэффициент машинного времени.....	4,10
Количество рабочих дней в году.....	6,76

Результаты проведенных расчетов показывают, что наибольшие приращения годовой производительности $\Delta Q_{\text{ср}}$ наблюдаются при изменении количества рабочих дней в году, коэффициента использования по времени и скорости самоходного вагона. Увеличение годовой производительности за счет увеличения количества рабочих дней в году возможно за счет повышения надежности горно-шахтного оборудования, а также сокращения длительности капитальных ремонтов, что позволит сократить годовые простои рудника. Увеличение коэффициента использования по времени достигается путем совмещения выполнения вспомогательных операций, а также их исключения за счет применения усовершенствованного горно-шахтного оборудования, либо пересмотра технологии ведения работ. Увеличение скорости СВ негативно влияет на безопасность ведения горных работ, поэтому увеличивать годовую производительность КК за счет этого параметра нецелесообразно. В таком случае необходимо рассматривать повышение производительности доставки в целом, например, применение средств непрерывной доставки [15], либо применение альтернативной технологии доставки отбитой породы (челноковая, с разминкой и т. п.) [16].

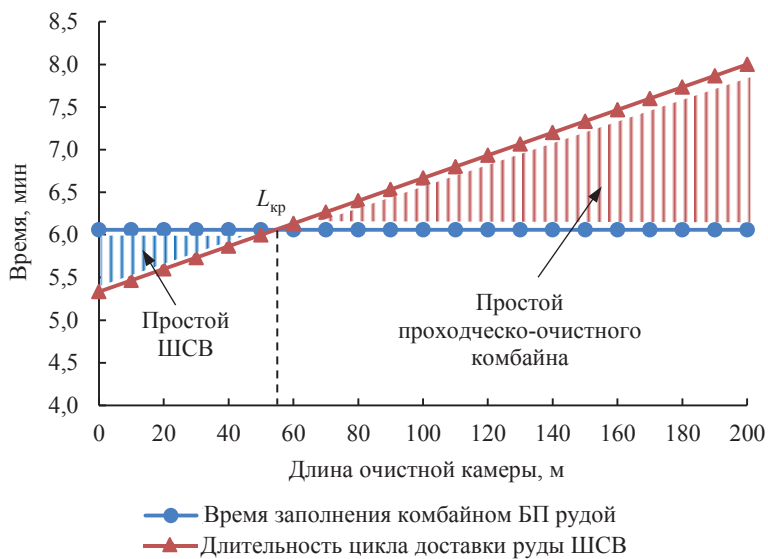


Рисунок 5. Изменение времени простоев горно-шахтного оборудования в зависимости от расстояния доставки руды в очистной камере
Figure 5. Change in downtime of mining equipment depending on the distance of ore delivery in the stope

Рациональное соотношение основных параметров горно-шахтного оборудования в составе комбайнового комплекса. При выполнении аналитических расчетов в соответствии с *Методическим руководством по ведению горных работ...* выявлено, что типовая методика не позволяет корректно оценить влияние технической производительности проходческо-очистного комбайна, а также грузоподъемности СВ и БП на эксплуатационную производительность КК. Это проявляется в том, что при увеличении грузоподъемности БП первое критическое расстояние становится больше второго, что противоречит их определению (рис. 4).

На рис. 4 приведены результаты расчета первого и второго критического расстояния для различных значений грузоподъемности БП. Для расчета были использованы формулы (1) и (2). При грузоподъемности БП более 37 т второе критическое расстояние становится больше первого.

Для корректного определения критического расстояния предлагается исходить из того положения, что работа КК делится только на два участка: первый участок характеризуется простоем самоходного вагона, эксплуатационная производительность КК на этом участке определяется технической производительностью проходческо-очистного комбайна; второй характеризуется простоями проходческо-очистного комбайна в ожидании самоходного вагона и производительностью средств доставки. Заштрихованные области на рис. 5 соответствуют изменению времени простоев СВ и проходческо-очистного комбайна в зависимости от расстояния доставки руды в очистной камере. Анализ полученных данных показывает, что при продвижении проходческо-очистного комбайна в глубь очистной камеры длительность цикла доставки руды СВ увеличивается, а время заполнения БП рудой проходческо-очистным комбайном остается неизменным. При условно небольших расстояниях доставки СВ простаивает в ожидании наработки проходческо-очистным комбайном необходимого объема руды. Пересечение двух кривых на рис. 5 показывает, что наступает такой момент, когда время доставки становится больше времени наработки необходимого объема руды, это говорит о том, что проходческо-очистной комбайн начинает простаивать с нарастанием времени ожидания средств доставки, и эксплуатационная производительность снижается [17–19].

