ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-3):68–84
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.2 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_68

УВЕЛИЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ КОМБАЙНОВЫХ КОМПЛЕКСОВ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

Д. А. Лосев[1], Д. С. Грибов[1], Д. И. Шишлянников[2], Д. А. Ситников[2], В. К. Картавцев[2]

[1] АО «ВНИИ Галургии», Санкт-Петербург, 190103, Россия, vniig@uralkali.com
[2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 614990, Россия, rector@pstu.ru

Аннотация: Приведены основные сведения о работе механизированных комбайновых комплексов (МКК), применяемых на предприятиях Российской Федерации по добыче и переработке калийных руд. Обоснована актуальность задачи поиска решений по увеличению эксплуатационной производительности МКК. Проведено теоретическое исследование процесса функционирования комбайновых комплексов при отработке продуктивных пластов камерной системой разработки. Осуществлен анализ типового алгоритма расчета эксплуатационной производительности МКК на каждом из участков добычной камеры с характерными режимами работы комплекса. Определен ряд факторов, не учитываемых типовой методикой, однако влияющих на величину простоев добычной машины. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению времени производительной работы машин МКК с использованием переносных регистраторов параметров работы. Определены значения и построены зависимости изменения коэффициента производительной работы комбайна и шахтного самоходного вагона во времени при работе полным сечением исполнительного органа, а также при выполнении подрубки пласта. Показано, что при работе глухим забоем на большей части очистной камеры производительность МКК ограничивается производительностью шахтного самоходного вагона. Кроме того, существенное снижение производительности МКК связано с внешними влияющими факторами: остановками магистральных конвейеров, выполнением мероприятий по обслуживанию и ремонту машин и оборудования, а также проведением вспомогательных технологических операций. Предложены и обоснованы решения, позволяющие интенсифицировать доставку руды от места ведения работ в забое к узлам разгрузки шахтных самоходных вагонов на линии конвейерного транспорта.

Ключевые слова: Добыча калийной руды, камерная система разработки, проходческо-очистной комбайн, механизированный комбайновый комплекс, эксплуатационная производительность, программно-регистрирующий комплекс, режимы работы комбайна, сплошной забой, подрубка пласта, дальность транспортирования.

Благодарности: Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023–0005).

Для цитирования: *Лосев Д. А., Грибов Д. С., Шишлянников Д. И., Ситников Д. А., Картавцев В. К.* Увеличение времени производительной работы механизированных комбайновых комплексов калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-3. – С. 68–84. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_68.

Enhancing productive operating time of mechanized combine complexes of potash mines

D. A. Losev[1], D. S. Gribov[1], D. I. Shishlyannikov[2], D. A. Sitnikov[2], V. K. Kartavcev[2]

[1] SC "VNII Galurgy", St. Petersburg, 198216, Russia, vniig@uralkali.com
[2] Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russia, rector@pstu.ru

Abstract: This article presents basic information on the operation of mechanized combine complexes (MCC) widely used at potash ore mining and processing plants in the Russian Federation. The relevance of finding solutions to increase MCC operational productivity is substantiated. A theoretical study of the operation of MCC during chamber-and-pillar mining of productive seams is conducted. A standard algorithm for calculating MCC operational productivity in each of the four sections of the mining chamber with characteristic operating modes is analyzed. A number of factors not considered by the standard methodology, but influencing the amount of mining machine downtime, are identified. The article presents the results of experimental studies to determine the productive operating time of MCC machines using portable operating parameter recorders. The values are determined and dependencies are plotted for changes in the productivity coefficient of the miner and mine car over time when operating with the full cross-section of the cutting head, as well as during undercutting. It has been shown that when working with a blind face, the productivity of the MCC is limited by the capacity of the mine's shuttle-wagon over most of the stope. Furthermore, a significant reduction in MCC productivity is associated with external factors: shutdowns of main conveyors, maintenance and repair of machinery and equipment, and auxiliary operations. Solutions have been proposed and substantiated that can favorably influence the intensification of the delivery of spent ore by a sinking and cleaning combine from the site of work in the face to the unloading points of mine self-propelled wagons on the conveyor transport line.

Key words: Potash ore mining, chamber mining system, tonneling and cleaning combine, mechanized combine complex, operational performance, software and logging complex, combine operating modes, uninterrupted face, bossing, transportation range.

Acknowledgement: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project Supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project NO. FSNM-2023–0005).

For citation: Losev D. A., Gribov D. S., Shishlyannikov D. I., Sitnikov D. A., Kartavcev V. K. Enhancing productive operating time of mechanized combine complexes of potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-3):68–84. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_68.

Введение

Горные предприятия России, осуществляющие добычу калийной руды подземным способом, широко применяют камерную систему разработки продуктивных пластов с использованием комплектов добычных и транспортирующих машин — механизированных комбайновых комплексов (МКК). В состав каждого такого комплекса традиционно входит проходческо-очистной комбайн, бункер-перегружатель и шахтный самоходный вагон. Решение задачи интенсификации отработки продуктивных пластов калийных руд обусловливает необходимость изыскания технических и технологических решений, направленных на увеличение эксплуатационной производительности МКК и повышения времени производительной работы машин комбайновых комплексов [1, 2, 3].

Следует отметить, что увеличение производительности калийных рудников экстенсивным путём (посредством простого увеличения количества МКК при отработке продуктивных пластов) является не рациональным по причине существенного повышения затрат предприятия на закупку и эксплуатацию добычных и транспортирующих машин, а также необходимости расширения штата предприятия и значительно возрастающего размера фонда оплаты труда сотрудников [4, 5]. Кроме того, увеличиваются потери предприятия при простоях МКК, вызванных нарушением работы и остановками транспортных установок рудников: магистральных конвейеров, шахтных подъемных установок и т.д.

Повышение эффективности функционирования МКК (достижение максимальных значений производительности и времени технического использования горных машин) возможно на основе анализа данных экспериментальных исследований особенностей работы добычных и транспортирующих машин в условиях калийных рудников [6, 7]. Результаты таких исследований позволят определить совокупность факторов, оказывающих негативное влияние на стабильность работы комбайновых комплексов в очистных камерах, и сформулировать решения по совершенствованию технологий и увеличению интенсивности использования машин МКК.

