

Бункерные системы комплексов комбинированного транспорта в карьерах

Юдин А. В.^{1*}, Попов А. Г.¹, Шестаков В. С.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: gpt2004@mail.ru

Реферат

Введение. Перегрузочные системы при комбинированном транспорте оказывают существенное влияние на себестоимость добычи полезных ископаемых открытым способом. При отработке глубоких карьеров к перегрузочным устройствам и отдельным их компонентам предъявляются повышенные требования.

Цель работы. Повышение эффективности транспортных систем для глубоких карьеров за счет применения подсистемы «бункер–питатель» с рациональными параметрами.

Методология. Математическое и физическое моделирование технологического процесса подсистемы «бункер–вибропитатель».

Результаты. В статье показано, что бункерные системы, оснащенные вибрационными питателями-грохотами с совмещенными технологическими функциями наиболее полно соответствуют требованиям перегрузочных систем при транспортировании взорванной горной массы из бункеров. Приведены результаты анализа по влиянию питателей-грохотов на себестоимость добычи полезного ископаемого. Проведены экспериментальные исследования по определению рациональной геометрии системы «бункер-вибропитатель», исследованы основные параметры вибровыпуска, оценены скоростные свойства приемных элементов бункеров.

Выводы. В условиях карьерных перегрузочных систем параметры бункеров следует рассматривать в зависимости от назначения и структуры транспортной системы, из условия режимов поступления и отгрузки горной массы. Карьерным перегрузочным системам наиболее полно соответствуют бункеры в форме «перевернутого обелиска», оснащенные вибрационными питателями-грохотами с совмещенными технологическими функциями. Приведены результаты экспериментальных исследований и промышленных испытаний вибровыпуска взорванной горной массы. К основным параметрам бункеров карьерных перегрузочных систем относятся: производительность; геометрические параметры и размеры выпускных отверстий; вместимость бункера; скоростные свойства движения горной массы.

Ключевые слова: перегрузочные системы; бункер; производительность; геометрия бункера; выпускное отверстие; скорость движения; горная масса; вибропитатель-грохот.

Введение. В условиях глубоких карьеров бункеры не предназначены компенсировать длительные простои сопрягаемых средств транспорта по организационным причинам, их параметры следует рассматривать из условия часовых и минутных режимов поступления и отгрузки горной массы. Параметры бункера должны определяться с учетом характеристик используемого транспорта. Целью исследований является обоснование рациональных параметров бункерных систем.

Методика исследований. По своему назначению бункеры подразделяются на стационарные, переносные, передвижные, самоходные [1–4]. Бункерные устройства являются составной частью любой перегрузочной системы.

В условиях карьеров, при применении стационарных передвижных перегрузочных систем (ПС) бункеры не предназначены выполнять роль аккумулирующих складов, они также не предназначены компенсировать длительные простои транспорта по организационным причинам [5–7]. В условиях ПС назначение

бункеров можно рассматривать из условия сменных часовых и минутных режимов поступления и извлечения горной массы (ГМ).

В зависимости от характера движения ГМ различаются бункеры со сплошным (массовым, гидравлическим) истечением, нормальным (прерывистым) видом истечения и с принудительным извлечением ГМ из бункера посредством питателей [8, 9]. В технической литературе наиболее полно описаны закономерности движения сыпучих материалов для условий их свободного выпуска в подземных технологиях. Рекомендованы критерии оценки процесса: критерий сыпучести, коэффициент проходимости. В частности, размеры предельного сводаобразующего отверстия, при котором протекает устойчивый гравитационный выпуск крупнокусковой ГМ, характеризуются величиной коэффициента проходимости от 4,0 до 5,5 [9]. Из приведенного соотношения следует, что гравитационный выпуск в условиях ПС карьеров рекомендован быть не может, так как потребуются сооружение бункеров с размерами выпускных отверстий 4,8–6,6 м, а это не позволяет сопрягать бункеры с технологическим оборудованием ПС и средствами подвижного состава карьерного транспорта.

Таблица 1. Исходные условия применения питателей и питателей-грохотов
Table 1. Reference conditions of feeders and feeder-screens use

Показатель условий эксплуатации	Пластинчатый питатель	Качающийся питатель	Валковый питатель-грохот с эллиптическими валками	Вибрационный питатель-грохот	
Производительность по исходному продукту, т/ч	1000 (2000)	До 1000	До 3000	До 5000	
Эффективность грохочения, %	Нет	Нет	До 70	До 95	
Средняя металлоемкость, т/(т/ч)	0,040	0,009	0,012	0,007	
Средняя энергоемкость, (кВт/ч)/т	0,150	0,015	0,020	0,011	
Наибольший размер принимаемого куска, м	До 1,2	До 1,0	До 1,0	До 1,2	
Крупность исходного продукта	Более 1 м	+	–	0	+
	Менее 1 м	+	0	+	+
Показатель подготовленности ГМ к транспортированию ленточным конвейером	Более 0,8	–	–	0	+
	0,7–0,8	–	–	0	+
	0,5–0,7	–	–	0	+
	Менее 0,5	+	+	–	+

(+) – рекомендуется к применению; (0) – ограниченное применение; (–) – не рекомендуется к применению.

