К определению вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте

Юдин А. В.¹, Шестаков В. С.^{1*}, Саитов В. И.¹, Абдулкаримов М. К.¹

¹Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: shestakov.v.s@mail.ru

Реферат

Введение. Значительную долю затрат при разработке глубоких карьеров составляют затраты на перегрузку горной массы из «сборочного транспорта» на магистральный транспорт. Используются передвижные перегрузочные системы с бункерами, параметры которых определяются по нескольким методикам.

Методология. В настоящей работе при определении вместимости бункера переносных (передвижных) перегрузочных систем рассмотрено два подхода: детерминированный – системы транспорта работают в номинальном режиме; вероятностный – системы транспорта работают с присущей им неравномерностью. За основу рассмотренной методики принята геометрия бункера в конфигурации «перевернутого обелиска», как наиболее производительная система. Предложены формулы для расчета технологической и геометрической вместимости бункера. Предлагаемая методика расчета параметров учитывает: интенсивность прибытия сборочного (автомобильного) транспорта, которая описывается пуассоновским распределением; интенсивность поступления железнодорожного транспорта – распределением Эрланга. Приведено несколько числовых примеров, на которых показано практическое применение для определения параметров бункера.

Результаты. Обосновано значение требуемых дополнительных объемов бункера с целью компенсации неравномерности работы транспортных средств циклического действия в комплексах комбинированного транспорта.

Ключевые слова: комбинированный транспорт; перегрузочная система; бункер; интенсивность потока; распределение; вероятность; интервал; готовность.

Введение. С увеличением глубины карьеров существенно возрастают затраты на транспорт, в связи с этим проводятся исследования по совершенствованию транспортных систем как в нашей стране [1–4], так и в других странах [5–8]. Некоторые исследователи предлагают снижать затраты за счет совершенствования бункерных устройств [9]. В условиях глубоких карьеров при применении переносных (передвижных) перегрузочных систем (ПС) основная роль бункерных устройств сводится к снижению затрат на комбинированный транспорт, обусловленных неравномерностью грузопотоков сопрягаемых видов транспорта. Повышение вместимости бункеров снижает простои транспорта. Установлено, что вместимость бункера переносных ПС должна определяться из условия часового режима наполнения и извлечения горной массы (ГМ) при использовании как автомобильно-конвейерного (АКТ), так и автомобильно-железнодорожного (АЖТ) транспорта. В условиях стационарных систем вместимость устройств может рассматриваться из условия сменных и даже суточных режимов наполнения и извлечения ГМ.

Методология проведения исследований. При определении вместимости бункеров переносных и передвижных ПС в карьерах следует рассматривать раз-

личные методические подходы при проектировании систем АКТ и АЖТ. При АКТ вместимость бункера в основном зависит от неравномерности работы подсистемы «сборочный транспорт» (СТ) как наименее стабильной. При АЖТ вместимость бункера зависит от неравномерности работы обеих подсистем СТ и магистрального транспорта (МТ). С учетом часового режима совместной работы сопрягаемых видов транспорта рационально рассматривать несколько случаев работы подсистем:

– обе подсистемы работают в номинальном режиме, с обеспечением условия $Q_{СТ} = Q_{МТ}$ (детерминированный подход);

– подсистемы СТ и МТ работают с присущей им неравномерностью (вероятностный подход), $Q_{СТ} \neq Q_{МТ}$, где $Q_{СТ}$, $Q_{МТ}$ – производительность подсистемы «сборочный транспорт» и магистрального транспорта.

Рис. 1. Схема к определению вместимости бункера:

H , B_1 – высота и ширина верхней части бункера; l_0 , B_0 – длина и ширина нижней части бункера; h_0 – высота защитного слоя; α и α_1 – углы наклона приемной и боковых стенок

Fig. 1. Bunker capacity determination scheme:

H , B_1 – height and width of the upper part of a bunker; l_0 , B_0 – length and width of the lower part of a bunker; h_0 – height of the protective layer; α and α_1 – pitch angles of the side and receiving walls

Из множества технических решений бункеров, применяемых в технологических процессах горного производства, для ПС комбинированного транспорта рекомендуется принять форму бункера в виде «перевернутого обелиска» с одним, двумя совмещенными или разнесенными выпускными отверстиями. Экспериментально установлено, что при такой форме бункера обеспечивается: наибольшая производительность вибровыпуска взорванной горной массы; наименьший коэффициент проходимости; возможность ликвидации устойчивых сводов при зависании ГМ. Схема бункера в форме «перевернутого обелиска» приведена на рис. 1.