Методы исследования

Разработка калийных руд на месторождениях России осложняется наличием мощных водоносных горизонтов в вышележащей толще над продуктивными пластами. Особенности горно-геологических условий определяют необходимость выемки калийной руды очистными камерами. Предотвращение деформации горных массивов и сохранение целостности налегающей водозащитной толщи над продуктивными пластами горных пород обеспечивается оставлением ленточных целиков в совокупности с осуществляемой после отработки закладкой выработанного пространства. Закладка пройденных камер осуществляется направлением в шахту солеотходов и шламовых отходов гидравлическим способом с обогатительной фабрики (гидравлическая закладка), а также использованием горной массы от проходки капитальных выработок (сухая закладка), доставляемой в камеры с помощью шахтных самоходных вагонов [8, 9]. Устойчивость горных пород продуктивных пластов, а также глубина их залегания определяют геометрические параметры элементов камерной системы: опорных целиков, очистных и капитальных выработок. В условиях добычи на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) расположенных в Пермском крае, глубина разработки варьируется от 180 до 390 м. При этом длина большинства очистных камер ограничена 200 метрами [10]. Площадь поперечного сечения камеры определяется на основании результатов математического и компьютерного моделирования деформации целиков и кровли при проектировании рудников (рис. 1).

Отработка очистных камер двумя и более ходами применяется при мощности продуктивного пласта более 4 м. Выработки при этом проходятся с наложением сечений исполнительных органов комбайнов по высоте. Первым ходом реализуется работа комбайна глухим забоем (полным сечением исполнительного органа). Каждый последующий ход осуществляется после отгона комбайна из выработки с последующим заглублением (выпол-

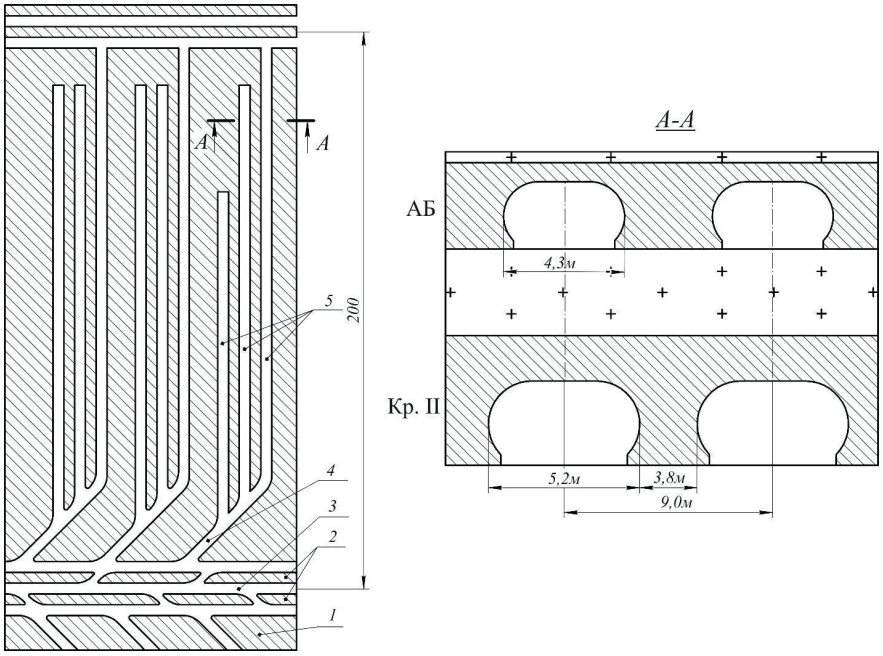

Рис. 1. Камерная система разработки пластов калийной руды: 1, 2 — опорные целики; 3 — откаточный штрек; 4 — участок зарубки; 5 — очистные камеры
Fig. 1. The system of development of productive layers adopted at the mines of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts: 1, 2 — pillars; 3 — drift; 4 — entry workings; 5 — cleaning chambers

нение подрубки пласта) и работой неполным сечением исполнительного органа (рис. 2).

В составе МКК на калийных рудниках РФ преимущественно применяются проходческо-очистные комбайны типа «Урал», производства АО «Копейский машиностроительный завод» (г. Копейск, Челябинская область, РФ), а также их аналоги с роторными и планетарно-дисковыми исполнительными органами производства ЗАО «СИПР» (г. Солигорск, республика Беларусь) [11, 12]. В качестве аккумулирующих и транспортирующих машин применяются соответственно бункеры-перегружатели (БП) и шахтные самоходные вагоны (ШСВ) с грузоподъемностью 15…30 тонн [13–16].

Основными показателями эффективности функционирования МКК являются его производительность и время производительного использования оборудования [17, 18]. Эксплуатационная производительность МКК нормирована по временным интервалам: годовая, среднемесячная, среднесменная и часовая [19 20].

Типовой расчетный алгоритм определения эксплуатационной производительности МКК, разработанный сотрудниками ВНИИ «Галургии» [21, 22] комплексно учитывает такие ключевые параметры отработки, как горно-геологические условия залегания продуктивных пластов калийного рудника, аккумулирующие параметры приемно-перегрузочной техники (бункер-перегружателей), а также технические показатели средств доставки — шахтных самоходных вагонов: грузоподъемные, скоростные и маневровые характеристики.

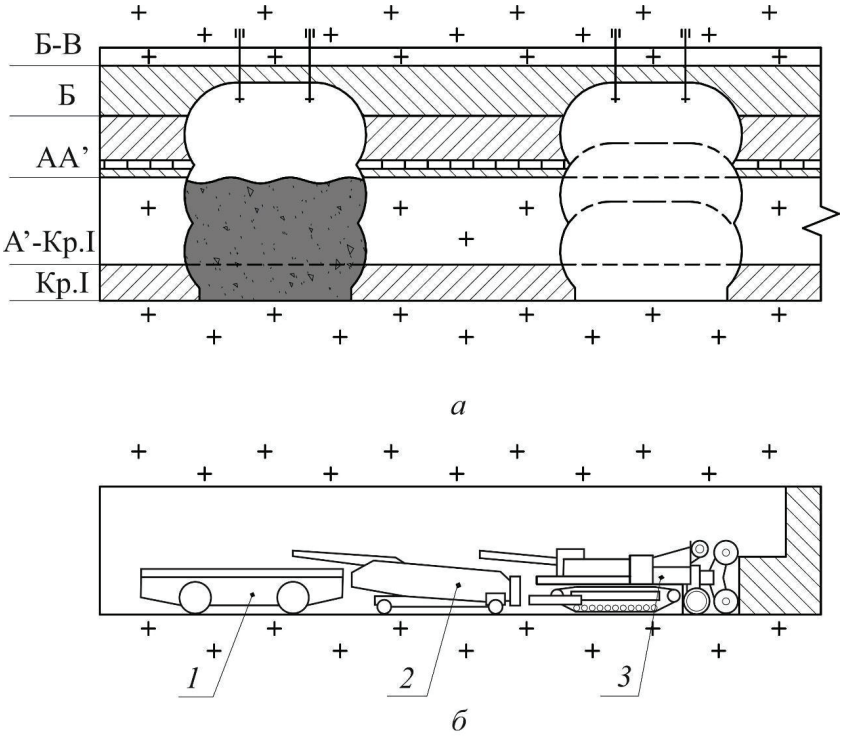

Рис. 2. Отработка калийных пластов несколькими ходами, продольное (а) и поперечное (б) сечение очистных камер: 1 — ШСВ; 2 — БП; 3 — комбайн
Fig. 2. Mining of powerful and converged formations with a sub–heading: a — cross section of chambers; b — longitudinal section of chamber; 1 — shuttle-wagon; 2 — bunker-loader; 3 — mining combine