Исходя из указанного положения для расчета эксплуатационной производительности комбайнового комплекса целесообразней использовать только одно критическое расстояние, которое определяется по формуле:

$$L_{кр} = \frac{V_2}{2} \left(\frac{q_b}{Q_T} - \frac{2(l_p + L_z)}{V_1} - t_p - t_m - t_{зв} \right), \tag{11}$$

где V_1, V_2 – скорость СВ, при доставке на расстояние менее и более 25 м, соответственно, м/мин.

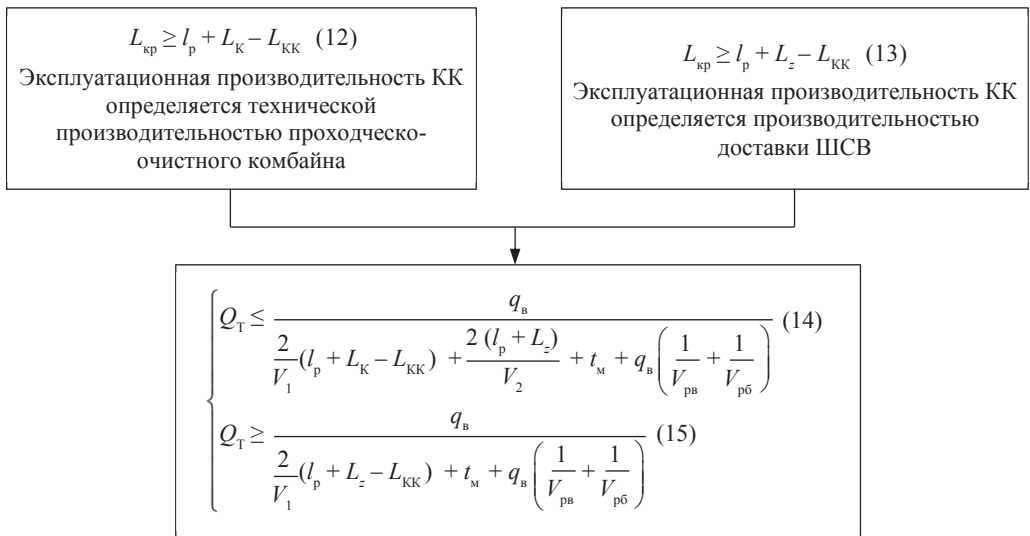


Рисунок 6. Условия рациональности подбора горно-шахтного оборудования: $L_{кк}$ – длина комбайна с бункер-перегрузателем, м; $V_{рв}, V_{рб}$ – скорость разгрузки самоходного вагона и бункер-перегрузателя, т/мин

Figure 6. Conditions for the rational selection of mining equipment: $L_{кк}$ – length of the combine with a hopper-loader, m; $V_{рв}, V_{рб}$ – unloading speed of the self-propelled car and hopper-reloader, t/min

Используя формулу (11), определим условия, при которых параметры горно-шахтного оборудования подобраны рационально (рис. 6). В формулы (12) и (13) подставляем выражение (11) и получаем систему уравнений с формулами (14) и (15), в которых дополнительно время разгрузки СВ и БП выражаем как отношение грузоподъемности к скорости разгрузки.

Первое условие, выраженное в формулах (12) и (14), характеризует нецелесообразность повышения эксплуатационной производительности КК за счет повышения грузоподъемности СВ в условиях, когда эксплуатационная производительность КК определяется только параметрами технической производительности проходческо-очистного комбайна (рис. 7, нижняя заштрихованная область). Второе условие, выраженное в формулах (13) и (15), характеризует нецелесообразность повышения эксплуатационной производительности КК за счет повышения технической производительности проходческо-очистного комбайна в условиях, когда эксплуатационная производительность КК зависит только от производительности средств доставки, а именно от грузоподъемности СВ (рис. 7, верхняя заштрихованная область). Для корректной интерпретации полученных результатов рассмотрим несколько примеров.