Вопрос применения бункеров для приема и выпуска взорванной ГМ, а также вопросы изучения процесса истечения материала путем принудительного выпуска посредством питателей возник с развитием процессов открытых разработок, с ростом грузопотоков ГМ и трудностью управления ими. Бункеры (полубункеры) с принудительным выпуском ГМ получили основное применение на обогатительных фабриках в составе рудных комплексов. В качестве механизмов для извлечения взорванной ГМ из бункера используются различные питатели: качающиеся, пластинчатые, скребковые, вибрационные и др.

Проблема правильной разгрузки ГМ из бункеров с помощью питателей должна решаться комплексно путем рационального выбора типа, конструкции и параметров подсистемы *бункер–питатель* с учетом физико-механических свойств ГМ и условий эксплуатации. В табл. 1 дана сопоставительная оценка исходных условий различных питателей и грохотов на основании анализа конструкций и опыта работы машин на отечественных и зарубежных предприятиях [10–12].

Сравнительная оценка ПС показала, что по основным показателям вибрационные питатели-грохоты наиболее полно отвечают требованиям создания ПС комбинированного транспорта. Наиболее эффективными являются устройства, структура и загрузочный модуль которых формируются на основе вибропроцессов, реализуемых одной вибротранспортной машиной (ВТМ) с совмещенными функциями (функции питателя и грохота объединены в одной машине – питателе-грохоте). Вибропитатель-грохот устанавливается непосредственно под бункером и работает под завалом.

По данным зарубежной печати [8], совершенство конструкции бункерных питателей можно оценить по удельным затратам на выпуск 100 т горной массы и себестоимости выпуска 1 т горной массы в зависимости от производительности питателей. Проведено сравнение разных питателей. Наибольшей энергоемкостью обладают пластинчатые питатели, наименьшей – ленточные и вибрационные. Вибрационные питатели определяют также низкую себестоимость ГМ при выпуске ее из бункера.

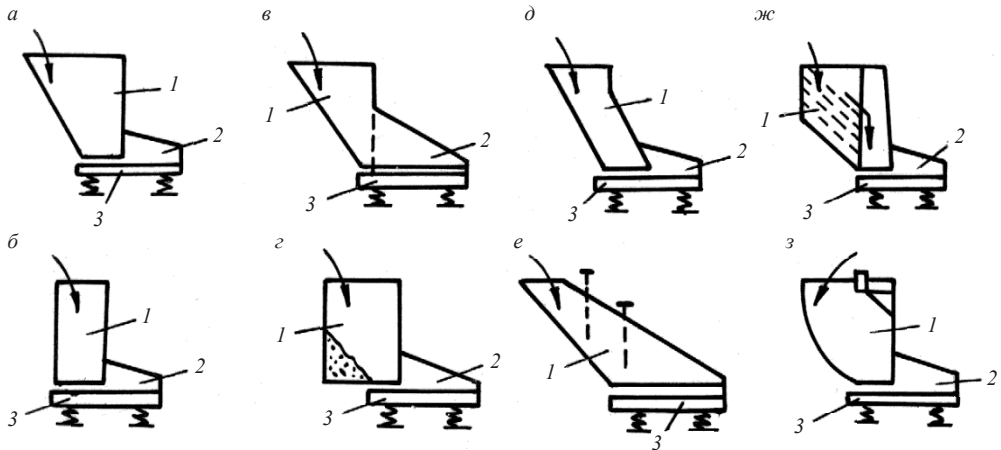


Рис. 1. Возможные конфигурации бункеров в составе перегрузочных систем:

1 – бункер; 2 – борт; 3 – питатель

Fig. 1. Possible configurations of bunkers as a part of transshipment systems:

1 – bunker; 2 – edge; 3 – feeder

На практике используются различные конфигурации бункеров для выпуска насыпных грузов. Для условий ПС комбинированного транспорта могут быть использованы формы бункеров, приведенные на рис. 1. Оригинальные конструкции бункеров запатентованы в Чехии (схемы ж и з) [8]. Бункеры имеют сложную конструкцию. Специальных системных исследований, связанных с конструктивным исполнением и формой приемных бункеров ПС комбинированного транспорта, в отечественной практике не проводилось. Основные исследования посвящены выбору параметров бункеров для мелкофракционных материалов, и их результаты не могут быть распространены на бункеры для карьерных ПС. По материалам проектов и обзоров можно сделать заключение, что чаще в ПС комбинированного транспорта используются формы бункеров по схемам а–е на рис. 1.

Основной вклад в исследования по вибровыпуску ГМ внесен отечественными учеными, в основном применительно к технологии подземных разработок. Установлено, что при вибровыпуске ГМ из бункера рядом с выпускным отверстием происходит изменение силового поля. При включении в работу питатель способствует ликвидации концентрации напряжений и уменьшает размер наибольшего сводаобразующего отверстия, так как кроме сил первоначального сопротивления

сдвигу появляются дополнительные силы, сдвигающие ГМ в направлении выпускного отверстия [10–12]. Вибрация придает некоторому объему ГМ подвижность и облегчает выпуск. Этим во многом объясняется то, что коэффициент проходимости при вибровыпуске уменьшается в 1,5–2,0 раза.

Технология вибровыпуска при подземных работах имеет ограниченные грузопотоки, уменьшенный кондиционный кусок горной массы. Опыт подземного вибровыпуска не может быть перенесен в практику проектирования бункеров в условиях карьеров. Необходимы дополнительные исследования.