Типовой алгоритм расчета предполагает, что за один ход камеры (т.е. на всем ее протяжении), комбайн работает в двух режимах с постоянной, но различной по величине производительностью и в двух режимах с производительностью, постепенно снижающейся, в среднем, пропорционально длине очистной камеры (рис. 3).

С технологической же точки зрения процесс отработки комплексом камеры или проведения основной или вспомогательной горной выработки состоит из трех этапов: зарубки, проходки (отработки) и отгона.

Начальным этапом проведения выработки или ведения очистных работ в блоке является зарубка — проведения выработки на длину $S_з$ с выполнением сопутствующих вспомогательных операций с целью размещения оборудования МКК в выработке для последующей работы комплекса в полном составе. Комбайн при зарубке может располагаться либо по оси проходимой выработки, либо под углом к ней. Первый способ применяется если ширина выработки достаточна для размещения комбайна в направлении ведения очистных или проходческих работ, второй — при зарубке из ранее пройденной этим же комбайном выработки путем последовательных ходов (подач) в результате которых комбайн устанавливается по оси проводимой выработки.

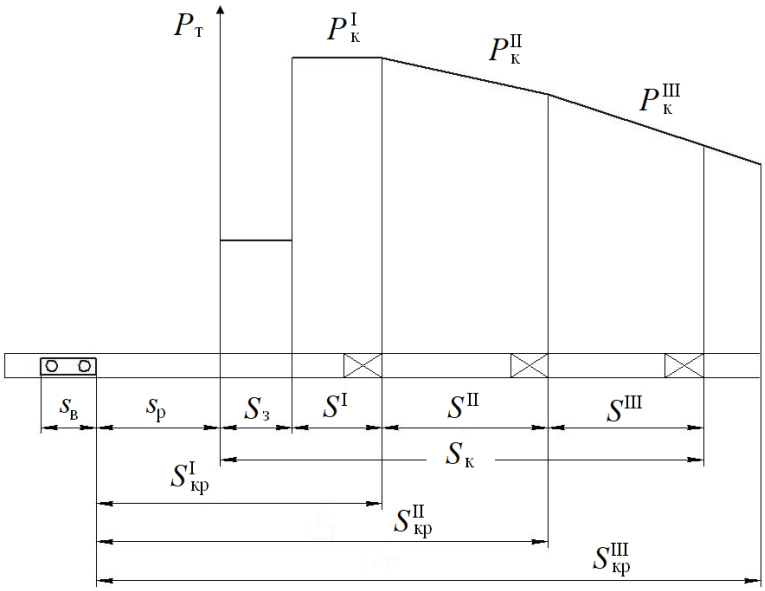

Рис. 3. Динамическая характеристика производительной работы МКК при проведении очистной выработки: $S_к$ — глубина очистного забоя, м; $s_р$ — дистанция от начала проходческой выработки до узла разгрузки ШСВ в средства непрерывного (конвейерного) транспорта, м; $s_в$ — длина ШСВ, м; $S_з$ — длина участка зарубки, м; S^{I}, S^{II}, S^{III} — длины характерных участков очистной камеры, м; $S^{I}_{кр}$, $S^{II}_{кр}$, $S^{III}_{кр}$ — критические длины доставки, м; $P^{I}_К$, $P^{II}_К$, $P^{III}_К$ — уровень производительности комбайнового комплекса на типовых участках проходки S^{I}, S^{II}, S^{III} соответственно, т/мин

Fig. 3. Dynamic characteristics of the MCC's productive work during tunneling and treatment workings: S_k — the depth of the cleaning face, m; $s_р$ — the distance from the beginning of the working run to the loading point in the conveyor transport means, m; $S_в$ — the length of the mining shuttle-wagon, m; $S_з$ — the notch depth, m; S^{I}, S^{II}, S^{III} — lengths of typical cleaning chamber sections, m; $S^{I}_{кр}$, $S^{II}_{кр}$, $S^{III}_{кр}$ — critical delivery lengths, m; $P^{I}_К$, $P^{II}_К$, $P^{III}_К$ — MCC performance in characteristic areas, t/min

На дистанции протяженностью $S_з$ характерна малая скорость подачи комбайна на забой и низкая производительностью, в том числе по причине работы неполным сечением исполнительного органа, а также вследствие функционирования МКК без БП.

Основным этапом, идущим вслед за этапом зарубки, является проходка (отработка) камеры, протяженность которой равна сумме длин типовых участков $S_з$, S^{I}, S^{II}, S^{III}, в том числе вкупе с дистанцией зарубки.

На участке S^{I} добычной камеры свойственна работа проходческо-добычного комбайна осуществляется с высокой производительностью, максимальной, сравнительно с другими участками отработки камеры. Стоит обратить внимание, что энергоэффективность комбайна максимальна в сравнении с работой на других участках камеры и близка к паспортному значению. В отличии от работы комбайнового комплекса на этапе зарубки, этапу проходки характерен процесс отбойки, погрузки и транспортировки руды с задействованием всего состава машин МКК: принимаемая от комбайна отбитая рудная масса с помощью

БП аккумулируется и перегружается в ШСВ для последующей транспортировки к рудоспускным скважинам над магистральными конвейерами.

На участке S^{I} результирующая длительность движения и разгрузки вагона не превышает продолжительность загрузки комбайном в БП того объема руды, который может разместиться в ШСВ без просыпания горной массы на почву выработки в результате перемещения руды донным конвейером вагона.

Работа комбайнового комплекса на втором участке с дистанцией S^{II} характеризуется тем, что комбайн осуществляет производительную работу во время отсутствия вагона также, как и на первом участке, но с возрастающими по мере увеличения длины камеры остановками на период загрузки самоходного вагона в виду несовмещенной работы комбайна по отбойке и перегрузке отбитой руды в ШСВ.