При известных параметрах геометрическая вместимость такого бункера может быть определена по одному из выражений:

$$W = \frac{H}{6} [\operatorname{ctg} \alpha (2B_1 + B_0) + 3l_0 (B_1 + B_0)];$$

$$W = \frac{2}{3} \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \alpha_1 H^3 + (0,5B_0 \operatorname{ctg} \alpha + l_0 \operatorname{ctg} \alpha_1) H^2 + B_0 l_0 H. \quad (1)$$

Использование формул (1) затруднено, если неизвестен параметр бункера H , который при принятой конфигурации бункера может быть определен только по величине требуемой вместимости W .

Общий геометрический объем рассматриваемого бункера определяется в виде суммы объемов:

$$\begin{aligned} \text{при детерминированном подходе } W &= W_1 + W_3 + W_4; \\ \text{при вероятностном подходе } W &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \end{aligned} \quad (2)$$

где W_1 – объем, необходимый для размещения ГМ, обеспечивающий заданную производительность подсистем СТ и МТ; W_2 – дополнительный объем бункера, обусловленный неравномерностью работы сопрягаемых видов транспорта; W_3 – объем, характеризуемый геометрией бункера и коэффициентом его заполнения; W_4 – объем, необходимый для содержания предохранительного слоя ГМ на питателе.

При детерминированном подходе объем W_1 целесообразно определять из условия размещения ГМ, поступающей из средств СТ и отгружаемых средствами МТ за малый (минутный) промежуток времени. При сравнении показателей за искомый объем W_1 следует принять большую величину.

Как при АКТ, так и при АЖТ поступление ГМ в бункер обеспечивается средствами АТ. Установлено, что за малый промежуток времени можно принять возможное время обмена автосамосвалов около бункера t_p . Тогда минутное поступление ГМ в бункер рассчитывается по формуле

$$W_{1\text{СТ}} = \frac{q_a \psi_a Z}{t_p}, \quad (3)$$

где q_a и ψ_a – грузоподъемность и коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала; Z – количество мест разгрузки у бункера, обычно для ПС $Z \geq 2$, но в случае передвижных установок и при производительности системы до 1000 т/ч может быть равным единице.

При разгрузке ГМ из бункера средствами МТ минутное извлечение ГМ из бункера определяется по формулам:

для конвейерного транспорта

$$W_{1\text{МТК}} = \frac{Q_{\text{КТ}}}{60} K_c; \quad (4)$$

для железнодорожного транспорта

$$W_{1\text{МТЖ}} = \frac{q_d \psi_d n}{t_{\text{пог}}} K_t, \quad (5)$$

где $Q_{\text{КТ}}$ – часовая производительность забункерной системы; q_d и ψ_d – грузоподъемность и коэффициент использования думпкара; n – количество думпкаров в составе; K_t – коэффициент снижения производительности питателя; $t_{\text{пог}}$ – время погрузки состава; K_c – коэффициент неравномерности забункерной системы.

При установившемся режиме работы ПС и при соблюдении номинальных интервалов прибытия транспортных средств СТ и МТ на разгрузку и загрузку достаточно в системе выдержать баланс производительностей подсистем $Q_{\text{СТ}} = Q_{\text{МТ}}$.

Незаполненный объем бункера W_3 зависит от формы бункера, количества мест разгрузки, физико-механических свойств ГМ. Объем W_3 примем в зависимости от общего геометрического объема:

$$W_3 = K_W W, \quad (6)$$

где K_W – коэффициент использования вместимости бункера, значение которого может быть принято равным 0,2–0,3. Меньшие значения коэффициента принимаются, если бункер имеет количество мест разгрузки более единицы.

Предохранительный объем W_4 принимают в зависимости от типа питателя, его установки, требуемой толщины защитного слоя h_0 . По ГОСТу для горизонтальных питателей тяжелого типа рекомендуется высоту предохранительного слоя на полотне рабочего органа принимать равной 1,0–1,5 м. Расчеты показывают, что объем предохранительного слоя при его высоте, равной h_0 , составляет не более 10 м³, и его можно выразить в виде

$$W_4 = m q_a, \quad (7)$$

где m – постоянная, значение которой можно принимать 0,3–0,5 в зависимости от грузоподъемности самосвала.