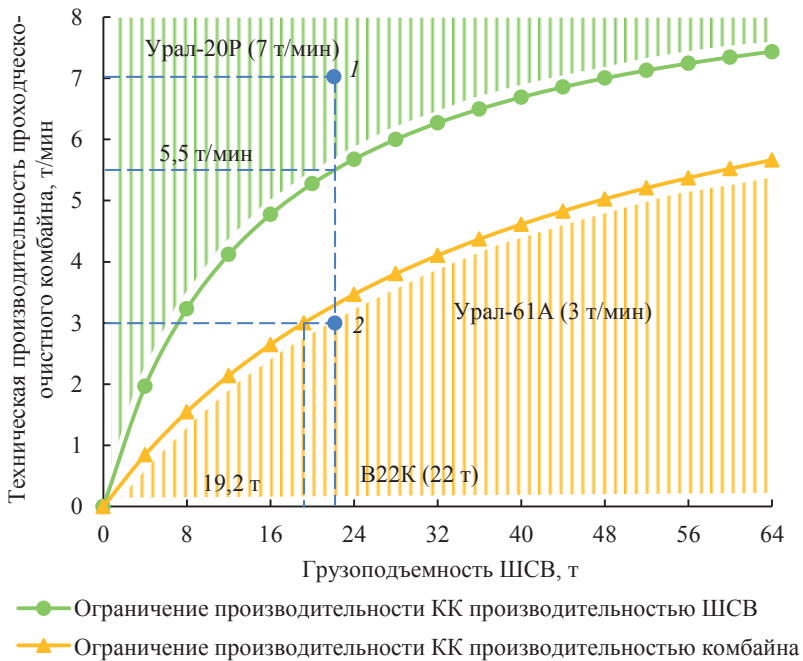


Рисунок 7. Рациональное соотношение грузоподъемности шахтного самоходного вагона с технической производительностью проходческо-очистного комбайна

Figure 7. Rational relationship between the load-carrying capacity of a self-propelled car and the technical performance of a shearer-loader

Пример 1. Комбайновый комплекс в составе с проходческо-очистным комбайном «Урал-20Р» и шахтным самоходным вагоном В22К. Точка 1 (рис. 7) с принятыми параметрами оборудования находится в области, которая характеризуется ограничением производительности КК производительностью средств доставки. В таком случае применение проходческо-очистного комбайна с технической производительностью выше 5,5 т/мин не повлияет на увеличение производительности КК в целом.

Пример 2. Комбайновый комплекс в составе с проходческо-очистным комбайном «Урал-61А» и самоходным вагоном В22К. Точка 2 (рис. 7) с принятыми параметрами оборудования находится в области, которая характеризуется ограничением производительности КК технической производительностью проходческо-очистного комбайна. В таком случае применение самоходного вагона грузоподъемностью выше 19,2 т не способствует увеличению эксплуатационной производительности КК.

Полученная диаграмма позволяет не только подобрать оборудование комбайнового комплекса без излишних резервов производительности, но и повысить надежность оборудования уже работающего КК. Например, при работе комбайна «Урал-20Р» в комплексе с вагоном В22К отсутствует необходимость работы проходческо-очистного комбайна с максимальной технической производительностью. Достаточно ограничить производительность проходческо-очистного комбайна величиной 5,5 т/мин, что позволит снизить нагруженность узлов, сократить износ приводов и исполнительных органов.

Заключение. Для оценки эксплуатационной производительности комбайновых комплексов существует несколько типовых методик, анализ которых показал, что каждая из них построена на ряде принятых допущений, что определяет их область применения при решении тех или иных задач.

Существующие типовые методики могут быть использованы для сравнения существующих технологий ведения горных работ с различной компоновкой оборудования комбайнового комплекса. При этом следует обращать внимание, что к некоторым параметрам работы КК существующие типовые методики неприменимы, т. е. требуется их адаптация.

Результаты выполненных аналитических расчетов показали, что наиболее перспективным направлением повышения эксплуатационной производительности комбайновых комплексов является повышение коэффициента использования по времени и производительности средств доставки.