На типовом участке S^{III} проходческо-очистной комбайн простаивает, ожидая прибытия и загрузки ШСВ [23]. Производительность комплекса непрерывно снижается по мере отдаления поверхности забоя от устья выработки.

Границы перечисленных участков определяются следующими расстояниями: первая критическая длина доставки $S^{I}_{кр}$, вторая критическая длина $S^{II}_{кр}$ и третья критическая длина $S^{III}_{кр}$.

Критическое расстояние доставки $S^{I}_{кр}$ определяется только параметрами оборудования МКК, не зависит от надежности машин и уровня организации работ и является, таким образом, объективной характеристикой комплекса данного состава, непосредственно регламентирующей в качественном и количественном отношении) показатели его работы на стадии проходческо- очистных работ.

Величина участка S^{I} (см. рис. 3) определяется по формуле:

$$S^{I} = S^{I}_{кр} - S_{з} - s_{р}, \qquad (1)$$

Длина доставки $S^{I}_{кр}$ определяется выражением:

$$S^{I}_{кр} = 0{,}5V_{á1}\left(\frac{q_{н}}{P_{к}} - t_{р.в}\right), \qquad (2)$$

где $V_{\alpha 1}$ — скорость движения ШСВ на участке $S^{I}_{кр}$ с учетом угла наклона очистной камеры, м/мин; $P_{к}$ — номинальная производительность комбайна, т/мин; $t_{р.в}$ — время разгрузки ШСВ, включая длительность маневров и пауз, мин; $q_{н}$ — начальная масса руды в БП (масса руды, которая может разместиться в БП без перемещения ее донным конвейером), т.

Длина участка S^{II} рассчитывается по формуле:

$$S^{II} = S^{II}_{кр} - S^{I}_{кр}. \qquad (3)$$

Длина доставки $S^{II}_{кр}$ рассчитывается по формуле (см. рис. 3):

$$S^{II}_{кр} = 0{,}5V_{á2}\left(\frac{q_{á}}{P_{к}} - t_{р.п}\right), \qquad (4)$$

где $V_{\alpha 2}$ — скорость движения ШСВ при длине доставки более 25 м, м/мин; q_{α} — грузоподъемность ШСВ с учетом угла наклона очистной камеры, т; $t_{р.п}$ — продолжительность перегрузки руды из БП в ШСВ, мин.

Анализ приведенных выше расчетных зависимостей показывает, что по мере увеличения длины камеры, увеличивается плечо доставки руды от забоя до рудоспускной скважины, а влияние работы комбайна на производительность всего комплекса снижается и при достижении критических расстояний доставки, приоритетно влияющими на указанную производительность, становятся технические параметры шахтных самоходных вагонов, такие как грузоподъемность, скорость

движения и выполнения маневровых операций, время загрузки-разгрузки.

Длина участка S^{III} определяется выражением:

$$S^{III} = S_к - S_з - S^I - S^{II}. \quad (5)$$

Время отработки участка S^I очистной камеры, мин:

$$T^I = \frac{F_к ñ S^I}{P_к}, \quad (6)$$

где $F_к$ — площадь поперечного сечения исполнительного органа комбайна, м²; ρ — плотность калийной руды в массиве, т/м³.

Соответственно время отработки участка S^{II}, мин

$$T^{II} = \left(\frac{F_к ñ S^{II}}{q_á}\right)\left(\frac{q_á}{P_к} + 0{,}5 t_{р.п}\right). \quad (7)$$

Время отработки участка S^{III}, мин

$$T^{III} = \left(\frac{F_к ñ S^{III}}{q_á}\right)\left(\frac{2S^{II}_{кр} + S^{III}}{V_{á2}} + t_{р.в} + t_{р.п}\right). \quad (8)$$

Заключительным этапом проходческо-очистных работ является перемещение машин МКК к устью новой выработки и полная подготовка комплекса к следующей зарубке. При отгоне комбайна от забоя затраты времени на транспортные и монтажно-демонтажные операции (отгон вагона и БП, демонтаж отрезков вентиляционных труб, перекладка питающего кабеля и т.п.) незначительны и составляют не более 10–15%. Основные затраты времени при отгоне (85–90%) связаны с приведением исполнительных органов комбайна в транспортное положение и обратно, а также с подготовкой его к последующей зарубке. Эти операции осуществляются в конечных пунктах отгона и от длины камеры не зависят.

Длительность проходки (отработки) одного хода (камеры) с учетом временных интервалов на зарубку и отгонку комбайна из забоя составит определяется по формуле:

$$T = \frac{T^I + T^{II} + T^{III}}{k_{п.р} T_{см}} + T_з + T_о, \quad (9)$$

где $T_{см}$ — продолжительность смены, мин; $k_{п.р.}$ — коэффициент производительной работы комбайна при проходке выработки по времени; $T_з$ — продолжительность зарубки, мин; $T_о$ — временные затраты (потери) на отгон горного оборудования из забоя, мин [23].

Анализ приведенных зависимостей позволяет утверждать, что типовой алгоритмический расчет не учитывает в явном виде затраты времени на ряд технологических мероприятий, таких как проведение работ по креплению кровли и бурение дегазационных скважин, выполнение операций по наращиванию вентиляционного става и проч. Простои комбайна, функционирующего в составе МКК, связанные с отключением магистральных конвейеров и выполнением вспомогательных технологических операций, предлагается учитывать величиной коэффициента производительной работы при проходке очистной камеры по времени $k_{п.р}$. Значение $k_{п.р.}$ для комбайна (и вагона) при работе в составе МКК определяются экспериментально и рассчитывается по формуле:

$$k_{п.р.} = \frac{\Sigma T_{п.р.}}{T_{э.м.} - \Sigma T_{р.п.} - \Sigma T_{р.а.}} \quad (10)$$

где $\Sigma T_{п.р.}$ — время производительной работы комбайна (вагона) за анализируемый период $T_{э.м}$ эксплуатации на руднике, час.; $\Sigma T_{р.п.}$ и $\Sigma T_{р.а.}$ — время выполнения плановых и аварийных ремонтов, соответственно, в анализируемый период эксплуатации комбайна (ШСВ) на руднике, час.

Значение коэффициента $k_{п.р.} \in (0...1)$.

Оценка производительной работы машин МКК в условиях калийных рудников. Условия и методика эксперимента

Величины коэффициентов производительной работы $k_{п.р.}$ машин, входящих в состав МКК, определены по данным экспериментальных исследований, выполненных на одном из рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Методикой исследований предусматривалось использование регистратора параметров работы приводных двигателей «ВАТУР», установка которого осуществлялась в магнитные станции комбайна «Урал-20Р» и шахтного самоходного вагона 10ВС15 [22]. Регистратор «ВАТУР» обеспечивает измерение, первичную обработку и запись мгновенных значений мощностей приводных электродвигателей горных машин.