Сформулируем основные требования, предъявляемые к подсистеме *бункер–питатель* в составе ПС:

- обеспечение условий и параметров сопряжения средств подвижного состава сборочного (СТ) и магистрального (МТ) транспорта;
- обеспечение высокой пропускной способности с возможностью ликвидации или самоликвидации устойчивых сводов в бункере при выпуске взорванной ГМ;
- обеспечение бесперебойной работы ПС и сопрягаемых средств транспорта в часовом режиме эксплуатации;
- обеспечение безударной передачи ГМ на рабочие органы питателей.

Таблица 2. Параметры эксперимента
Table 2. Experimental parameters

Варьируемый параметр	Пределы изменения	Контролируемый параметр
Высота выпускного отверстия h , м	0,12–0,24	Производительность системы бункер–вибропитатель Q , кг/с
Угол наклона приемной стенки бункера α_1 , град	60–90	Полное число зависаний и сводов n , шт.
Угол наклона боковой стенки α_2 , град	60–90	Число устойчивых сводов n' , шт.
Величина заглубления l , м	0,12–0,30	Удельное число зависаний n_0 , кг ⁻¹
Угол наклона вибропитателя α , град	0–7,5	Давление материала на вибропитатель P_0 , отн. ед.
Частота колебаний вибропитателя ω , с ⁻¹	До 167	Амплитуда колебаний рабочего органа вибропитателя A , мм
Коэффициент режима работы вибропитателя Γ	1,1–1,5	Минимальное расстояние от приемной стенки до передней стенки бункера l' , м

Моделирование вибровыпуска в системе «бункер–вибропитатель». Анализ исследований и практического опыта по выпуску взорванных скальных пород и руд из бункеров в карьерных условиях позволяет сделать следующее заключение: в карьерах не накоплен достаточный опыт эксплуатации системы *бункер–питатель*; выпуск ГМ с размерами кусков более 1 м весьма затруднен; система *бункер–вибропитатель* наиболее полно отвечает требованиям ПС комбинированного транспорта; в процессе выпуска взорванной ГМ из бункеров необходимо учитывать следующие явления: сводообразование, формирование «мертвых зон», сегрегацию, ударные нагрузки, пылеобразование; на эффективность вибровыпуска оказывают влияние: размеры выпускного отверстия, величина заглубления питателя в бункер, угол наклона питателя, геометрия бункера и параметры его сопряжения с питателем, вместимость бункера; с целью уточнения методики расчета параметров бункеров ПС необходимо провести дополнительные исследования системы *бункер–вибропитатель*.

Первый опыт выпуска взорванной скальной ГМ был получен на опытном участке карьера Гайского ГОКа. Было установлено, что значение коэффициента проходимости при вибровыпуске можно снизить до величины 2,0–2,1. При вы-

пуске ГМ из бункера пластинчатым питателем тяжелого типа установлено, что при размере выпускного отверстия 2×2 м выпуск прекращался из-за частого образования устойчивых сводов. Для ликвидации этого недостатка высота отверстия бункера была увеличена до 3,5 м.

Интересен опыт вибровыпуска руды на участке циклично-поточной технологии (ЦПТ) Качканарского ГОКа. Сопряжение вибропитателя с бункером было выполнено в виде спускного желоба. Испытания подтвердили, что необходимый размер выпускного отверстия должен быть более размера основания устойчивого свода в бункере.

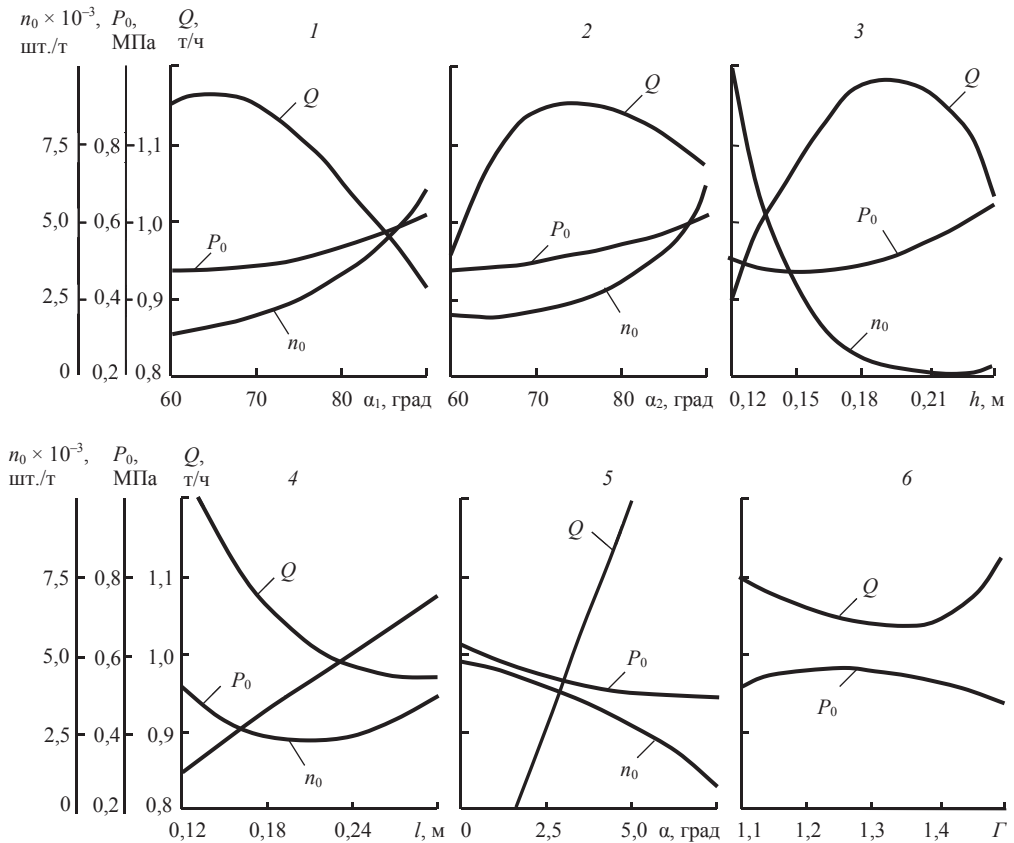


Рис. 2. Изменение эксплуатационных показателей вибровыпуска в системе бункер–вибропитатель в зависимости от геометрии системы:

1 и 2 – углов α_1 и α_2 ; 3 – высоты выпускного отверстия h ; 4 – глубины внедрения l ; 5 – угла наклона питателя; 6 – коэффициента режима Γ

Fig. 2. Changes in performance indicators of the discharge in bunker–vibrating feeder system depending on the system's geometry:

1 and 2 – angles α_1 and α_2 ; 3 – the height of the outlet opening h ; 4 – depth of penetration l ; 5 – inclination angle of a feeder; 6 – mode coefficient Γ

Экспериментальные исследования были выполнены на стенде подсистемы бункер–вибропитатель с линейным масштаб моделирования 1:10. Горная масса была смоделирована по численной характеристике куска $l : a : b = 1 : 0,67 : 0,43$, а фракционный состав подбирался как усредненный для трудно-, средне- и легко-взрываемой ГМ. Значения варьируемых и контролируемых параметров при эксперименте приведены в табл. 2.

Цель исследования – определение рациональной геометрии системы бункер–вибропитатель, позволяющей проводить интенсивный выпуск ГМ в различных

горнотехнических условиях.

На рис. 2 приведены результаты исследований в системе *бункер–вибропитатель*, соответствующей форме бункера на рис. 1, а. Анализ результатов исследований показывает, что выпуск крупнокускового материала из бункера носит стохастический характер.

Производительность системы *бункер–вибропитатель* Q характеризует всю совокупность условий истечения горной массы. В процессе эксперимента установлено, что при выпуске горной массы над выпускным отверстием образуются своды и зависания, в результате чего происходит частичное или полное прекращение выпуска.

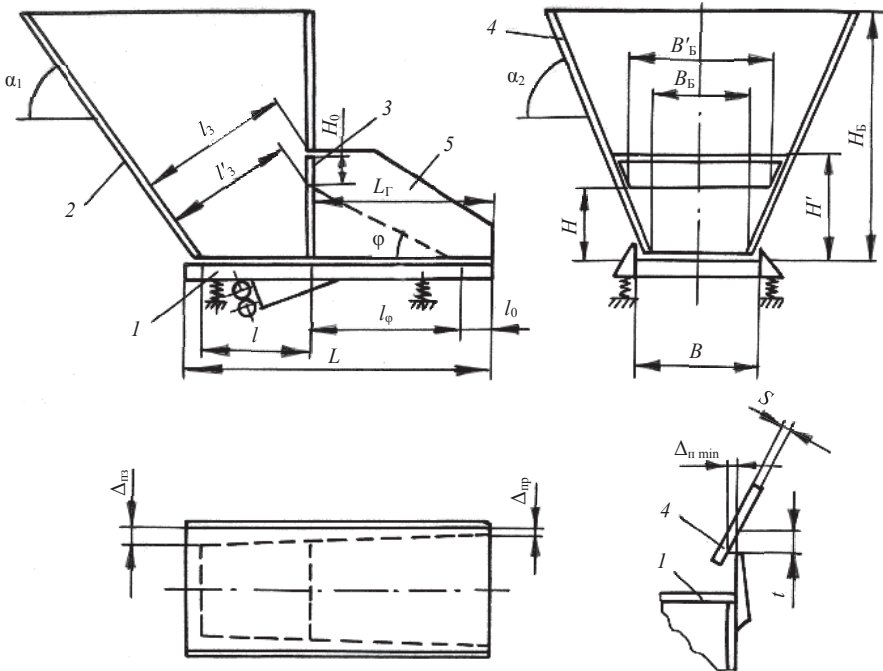


Рис. 3. Схема к определению геометрических параметров в системе *бункер–вибропитатель*

Fig. 3. Geometric parameters determination chart in *bunker–vibrating feeder system*

При изменении углов наклона приемной и боковой стенок производительность системы *бункер–вибропитатель* имеет область максимальных значений при величинах углов $60^\circ\text{--}70^\circ$ и $75^\circ\text{--}80^\circ$ соответственно (рис. 2, графики 1 и 2, кривые Q); удельное число зависаний (кривые n_0) минимально при величинах углов $60^\circ\text{--}65^\circ$ и $65^\circ\text{--}75^\circ$ соответственно; давление на вибропитатель (кривые P_0) имеет минимальное значение при величинах углов $60^\circ\text{--}70^\circ$.