При выборе основных параметров горно-шахтного оборудования комбайнового комплекса следует обращать внимание на рациональное соотношение параметров проходческо-очистных комбайнов и самоходных вагонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыхин П. А. Основы методики выбора оптимальных параметров комбайнового комплекса и расчета его производительности при камерной системе разработки в калийных рудниках. М: ВНИИЦентр, 1998. 35 с.
2. Пинский В. Л., Соболев А. В. Отраслевая методика расчета производительности очистных и проходческих комплексов, включающих комбайн и средства самоходного транспорта (в условиях калийных рудников). Л.: ВНИИГ, 1972. 36 с.
3. Аман И. П. Методика расчета производительности комбайновых комплексов, работающих по односторонней схеме с отгоном. Пермь, 2008. 9 с.
4. Озорнин М. С., Шишляников Д. И., Романов В. А. Определение параметров работы комбайновых комплексов калийных рудников при проходке камер неполным сечением забоя // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 105–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-105-112
5. Segopolo P. R. Optimization of shuttle car utilization at an underground coal mine // The Journal of the Southey African Institute of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 115. No. 4. P. 285–296.
6. 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 // Journal of the International Measurement Confederation. 2018. Vol. 116. P. 273–280. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.11.004
7. Шишляников Д. И., Зверев В. Ю., Муравский А. К., Звонарев И. Е., Королев И. А. Методика определения средневзвешенной производительности механизированных комбайновых комплексов калийных рудников // ГИАБ. 2021. № 7. С. 125–133. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_125
8. Шишляников 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

9. Cakdi S., Cummings S., Punwani J. Heavy haul coal car wheel load environmentrolling contact fatigue investigation // Joint Rail Conference. San Jose, California, USA, March 23–26. 2015. Art. 112635. DOI: 10.1115/JRC2015-5640

10. 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. 2016. Art. 128056. DOI: 10.1115/IMECE2016-65381

11. Старков Л. И., Земсков А. Н., Кондрашев П. И. Развитие механизированной разработки калийных руд. Пермь: ПГТУ, 2007. 522 с.

12. Кошурников Н. С. Анализ технологических показателей работы комбайновых комплексов с целью оптимизации технологических параметров камерной системы разработки на калийных рудниках // ГИАБ. 2011. № 2. С. 70–76.

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. Соловьев В. А., Секунцов А. И. Повышение производительности комбайновых комплексов на рудниках компании ОАО «Уралкалий» // ГИАБ. 2014. № 7. С. 190–195.

15. Круглов Ю. В., Мальцев С. В. Применение технологии непрерывной доставки руды в условиях рудников Верхнекамья // Вестник ПНИПУ. 2012. № 3. С. 134–137.

16. Способ разработки пологих пластов калийных солей комбайновыми комплексами: пат. 2720863 Рос. Федерация. № 2019122555; заявл. 15.07.2019; опубл. 13.05.2020. Бюл. № 14. 7 с.

17. Кузьменко Р. А. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2020. Т. 1. С. 354–361.

18. 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

19. Пухов Ю. С. Рудничный транспорт. М.: Недра, 1991. 255 с.

Поступила в редакцию 5 февраля 2024 года

Сведения об авторах:

Сенькин Антон Викторович – аспирант кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: senkin.anton59@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-2910-6211>

Зверев Валерий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: zsva92@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2483-132X>

Лосев Дмитрий Александрович – аспирант кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: transporteur@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0078-6141>

Грибов Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: dmitriy.gribov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-5874-2133>

Ситников Дмитрий Александрович – лаборант кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: st.dmitry2018@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4909-7886>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-35-49

Estimating the working capacity of potassium ore combine systems

Anton V. Senkin¹, Valerii Iu. Zverev¹, Dmitrii A. Losev¹, Dmitrii S. Gribov¹, Dmitrii A. Sitnikov^{1*}

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

Abstract

Introduction. The main factors impacting the working capacity of combine systems in potassium mines are considered. The methodological framework is given for determining rational working parameters of mining equipment that ensure maximum working capacity of potassium ore combine systems.

Methods of research. The existing methods for calculating the working capacity of combine systems were analyzed. A number of analytical calculations were made to obtain the dependences between the annual capacity change and combine system working parameters.

Research results. The fundamental differences between the analytical models of the considered standard procedures have been identified; the differences are related to the assumptions adopted. A system of equations has been derived that mathematically describes the relationship of the main working parameters of equipment in potassium ore combine systems.

Conclusions. Each of the considered standard procedures for calculating the working parameters of potassium ore combine systems equipment has its own application area limited by the assumptions adopted. Existing standard procedures are used to compare different mining methods within their application area. In some exceptional cases, modification of standard procedures is required. The analytical calculation results showed that the most promising direction for improving the working capacity of potassium ore combine systems is to increase the shearer-loader time factor and ore delivery systems capacity in stope.