Для определения времени производительной работы машин механизированного комплекса были проанализированы полученные в ходе 72-часового опытного наблюдения данные. В ходе опытного исследования работа комбайна по отбойке руды от забоя осуществлялась контактом исполнительного органа машины с поверхностью забоя полным и неполным (режим «подрубка пласта») сечением. При этом в ходе подрубки, высота подрубаемого сечения забойной выработки составляла 1,5 м, а площадь поверхности забоя составляла 7,65 м^2. В границах анализа исследования также удалось дифференцированно выделить время выполнения производственных операций, в купе с сопоставлением настоящих временных данных с общим временем опытного наблюдения (72 ч) были определены коэффициенты производительной работы горных машин.

Результаты исследования

На рис. 4 графически отображена динамика изменения коэффициентов производительной работы рассматриваемых горных машин при отбойке руды от забоя полным сечением исполнительного органа комбайна с четырехчасовыми интервалами фиксаций значений времени.

Величины коэффициентов производительной работы в период функционирования комбайна и шахтного самоходного вагона на рассматриваемом участке очистной камеры в течение первых восьми часов составили $k_{п.р.к}$ = = 0,29 и $k_{п.р.в}$ = 0,26 соответственно, и, в большей мере подверглись влиянию технологических перерывов, связанных с остановками конвейерного транспорта на панельных и блоковых направлениях, временным отсутствием электроэнергии на добычном участке, а также сменой комбайновых бригад.

На начальных этапах проходки камеры значение коэффициента производительной работы ШСВ меньше, чем у комбайна. В таком случае производительность механизированного комбайнового комплекса будет ограничиваться производительностью проходческо-очистного комбайна.

Дальнейшая дистанция проходки, вплоть до окончания всего 72-часового рассматриваемого периода ведения проходческо-очистных работ, показывает, что коэффициент производительной работы ШСВ увеличивается по мере углубления очистной выработки, в отличии от коэффициента производительной работы комбайна, значение которого снижается. Локальные падения величины коэффициента производительной работы проходческо-очистного комбайна и самоходного вагона, наблюдаемые на некоторых участках в ходе отработки камеры, не связаны с увеличением плеча доставки по мере

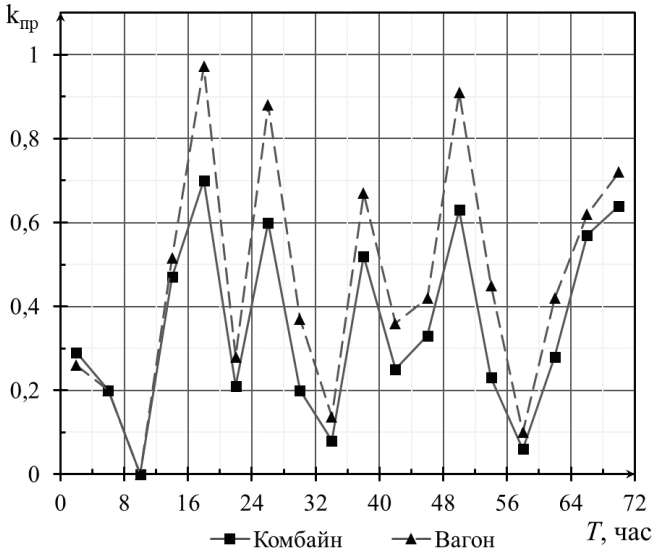

Рис. 4. Динамика производительности проходческо-добычного комбайна «Урал-20Р» и шахтного самоходного вагона 10ВС15: значения коэффициентов производительной работы горных машин при проходке выработки полным сечением исполнительного органа комбайна
Fig. 4. The dynamics of productivity of the Ural-20R tunneling and mining combine and the 10VS15 shuttle-wagon: the values of the coefficients of productive work of mining machines when sinking the output with a full cross-section of the combine's executive body

удаления забоя от устья очистной камеры, а обусловлены в основном влиянием внешних факторов.

Значения коэффициентов производительной работы комбайна и самоходного вагона при работе комбайнового комплекса вторым ходом (рис. 5), как и в режиме отбойки руды полным сечением исполнительного органа, на старте проходки имеют схожий характер изменения друг относительно друга: $k_{п.р.в}$ = 0,2 у шахтного самоходного вагона и комбайна $k_{п.р.к}$ = = 0,66 у комбайна. С отдалением забоя подрубаемого пласта от устья скважины, наблюдения показывают увеличение коэффициента производительной работы шахтного самоходного вагона относительно комбайна и составляют $k_{п.р.в}$ = 0,54 ... 0,75 и $k_{п.р.к}$ = = 0,48 ... 0,79 соответственно.

В сравнении с начальным этапом по отбойке руды неполным сечением исполнительного органа комбайна, последующий характеризуется довольно близкими друг к другу по величине коэффициентами производительной работы добычной и самоходной транспортной машин МКК. Данные корреляции значений по мере удаления забоя от устья камеры показывают, что ограничение производительности комбайнов в составе комплекса сопряжено с функционированием стационарного оборудования рудников. Аварийные и плановые остановки конвейерного транспорта главных (магистральных) панельных и блоковых направлений, а также, временные затраты, связанные с разгрузкой шахтных самоходных вагонов на конвейерные линии, являются основными ограничивающими факторами при работе МКК в режиме подрубки пласта.

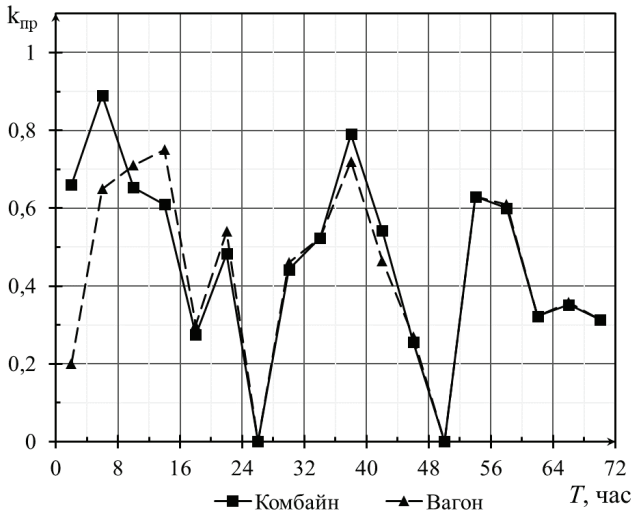

Рис. 5. Динамика производительности проходческо-добычного комбайна «Урал-20Р» и шахтного самоходного вагона 10ВС15: значения коэффициентов производительной работы горных машин при отработке камеры полным сечением исполнительного органа комбайна
Fig. 5. The dynamics of productivity of the Ural-20R tunneling and mining combine and the 10VS15 shuttle-wagon: the values of the coefficients of productive work of mining machines during working out of the chamber with a full cross-section of the combine's executive body

Технические решения, направленные на увеличение времени производительной работы машин МКК

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что наиболее существенным образом производительность МКК снижают технологические остановки (простои) магистрального конвейерного транспорта. Вторым влияющим фактором, существенно снижающим величину коэффициента производительной работы комбайна, является увеличение расстояния транспортирования руды от забоя до рудоспускной скважины. Последнее актуально только при работе комбайна полным забоем, так как при выполнении подрубки пласта коэффициенты производительной работы комбайна и вагона практически равны $k_{п.р.к} \approx k_{п.р.в}$.