При изменении высоты выпускного отверстия h производительность системы изменяется по квадратическому закону и в области $0,20\text{--}0,21$ м достигает максимальных значений (график 3, кривая Q), изменение давления на вибропитатель обусловлено перераспределением горной массы между стенками бункера и вибропитателя. С увеличением h это приводит к увеличению давления (кривая P_0), снижению вероятности сводообразования и прочности сводов и, как следствие, резкому уменьшению числа устойчивых сводов (кривая n_0). Однако при $h > 0,21$ м происходит снижение производительности, что может быть связано с тем, что давление горной массы на питатель приводит к снижению амплитуды колебаний РОВ. Из графика (кривая n_0) видно, что с ростом h не происходит полной ликви-

дации сводов, требуются дополнительные меры для их устранения. В связи с этим можно предложить два пути полной ликвидации сводов: увеличение высоты выпускного отверстия ($h > 0,24$ м) и, как следствие, снижение производительности;

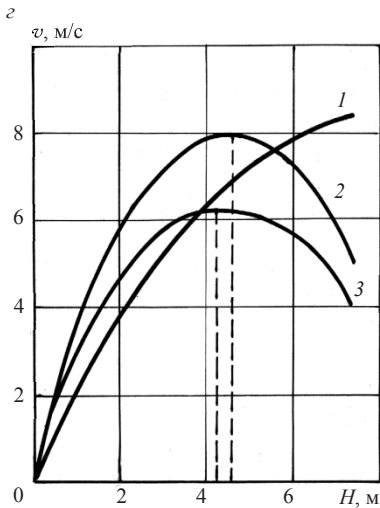
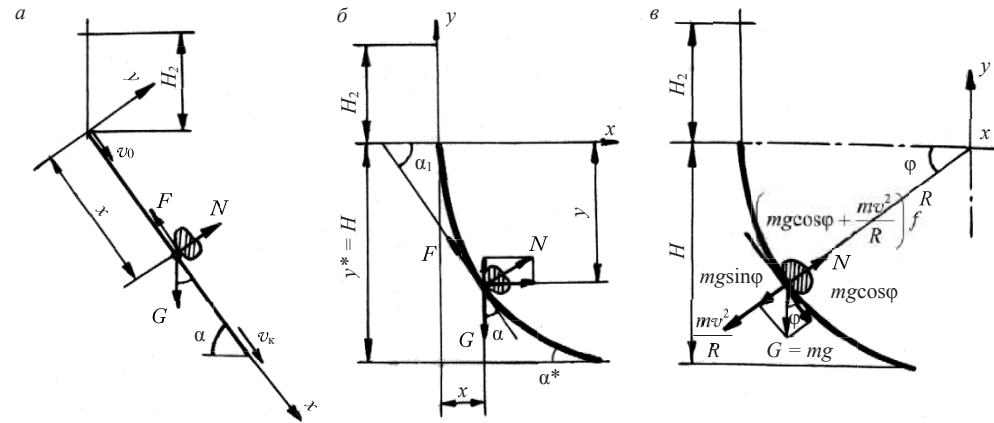


Рис. 4. К расчету скоростных свойств приемной стенки бункера: а, б, в – расчетные схемы применительно к прямолинейной, параболической и цилиндрической стенкам бункера; г – сравнительные скорости движения ГМ в зависимости от высоты бункера; 1 – бункер с прямолинейной приемной стенкой; 2 – бункер с параболической приемной стенкой; 3 – бункер с приемной стенкой в виде дуги окружности

Fig. 4. To the calculation of velocity properties of a bunker's receiving wall: а, б, в – calculation schemes for rectilinear, parabolic, and cylindrical walls of a bunker; г – comparative speeds of rock mass movement depending on the height of a bunker; 1 – a bunker with a rectilinear wall; 2 – a bunker with a parabolic wall; 3 – a bunker with a wall of a circular arc shape

при высоте выпускного отверстия, обеспечивающей максимальную производительность, оснастить систему регулируемым устройством, позволяющим изменить высоту h только в момент образования свода, а после разрушения его автоматически восстанавливать заданную высоту выпускного отверстия.

Величина заглупления питателя в бункер при работе под завалом существенно влияет на производительность системы в целом. Чем меньше l , тем выше производительность (график 4, кривая Q). Наибольшая производительность должна обеспечиваться при $l = 0$ (рис. 1, схема в). Однако в этом случае резко возрастает вероятность сводообразования, так как снижается кратчайшее расстояние между верхним краем выпускного отверстия и приемной стенкой (хорда предполагаемой дуги свода l'). Размер этой зоны должен быть таким, чтобы, как минимум, обеспечивать беспрепятственное прохождение максимального куска загружаемой ГМ. Таким образом, при разработке системы бункер-вибропитатель размер l' должен выбираться в качестве основного наряду с параметрами h и l . Для условий описываемого эксперимента связь между основными параметрами h, l, l', α_1 выражается зависимостью

$$l' = h \cos \alpha_1 + l \sin \alpha_1.$$

Угол наклона вибропитателя оказывает пропорциональное влияние на производительность системы бункер-вибропитатель (график 5, кривая Q). Удельное число заваливаний и давление ГМ на вибропитатель с увеличением угла наклона питателя снижается.

В качестве исследуемых для сравнения были выбраны три формы геометрии бункера в соответствии со схемами *a*, *b* и *d* на рис. 1. Экспериментом установлено, что при выпуске взорванной ГМ наиболее производительной является схема с бункером в форме перевернутого обелиска (рис. 1, схема *a*), менее производительной является схема *d*. Для всех сравниваемых форм бункеров максимум производительности отмечается при величине угла наклона приемной стенки около 65° . При равной высоте бункеров по схемам *a* и *d* вместимость первых в 2 раза выше. Установлено также, что при одинаковой форме бункера вибровыпуск скальных пород ($\gamma_n = 1,8 \text{ т/м}^3$) более производительен, чем железной руды ($\gamma_n = 2,5 \text{ т/м}^3$).