Keywords: capacity calculation; combine system; shearer-loader; delivery systems; self-propelled car; hopper-reloader.

REFERENCES

1. Lykhin P. A. *The fundamentals of a procedure of selecting the parameters of a combine system and its capacity calculation under chamber mining in potassium mines.* Moscow: VNTITsentr Publishing; 1998. (In Russ.)
2. Pinskiy V. L., Sobol A. V. *An industry-based method of calculating the capacity of stoping and heading sets of equipment that include a combine and self-propelled vehicles (in the potassium mine conditions).* Leningrad: VNIIG Publishing; 1972. (In Russ.)
3. Aman I. P. *A method of calculating the capacity of combine systems working according to a one-way scheme with driving away.* Perm: 2008. (In Russ.)
4. Ozornin M. S., Shishliannikov D. I., Romanov V. A. Determining the operating parameters of machine systems in potassium mines when tunneling with stope back partial section. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2020; 1: 105–112. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-1-105-112
5. Segopolo P. R. Optimization of shuttle car utilization at an underground coal mine. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy.* 2015; 115(4): 285–296.
6. Quiroz J. C., Mariun N., Mehjrou 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.* 2018; 116: 273–280. Available from: doi: 10.1016/j.measurement.2017.11.004
7. Shishliannikov D. I., Zverev V. Iu., Muravskii A. K., Zvonarev I. E., Korolev I. A. Procedure to determine weighed average capacity of machine chains in potassium mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2021; 7: 125–133. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_125
8. Shishliannikov D. I., Trifanov M. G., Prosovskii K. A., Losev D. A., Tiubeev I. Kh. Improving the working capacity of mechanized combine systems at potassium mines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2023; 4: 82–92. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-4-82-92
9. Cakdi S., Cummings S., Punwani J. Heavy haul coal car wheel load environmentrolling contact fatigue investigation. In: *2015 Joint Rail Conference. San Jose, California, USA, March 23–26.* 2015; 112635. DOI: 10.1115/JRC2015-5640
10. Jobs C. C., Bissert P., Mahmoudian N., Li B. Development of parameters for dynamic modeling of underground haulage vehicles. In: *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.* 2016; 128056. Available from: doi: 10.1115/IMECE2016-65381
11. Starkov L. I., Zemskov A. N., Kondrashev P. I. *The development of potassium ore machine mining.* Perm: PSTU Publishing; 2007. (In Russ.)
12. Koshurnikov N. S. Analysing the technological indicators of combine system performance to optimize the technological parameters of chamber mining at potassium mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2011; 2: 70–76. (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. Soloviev V. A., Sekuntsov A. I. Improving combine system performance at the mines of Uralkaly OJSC. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2014; 7: 190–195. (In Russ.)
15. Kruglov Iu. V., Maltsev S. V. Continuous use of technology in the delivery of ore mine Verkhnekamyne. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya, neftegazovoe i gornoe delo = Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering.* 2012; 3: 134–137. (In Russ.)

16. 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. (In Russ.)
17. Kuzmenko R. A. Increasing the efficiency of application the digging and transporting machines of combine complexes at potassium mines. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh = The Problems of Developing Hydrocarbon and Ore Mineral Deposits*. 2020; 1: 354–361. (In Russ.)
18. 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
19. Pukhov Iu. S. *Mine transport*. Moscow: Nedra Publishing; 1991. (In Russ.)

Received 5 February 2024

Information about the authors:

Anton V. Senkin – PhD student, Department of Mining Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: senkin.anton59@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-2910-6211>

Valerii Iu. Zverev – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Mining Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: zvva92@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2483-132X>

Dmitrii A. Losev – PhD student, Department of Mining Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: transporteur@inbox.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0078-6141>

Dmitrii S. Gribov – PhD student, Department of Mining Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: dmitriy.gribov@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-5874-2133>

Dmitrii A. Sitnikov – laboratory assistant, Department of Mining Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: st.dmitry2018@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4909-7886>

Для цитирования: Сенькин А. В., Зверев В. Ю., Лосев Д. А., Грибов Д. С., Ситников Д. А. Оценка эксплуатационной производительности комбайновых комплексов для добычи калийной руды // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 4. С. 35–49. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-35-49

For citation: Senkin A. V., Zverev V. Iu., Losev D. A., Gribov D. S., Sitnikov D. A. Estimating the working capacity of potassium ore combine systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 4: 35–49. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-35-49