Увеличение времени производительной работы машин МКК калийных рудников возможно посредством установки над рудоспускными скважинами бункеров-дозаторов, аккумулирующих массу руды, определяемую по формуле:

$$M_{р.б} = (15...20)M_{р.в}, \qquad (11)$$

где $M_{р.б}$ — масса руды, аккумулируемая в бункере-дозаторе, т; $M_{р.в}$ — грузоподъемность шахтного самоходного вагона, функционирующего в составе МКК, т.

Установка бункеров-дозаторов над рудоспускными скважинами позволит не только продолжать работу МКК при остановках магистральных конвейеров, но и обеспечит равномерную разгрузку руды с вагонов большой грузоподъемности (например, тридцатитонных ВС30), что снизит потери времени на разгрузку $t_{р.в}$ (см. формулы (2) и (8)). Внедрение бункеров-дозато-

ров в технологическую цепочку работы по доставке и разгрузке руды на линии конвейерного транспорта позволит, в том числе, снизить: влияние ограничивающей приемной способности рудоспускных скважин, а также повторно-кратковременную нагрузку на приводы скребковых конвейеров шахтных самоходных вагонов.

Учитывая тот факт, что наиболее частым техническим и технологическим остановкам подвержен конвейерный транспорт главных и магистральных направлений, а также принимая во внимание то, что перегрузка с панельного направления на главное (магистральное) осуществляется через бункеры-накопители (выработки, полученные путем нескольких ходов комбайна по высоте) использование бункеров-дозаторов более востребовано также в узлах перегрузки руды на блоковые и панельные конвейерные линии.

Решением, позволяющим снизить влияние длины доставки на величину коэффициента производительной работы комбайна $k_{п.р.к}$ при работе полным забоем, является использование второго вагона на второй половине отработки стандартной двухсотметровой очистной камеры.

Дополнительно следует обратить внимание, что второй вагон в составе МКК может оказывать положительное влияние на интенсификацию доставки руды при зарубке и разделке горловин камер. В виду целевого назначения операции зарубки — расположения в стартовой части выработки полного (традиционного) состава МКК, его работа на данном этапе осуществляется без бункера перегружателя. На этапе зарубки (разделки горловины камеры) во время отсутствия одного из вагонов на доставочно-разгрузочных работах второй самоходный вагон может быть активно задействован для приема отбиваемой комбайном руды. Разминовка двух вагонов на данном этапе будет осуществляться в выемочном штреке, который, как показывает практика — шире проходимых добычных забойных выработок в блоке, и что с учетом ранее отработанных камер, позволит разминуться шахтным транспортным средствам без проведения дополнительных ниш и вспомогательных выработок.

Реализация технологии доставки (в том числе и на основном промежутке проходческо-добычной камеры) с помощью двух ШСВ возможна посредством прямой перегрузки транспортируемой руды из одного шахтного самоходного вагона в другой.

Стоит также добавить, что дополнительный шахтный самоходный вагон может иметь аккумуляторный привод и включаться в состав МКК по мере необходимости увеличения производительности средств транспортирования руды в очистных камерах. Мобильность и адаптивность доставочных машин с аккумуляторным электроприводом позволяет, в отличие от традиционных вагонов с питанием тяговых приводов по сматываемому кабелю, оперативно перегонять вагон от одного места работы к другому. То есть такой шахтный вагон может попеременно использоваться в составе двух МКК при минимальном уровне синхронизации их работы.

В частности, введение второго шахтного самоходного вагона на аккумуляторном приводе в типовой состав МКК позволит повысить интенсификацию доставки отбитой рудной массы при отработке двумя комбайновыми комплексами сближенных продуктивных пластов в одном добычном блоке, например, при ведении очистных работ по пластам АБ и КрII с опережением ведения отработки по пласту АБ относительно пласта КрII.

Преимуществами эксплуатации аккумуляторных ШСВ можно выделить также отсутствие питающего кабеля, что позволяет минимизировать вероятность возникновения аварийных отказов при наезде другим вагоном на питающий кабель, а также исключает необходимость проектирования дополнительных трансформаторных подстанций для питания второго ШСВ типовой конструкции с кабельным барабаном.

Заключение

Решение задачи увеличения времени производительной работы МКК калийных рудников может быть получено на основе комплексного подхода при совершенствовании технологии организации проходческих и очистных работ, а также модернизации и повышения адаптивности добычных и транспортирующих машин комбайновых комплексов.

Анализ данных теоретических исследований, расчётов, выполненных по типовым методикам оценки производительности МКК, сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными показывает необходимость определения и учета факторов, негативно влияющих на эффективность работы комбайновых комплексов калийных рудников.

Приведенные в статье технические решения позволят снизить потери времени дорогостоящих горно-шахтных машин и повысить их производительность при отработке калийных пластов.

Вклад авторов

Лосев Д. А. — проведение экспериментальных исследований.

Грибов Д. С. — анализ результатов исследования и подготовка данных.

Шишлянников Д. И. — генерация идеи исследования, постановка задачи исследования.

Ситников Д. А. — написание текста статьи, выполнение работы по систематизации материала.

Картавцев В. К. — написание текста статьи, выполнение работы по систематизации материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cinna Seifi, Marco Schulze, Jürgen Zimmermann*. A new mathematical formulation for a potash-mine shift scheduling problem with a simultaneous assignment of machines and workers // European Journal of Operational Research. — 2021. — Vol. 292. — Issue 1. — pp. 27–42. — DOI 10.1016/j.ejor.2020.10.007.

2. *Prosper Chimunhu, Erkan Topal, Ajak Duany Ajak, Waqar Asad*. A review of machine learning applications for underground mine planning and scheduling // Resources Policy. — 2022. — Vol. 77. — 13 p. — DOI 10.1016/j.resourpol.2022.102693.