В результате проведенных экспериментов установлены рациональные параметры систем *бункер–вибропитатель*. Для скальных пород: $\alpha_1 = 65^\circ\text{--}70^\circ$; $\alpha_2 = 60^\circ\text{--}65^\circ$; $l = 1,8\text{--}2,0 \text{ м}$; $h = 1,8\text{--}2,0 \text{ м}$; для руды: $\alpha_1 = 60^\circ\text{--}65^\circ$; $\alpha_2 = 60^\circ$; $l = 1,5\text{--}1,8 \text{ м}$; $h = 2,1\text{--}2,4 \text{ м}$. На рис. 3 приведена конфигурация рационального сопряжения системы *бункер–вибропитатель*, которую можно использовать как типовое техническое решение при проектировании ПС комбинированного транспорта. На рисунке приведена схема с одним вибропитателем, где 1 – вибропитатель (вибропитатель-грохот типа ГПТ); 2 – приемная стенка; 3 – отклоняющееся (подвижное) устройство с приводом для ликвидации зависаний ГМ; 4 – боковая стенка бункера; 5 – наклонный борт; α_1 – угол наклона приемной стенки бункера; l_3 – расстояние от приемной стенки до кромки выпускного окна; l'_3 – расстояние от приемной стенки до кромки отклоняющего устройства; H_0 – высота отклоняющего устройства; L_Γ – длина наклонной бортовины; l – глубина внедрения питателя в бункер; φ – угол естественного откоса горной массы; l_ϕ – длина развала горной массы на вибропитателе; l_0 – длина резервной зоны на вибропитателе; L – длина вибропитателя; α_2 – угол наклона боковых стенок бункера; B'_B – ширина выпускного отверстия; B_B – ширина бункера при примыкании к питателю; H_B – высота бункера; H, H' – высота от выпускного отверстия; B – ширина вибропитателя; $\Delta_{\text{пз}}, \Delta_{\text{пр}}$ – зазор между шириной бункера и шириной вибропитателя в загрузочной и разгрузочных частях; $t, \Delta_{\text{п min}}$ – вертикальный и горизонтальный зазор между бортовинной и бортом вибропитателя; S – толщина стенок бортовины.

Приведем некоторые практические рекомендации по параметрам сопряжения в системе *бункер–вибропитатель* в соответствии с рис. 3:

$$H = (1,6 - 1,7)D_{\text{max}}; \quad l = (1,8 - 2,0)D_{\text{max}}; \quad l_3 = H \cos \alpha_1 + l \sin \alpha_1;$$

$$L = l + l_\phi + l_0 = 1,65D_{\text{max}}(1,75 + \text{ctg } \varphi); \quad L_\Gamma = (0,4 - 0,6)L; \quad B_B = B - 2(\Delta_{\text{п}} + S).$$

Исследование движения горной массы вдоль приемной стенки бункера.

Для выполнения прочностных расчетов предварительно должны быть определены действующие усилия [7]. Металлические бункеры переносных ПС при их загрузке автосамосвалами испытывают значительные динамические нагрузки. Наибольшую опасность представляет загрузка порожнего бункера при опережающем воздействии одиночного крупного куска. При этом куски после соударения скользят по приемной стенке, набирают скорость и всю набранную энергию передают рабочему органу вибропитателя.

Рассмотрим несколько профилей приемных стенок бункера и дадим оценку их скоростным качествам (рис. 4).

С целью снижения динамических нагрузок необходимо, чтобы в момент соприкосновения дискретной массы со стенкой бункера давление его на стенку было близко к нулю и постепенно, по мере движения, увеличивалось. Таким условиям движения наиболее полно удовлетворяют параболические поверхности. Профиль приемной стенки в таком случае может быть выражен уравнением (рис. 4, б)

$$y^2 = 2px,$$

где x, y – текущие координаты; p – фокальный параметр параболы.

Движение крупнокускового материала по приемной стенке бункера можно рассматривать как скольжение несвободной материальной частицы с разной скоростью по шероховатой поверхности. При этом поток не имеет сплошности и взаимодействия. Дифференциальные уравнения относительного скольжения материала в проекциях на естественные оси координат в данной точке стенки имеют вид:

$$m \frac{dv}{dt} = G \cos \alpha - F = G \cos \alpha - fN;$$

$$m \frac{v^2}{\delta} = N - G \sin \alpha,$$

где G – сила тяжести движущегося крупнокускового материала; N – нормальная реакция; F – сила трения; δ – радиус кривизны приемной стенки; v – скорость скольжения материала.

Опуская подробности решения системы [9], запишем выражение для определения скорости ГМ перед поступлением ее на рабочий орган вибропитателя:

$$v_k = \sqrt{2gH_2 e^{-2\alpha f} + pg(\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}^2 \alpha) + 1,5pe^{-2\alpha f} (K_1 - 2K_2)},$$

где $K_1 = g \ln \frac{1+\alpha}{1-\alpha}$; $K_2 = g \ln(1-\alpha^2)$; $p = H \operatorname{tg} \alpha^*$.

Кинетическая энергия удара при входе материала в бункер в этом случае практически равна нулю.