3. *Max Åstrand, Mikael Johansson, Alessandro Zanarini*. Underground mine scheduling of mobile machines using Constraint Programming and Large Neighborhood Search // Computers & Operations Research. — 2020. — Vol. 123. — 13 p. — DOI 10.1016/j.cor.2020.105036.

4. *Лыхин П. А.* О модели и проблемах калийного рудника будущего // Научно-технический журнал «Рудник будущего». — 2010. — № 3. — С. 44–47.

5. *Старков Л. И.* Развитие механизированной разработки калийных руд / Л. И. Старков, А. Н. Земсков, П. И. Кондрашев — Пермь: Изд-во ПГТУ, 2007. — 522 с.

6. *Назарычев А. Н.* Результаты исследования интергармоник систем тягового электропривода горного транспорта / А. Н. Назарычев, Т. Е. Минакова, М. В. Попов // Горная промышленность. — 2025. — № S1. — С. 68–72. — DOI 10.30686/1609-9192-2025-1S-68–72.

7. Оценка энергетического ресурса на основе диагностики технического состояния электромеханического оборудования минерально-сырьевого комплекса / Н. А. Королев, Ю. Л. Жуковский, А. Д. Булдыско, Г. Д. Баранов, *Чен П.* // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2024. — № 5. — С. 158–181. — DOI 10.25018/0236_1493_2024_5_0_158.

8. *Oskar Kowalewski, Piotr Śpiewanowski*. Stock market response to potash mine disasters // Journal of Commodity Markets. — 2020. — Vol. 20. — 22 p. — DOI 10.1016/j.jcomm.2020.100124.

9. *Fuqiang Ren, Tengyuan Song, Ke Ma, Murat Karakus*. Experimental investigation on the influence of weak interlayers on sandstone rockburst and associated microcracking mechanism // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2024. — Vol. 182. — 14 p. — DOI 10.1016/j.ijrmms.2024.105890.

10. Development of Methods to Improve Stability of Underground Structures Operation / D. A. Pervuhin, V. E. Trushnikov, S. E. Abramkin, V. S. Hloponina, N. A. Talanov // International Journal of Engineering. — 2025. — Vol. 38, No. 2. — P. 472–487. — DOI 10.5829/ije.2025.38.02b.20.

11. *Романов, В. А.* Контроль технического состояния шахтных самоходных вагонов в условиях калийных рудников / В. А. Романов // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. — 2018. — №1. — С. 429–432.

12. *Корогодин, А. С.* Оценка технического состояния опорных подшипников скольжения барабанной мельницы при эксплуатации в составе арктического комплекса горного оборудования/ А. С. Корогодин, С. Л. Иванов // Горная промышленность. — 2024. — № 6. — С. 144–151.

13. *Аникин А. С.* Внедрение частотно-регулируемого асинхронного электропривода на шахтный самоходный вагон В15К// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2009. — № 15. С. — 67–71.

14. *Веденеев И. А.* Новый самоходный вагон для ОАО «Уралкалий»// Научно-технический журнал «Горная промышленность». — 2005. — № 3. –С. 48–50.

15. Шахтные самоходные вагоны /Под ред. Г. К. Кущанова/. — М.: Машиностроение, 1975. — 232с.

16. *Бреннер В. А.* и др. Шахтные самоходные вагоны. — М.: Недра, 1972. –160с.

17. *Красников Ю. Д.*, *Солод С. В.*, *Хазанов Х. И.* Повышение надёжности горных выемочных машин. — М.: Недра, 1989. — 215 с.

18. Improving the shield machine cutter head for tunneling under the conditions of the metrostroy saint petersburg mines / D. A. Yungmeister, S. A. Lavrenko, A. I. Yacheikin, R. Y. Urazbakhtin // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2020. — Vol. 15, No. 11. — P. 1282–1288.

19. Моделирование процесса копания ковшом экскаватора породы при заданной величине стружки / Е. И. Шешукова, В. А. Плащинский, А. Э. Салимов, Д. А. Шибанов, С. Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2024. — № S21. — С. 3–12. — DOI 10.25018/0236_1493_2024_12_21_3.

20. *Липницкий, Н. А.* Создание имитационной модели работы подземных усреднительных складов руды рудника сложноструктурных соляных месторождений / Н. А. Липницкий, Р. Г. Огородников, Я. В. Устинова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2023. — № 1. — С. 142–158. — DOI 10.25018/0236_1493_2023_1_0_142.

21. *Штокман И. Г.* Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / И. Г. Штокман [и др.]. — М.: Недра, 1986. — 392 с.

22. *Шишлянников Д. И.* Совершенствование оборудования и режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников как энергоэффективных объектов

функционирования: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». — СПб., 2021. — 42 с.

23. *Романов В. А.* Повышение эффективности эксплуатации шахтных самоходных вагонов калийных рудников на основе данных комплексного контроля: авт. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. — Екатеринбург. — 2020. — 18 с.

24. *Старовойтов, Ю. В.* Анализ надежности работы оборудования в очистном забое / Ю. В. Старовойтов, А. А. Жевлаков, В. С. Старовойтов // Надежность машин технологических систем: Материалы междунар. научно-техн. конф. — Мн.: 2007. — Т. 1. — С. 127–130. ГИАБ

REFERENCES

1. Cinna Seifi, Marco Schulze, Jürgen Zimmermann, A new mathematical formulation for a potash-mine shift scheduling problem with a simultaneous assignment of machines and workers. *European Journal of Operational Research*. 2021. Vol. 292. Issue 1. pp. 27–42. DOI 10.1016/j.ejor.2020.10.007.

2. Prosper Chimunhu, Erkan Topal, Ajak Duany Ajak, Waqar Asad, A review of machine learning applications for underground mine planning and scheduling. *Resources Policy*. 2022. Vol. 77. 13 p. DOI 10.1016/j.resourpol.2022.102693.

3. Max Åstrand, Mikael Johansson, Alessandro Zanarini, Underground mine scheduling of mobile machines using Constraint Programming and Large Neighborhood Search. Computers & Operations Research. 2020. Vol. 123. 13 p. DOI 10.1016/j.cor.2020.105036.

4. Lyhin P. A. On the model and challenges of the potash mine of the future. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Rudnik budushchego». 2010. Vol. 3. pp. 44–47. [In Russ].

5. Starkov L. I., Zemskov A. N., Kondrashev P. I. Development of mechanized development of potash ores, Perm, PSTU, 2007, 522 p. [In Russ].

6. Nazarychev A. N., Minakova T. E., Popov M. V. Results of research of interharmonics of traction electric drive systems of mining transportation. *Russian Mining Industry*. 2025. Vol. S1. pp. 68–72. DOI 10.30686/1609-9192-2025-1S-68–72. [In Russ].

7. Korolev N. A., Zhukovskij Yu. L., Buldysko A. D., Baranov G. D., Chen P. Estimation of energy resource on the basis of diagnostics of technical condition of electromechanical equipment of the mineral and raw materials complex. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024. Vol. 5. pp. 158–181. DOI 10.25018/0236_1493_2024_5_0_158. [In Russ].

8. Oskar Kowalewski, Piotr Śpiewanowski, Stock market response to potash mine disasters. Journal of Commodity Markets. 2020. Vol. 20. 22 p. DOI 10.1016/j.jcomm.2020.100124.

9. Fuqiang Ren, Tengyuan Song, Ke Ma, Murat Karakus, Experimental investigation on the influence of weak interlayers on sandstone rockburst and associated microcracking mechanism. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2024. Vol. 182. 14 p. DOI 10.1016/j.ijrmms.2024.105890.

10. Pervuhin D. A., Trushnikov V. E., Abramkin S. E., Hloponina V. S., Talanov N. A. Development of Methods to Improve Stability of Underground Structures Operation. *International Journal of Engineering*. 2025. Vol. 38, no. 2. pp. 472–487. DOI 10.5829/ije.2025.38.02b.20.

11. Romanov, V. A. Control of the technical condition of mine self-propelled railcars in the conditions of potash mines. *Problemy razrabotki mestorozhdenij uglevodorodnyh i rudnyh poleznyh iskopaemyh*. 2018. Vol. 1. pp. 429–432. [In Russ].

12. Korogodin, A. S. Assessment of the technical condition of the sliding bearings of a drum mill during operation as part of the Arctic mining equipment complex. A. S. Korogodin, S. L. Ivanov. *Mining industry*. 2024. no. 6. pp. 144–151. [In Russ].

13. Anikin A. S. Implementation of frequency-controlled asynchronous electric drive on mine self-propelled car B15K. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2009. Vol 15. pp. 67–71. [In Russ].

14. Vedeneev I. A. New self-propelled railcar for Uralkali JSC. *Russian Mining Industry*. 2005. Vol. 3. pp. 48–50. [In Russ].

15. Kushchanov G. K. Mine self-propelled wagons, Moscow, Mashinostroenie, 1975, 232 p. [In Russ].

16. Brenner V. A. [and all]. Mine self-propelled wagons, Moscow, Nedra, 1972, 160 p. [In Russ].

17. Krasnikov Yu.D., Solod S. V., Hazanov H. I. Enhancing the reliability of mining excavation machines, Moscow, Nedra, 1989, 215 p. [In Russ].

18. Yungmeister D. A., Lavrenko S. A., Yacheikin A. I., Urazbakhtin R. Y. Improving the shield machine cutter head for tunneling under the conditions of the metrostroy saint petersburg mines. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15. no. 11. pp. 1282–1288.

19. Sheshukova E. I., Plashchinskij V. A., Salimov A. E., Shibanov D. A., Ivanov S. L. Modeling of the process of digging by excavator bucket of rock at a given chip size. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024. Vol. S21. pp. 3–12. DOI 10.25018/0236_1493_2024_12_21_3. [In Russ].

20. Lipnickij N. A., Ogorodnikov R. G., Ustinova Ya. V. Creation of a simulation model of the operation of underground averaging stockpiles of ore from the mine of complex salt deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023. Vol 1. pp. 142–158. DOI 10.25018/0236_1493_2023_1_0_142. [In Russ].

21. Shtokman I. G. Design and construction of mining machines and complexes Moscow, Nedra, 1986. 392 p. [In Russ].

22. Shishlyannikov D. I. Enhancement of equipment and operating modes of tunneling and cleaning combines at potash mines as energy-efficient operating facilities. Abstract of Ph. D. thesis, Moscow, PNRPU, 2021, 42 p. [In Russ].

23. Romanov V. A. Improving the efficiency of mine self-propelled wagons of potash mines based on integrated control data: author's dissertation. ... Candidate of Technical Sciences: 05.05.06. Yekaterinburg. 2020. 18 p [In Russ].

24. Starovojtov Yu. V., Zhevlakov A. A., Starovojtov V. S. Analiz nadezhnosti raboty oborudovaniya v ochistnom zaboe. Analyzing the reliability of equipment operation in the mine face, Materials of the international scientific and technical conference "Reliability of machines of technological systems". Minsk, 2007. Vol. 1. pp. 127–130. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лосев Дмитрий Александрович — руководитель группы горного отдела АО «ВНИИ Галургии», 190103, г. Санкт-Петербург, ул. 10-я Красноармейская, д. 22, литера А, e-mail: transporteur@inbox.ru;

Грибов Дмитрий Сергеевич — начальник горного отдела АО «ВНИИ Галургии», 190103, г. Санкт-Петербург, ул. 10-я Красноармейская, д. 22, литера А, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru;

Шишлянников Дмитрий Игоревич — докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Горная электромеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dish844@gmail.com;

Ситников Дмитрий Александрович — лаборант кафедры «Горная электромеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: stdm2023@mail.ru;

Картавцев Вадим Кириллович — ассистент кафедры «Горная электромеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vkartavtsev@yandex.ru.
Для контактов: *Лосев Д. А.*, e-mail: transporteur@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Losev D. A., group leader of the mining department of JSC «VNII Gallurgy», 190103, St. Petersburg, 22, 10th Krasnoarmeyskaya St., literature A, e-mail: transporteur@inbox.ru;
Gribov D. S., head of the Mining Department of JSC «VNII Gallurgy», 190103, St. Petersburg, 22, 10th Krasnoarmeyskaya St., literature A, e-mail: dmitriy.gribov@mail.ru;
Shishlyannikov D. I., professor, Department of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Komsomolsky prospekt, 29, e-mail: dish844@gmail.com;
Sitnikov D. I., laboratory assistant, Department of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Komsomolsky prospekt, 29, e-mail: stdm2023@mail.ru;
Kartavcev V. K., assistant, Department of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Komsomolsky prospekt, 29, e-mail: vkartavtsev@yandex.ru.
Corresponding author: *Losev D. A.*, e-mail: transporteur@inbox.ru

Получена редакцией 02.10.2025; получена после рецензии 17.11.2025; принята к печати 24.11.25.
Received by the editors 02.10.2025; received after the review 17.11.2025; accepted for printing 24.11.25.