Если приемная стенка бункера выполнена прямолинейно (рис. 4, а), то уравнения движения ГМ по наклонной плоскости имеют вид:

$$m\ddot{x} = G \sin \alpha - fG \cos \alpha = G(\sin \alpha - f \cos \alpha);$$

$$m\ddot{y} = 0.$$

Кусок будет двигаться с ускорением в случае, если

$$\ddot{x} = g(\sin \alpha - f \cos \alpha) > 0 \text{ или } \operatorname{tg} \alpha > f,$$

где f – коэффициент трения ГМ о стенку бункера.

Скорость ГМ перед поступлением ее на рабочий орган вибропитателя определяется по формуле А. О. Спиваковского:

$$v_k = \sqrt{2g(1 - f \operatorname{ctg} \alpha)H + v_0^2}; \quad v_0 = \sqrt{2gh} \sin \alpha,$$

где H – высота бункера.

Рассмотрим приемную стенку бункера, выполненную по дуге окружности. Такие поверхности проще в изготовлении и достаточно безударны. Равновесие

материальной частицы на поверхности описывается дифференциальными уравнениями в проекциях на естественные оси координат (рис. 4, в)

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 v}{dt^2} &= G \cos \varphi - F = G \cos \varphi - fN; \\ m \frac{v^2}{R} &= N - G \sin \varphi. \end{aligned} \quad (1)$$

Опуская решение системы (1), запишем в окончательном виде выражение для определения скорости ГМ:

$$v_k = \sqrt{\frac{2g}{1 + 4f^2} (e^{-2f\varphi} K_3 + RK_4)},$$

где $K_3 = H_2(1 + 4f^2) - 3Rf$; $K_4 = 3f \cos \varphi + \sin \varphi(1 - 2f^2)$.

На рис. 4, з приведены результаты расчета скоростных качеств приемных стенок бункеров в соответствии с изложенной методикой. Из рисунка видно, что наиболее скоростной формой поверхности приемной стенки из рассмотренных является параболическая. Это объясняется тем, что параболическая поверхность близка по профилю к циклоидальной поверхности, которая обладает особым свойством, присущим брахистохроне. Наибольшее время требуется при перемещении куска по прямолинейной наклонной поверхности. Кроме этого, на таком профиле нельзя получить минимальных конечных скоростей. Цилиндрические стенки проще в изготовлении, дают минимальную скорость выхода материала, а следовательно, и кинетическую энергию удара по рабочему органу вибропитателя, обеспечивают плавный вход материала в бункер и минимальное давление в месте ударного контакта.

Заключение. В условиях карьерных перегрузочных систем параметры бункеров следует рассматривать в зависимости от назначения и структуры системы из условия сменных часовых и минутных режимов поступления и отгрузки ГМ. В статье показано, что условиям карьерных ПС наиболее полно соответствуют бункеры в форме «перевернутого обелиска», оснащенные вибрационными питателями-грохотами с совмещенными технологическими функциями (типа ГПТ). Приведены результаты экспериментальных исследований и промышленных испытаний вибровыпуска взорванной ГМ. К основным параметрам бункеров карьерных ПС относятся: производительность, геометрические параметры и размеры выпускных отверстий, вместимость бункера, скоростные свойства движения ГМ и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов П. И., Журавлев А. Г., Балачук В. Р. Анализ и перспективы применения перегрузочных пунктов при эксплуатации специализированного карьерного транспорта в глубинных зонах карьеров // ГИАБ. 2010. № 7. С. 320–328.
2. Кузнецов В. Г., Кузнецов И. П. Технологические бункеры нового поколения для обогащательных фабрик // Уголь. 2014. № 4. С. 64–67.
3. Свиридов Л. Т., Кочегаров А. В., Арутюнян С. С. К обоснованию конструкции и параметров загрузочного бункера с питателем // Химико-лесной комплекс. Научное и кадровое обеспечение в XXI веке. Проблемы и решения: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. г. Красноярск, 2000. С. 104–106.
4. Варсонофьев В. Д., Кузнецов О. В. Современные конструкции питателей для бункеров транспортных систем. М.: НИИинформтяжмаш, 1986. Вып. 3. С. 100–102.
5. Яковлев В. Л., Яковлев В. А. Актуальные проблемы карьерного транспорта и перспективы его развития // Проблемы недропользования. 2017. № 4 (15). С. 5–9.
6. Чебан А. Ю., Хрунина Н. П. Модернизация транспортно-перегрузочного оборудования при ведении открытых горных работ // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2017. Т. 15. № 1. С. 10–14.

7. Металлические конструкции / В. Г. Аржаков [и др.]. В 3 томах. М.: Высшая школа, 2005. 544 с.
8. Квапил Р. Движение сыпучих материалов в бункерах. М.: Наука, 1975. 159 с.
9. Юдин А. В. К определению рациональной конструкции бункеров с вибрационным питателем-грохотом // Труды ИГД Минчермета. 1970. № 5. С. 150–156.
10. Śladkowski A., Yudin A., Komissarov A., Lagunova Yu., Akhmetova M., Stolpovskikh I. Calculation of parameters and design of the movable transfer station with vibrating screen feeder for the conveyor of deer queries // International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. No. 2. P. 148–151.
11. Kovalyukh V. R., Gud M. B. A general-purpose trough-type vibrating feeder for friable materials // Refractories. 1978. Vol. 18. No. 7–8. С. 397–399.
12. Nadutyi V. P., Sukharyov V. V., Belyushyn D. V. Determination of stress condition of vibrating feeder for ore draving from the block under impact loads // Metallurgical and Mining Industry. 2013. Vol. 5. No. 1. С. 24–26.

Поступила в редакцию 13 июня 2018 года

Сведения об авторах:

Юдин Аркадий Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: gpt2004@mail.ru
Попов Анатолий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: gpt2004@mail.ru
Шестаков Виктор Степанович – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: shestakov.v.s@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-128-139

Bunker systems of combined open-pit transport complexes

Arkadii V. Iudin¹, Anatolii G. Popov¹, Viktor S. Shestakov¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. Transshipment systems for combined transport have a significant impact on the cost of opencast mining in an open way. When developing deep quarries, increased requirements are imposed on transshipment devices and their individual components.

Research aim is to improve the efficiency of transport systems for deep quarries due to the use of the bunker-feeder subsystem with rational parameters.

Methodology. Mathematical and physical modeling of the technological process of the “bunker–vibrating feeder” subsystem.

Results. The article shows that bunker systems equipped with vibrating feeder-screens with combined technological functions most fully meet the requirements of transshipment systems when the rock mass is blown up from the bunkers. The results of the analysis of the influence of feeders-screens on the cost of mineral extraction are given. Experimental studies have been carried out to determine the rational geometry of the “bunker–vibrating feeder” system, the basic parameters of the vibration output have been investigated, and the velocity properties of the receiving elements of the bunkers have been evaluated.

Summary. Under the conditions of open-pit transshipment systems, the parameters of the bunkers should be considered depending on the purpose and structure of the transport system, from the conditions of the modes of receipt and shipment of the rock mass. For open-pit transshipment systems, the bunkers in the form of an “inverted obelisk” are most fully fitted, equipped with vibrating feeder screens with combined technological functions. The results of experimental investigations and industrial tests of the discharge of the blasted rock mass are presented. The main parameters of open-pit transshipment bunkers include: productivity, geometrical parameters and dimensions of the outlet openings, capacity of the bunker, and high-speed properties of rock mass movement.

Key words: transshipment systems; bunker; productivity; bunker geometry; outlet opening; speed; rock mass; vibrating feeder screen.

REFERENCES

1. Tarasov P. I., Zhuravlev A. G., Balanchuk V. R. Analysis and prospects for the use of transshipment points in the operation of specialized mining vehicles in the deep areas of quarries. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2010; 7: 320–328. (In Russ.)
2. Kuznetsov V. G., Kuznetsov I. P. Technological bunkers of a new generation for processing plants. *Ugol = Coal*. 2014; 4: 64–67. (In Russ.)
3. Sviridov L. T., Kochegarov A. V., Arutiunian S. S. To justify the design and parameters of the hopper with a feeder. In: *Chemical and Forestry complex. Scientific and personnel support in the XXI century. Problems and*

- solutions. *Proceedings of International scientific-practical conference*. Krasnoyarsk; 2000. p. 104–106. (In Russ.)
4. Varsonofiev V. D., Kuznetsov O. V. *Modern designs of feeders for bunkers of transport systems*. Vol. 3. Moscow: NIInfomtiakhmash Publishing; 1986. (In Russ.)
 5. Iakovlev V. L., Iakovlev V. A. Actual problems of pit transport and its development prospects. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2017; 4 (15): 5–9. (In Russ.)
 6. Cheban A. Iu., Khrunina N. P. Modernization of transportation and handling equipment in opencast mining. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2017; 15 (1): 10–14. (In Russ.)
 7. Arzhakov V. G. et al. (ed.) *Metal structures: school book for the institutions of higher education*. In 3 volumes. Moscow: Vysshaya shkola Publishing; 2005. (In Russ.)
 8. Kvapil R. *The movement of bulk materials in bunkers*. Moscow: Nauka Publishing; 1975. (In Russ.)
 9. Iudin A. V. To the definition of a rational design of bunkers with a vibrating feeder-screen. *Trudy IGD Minchermeta = Proceedings of the Institute of Mining related to the USSR Ministry of Ferrous Metallurgy*. 1970; 5: 150–156. (In Russ.)
 10. Śladkowski A., Yudin A., Komissarov A., Lagunova Y., Akhmetova M., Stolpovskikh I. Calculation of parameters and design of the movable transfer station with vibrating screen feeder for the conveyor of deer queries. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2018; 7(2): 148–151.
 11. Kovalyukh V. R., Gud M. B. A general-purpose trough-type vibrating feeder for friable materials. *Refractories*. 1978; 18 (7–8): 397–399.
 12. Nadutyi V. P., Sukharyov V. V., Belyushyn D. V. Determination of stress condition of vibrating feeder for ore draving from the block under impact loads. *Metallurgical and Mining Industry*. 2013; 5 (1): 24–26.

Received 13th June, 2018

Information about authors:

Arkadii V. Iudin – D. Sc. in Engineering sciences, Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: gpt2004@mail.ru

Anatolii G. Popov – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, associate professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: gpt2004@mail.ru

Viktor S. Shestakov – PhD in Engineering sciences, Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: shestakov.v.s@mail.ru

Для цитирования: Юдин А. В., Попов А. Г., Шестаков В. С. Бункерные системы комплексов комбинированного транспорта в карьерах // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 2. С. 128–139. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-128-139

For citation: Iudin A. V., Popov A. G., Shestakov V. S. Bunker systems of combined open-pit transport complexes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 2: 128–139. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2019-2-128-139