Таким образом, в детерминированной постановке технологическая вместимость бункера определяется путем сопоставления показателей, определяемых выражениями (3)–(5), а геометрическая вместимость с учетом объемов W_3 и W_4 – по выражениям (6), (7).

Рассмотрим пример. Пусть ПС спроектирована на производительность $Q = 2000$ т/ч. Перегрузочная система включает бункер, оснащенный вибропитателями, установленными горизонтально. В качестве СТ приняты автосамосвалы БелАЗ-7555 грузоподъемностью 55 т. Производительность забункерной системы при конвейерном транспорте $Q_{КТ}$ с учетом коэффициента $K_c = 1,1$ составляет 2200 т/ч. В случае железнодорожного МТ состав включает 10 думпкаров грузоподъемностью 105 т, время погрузки состава, с учетом обмена и маневров, $t_{\text{пог}} = 35$ мин.

Расчетная интенсивность поступления А на разгрузку составляет 36 А/ч, расчетный интервал прибытия $A - t_n = 1,66$ мин, время маневров и разгрузки А около бункера является ограничением и составляет $t_p = 2$ мин. Так как $t_n < t_p$, то количество мест разгрузки около бункера $Z \geq 2$, а в бункер за интервал $t_p = 2$ мин может поступить ГМ сразу из двух А. В соответствии с формулами (3)–(5), объемы W_1 : $W_{\text{ICT}} = 54$ т/мин; $W_{\text{IMTK}} = 36,6$ т/мин; $W_{\text{IMTЖ}} = 33$ т/мин. В соответствии с формулами (6) и (7) при $K_W = 0,25$ и $m = 0,4$, $W_3 = 0,25 W$; $W_4 = 22$ т. Таким образом, наибольший показатель объема составляет: $W_{\text{ICT}} = 54$ т/мин, его и принимаем для расчета геометрической вместимости бункера. Тогда общая вместимость, приведенная к одной минуте:

$$W' = \frac{q_a}{(1 - K_W)} \left(\frac{\Psi_a Z}{t_p} + m \right),$$

а приведенная к двум минутам (при одновременной разгрузке двух автомобилей):

$$W'' = \frac{q_a}{(1 - K_W)} (\Psi_a Z + m).$$

Для рассматриваемого примера $W' = 105$ т и $W'' = 181$ т.

На практике установлено, что процесс транспортирования ГМ средствами СТ и МТ носит вероятностный характер. Как правило, интенсивность поступления АТ на разгрузку описывается пуассоновским распределением, а интенсивность поступления ЖТ на погрузку – распределением Эрланга. Наиболее стабильной является подсистема МТ при конвейерном транспорте. Учитывая сказанное, выдержать баланс $Q_{СТ} = Q_{МТ}$ весьма трудно. При оценке вместимости бункера необходимо вносить поправки, связанные с неравномерностью поступления ГМ в бункер и отгрузки ГМ из бункера. Объем W_2 в соответствии с формулой (2) отражает вероятностный характер взаимодействия подсистем СТ, ПС, МТ.

Объем W_2 следует оценивать с двух позиций: со стороны работы СТ и со стороны работы МТ. Из сравниваемых величин следует принять наибольшую.

Рассмотрим работу СТ. Из рассматриваемых подсистем сборочный АТ является наименее стабильной подсистемой по своим характеристикам, большая часть которых имеет вероятностную основу. Установлено, что поток АТ к ПС можно считать простейшим, он обладает свойствами ординарности, а в установившийся период (70–80 % продолжительности смены) также свойствами стационарности и отсутствия последствия. Интенсивность поступления потока АТ к ПС описывается пуассоновским распределением. Для простейшего потока вероятность того, что за отрезок времени t на ПС поступит K автосамосвалов:

$$P_K(t) = \frac{(\lambda t)^K}{K!} \exp(-\lambda t) \quad (8)$$

и, в частности, что не поступит ни одного А:

$$P_0(t) = \exp(-\lambda t),$$

где λ – средняя интенсивность потока, измеряемая числом А в единицу времени; $\lambda t = a$ – математическое ожидание интенсивности потока А на разгрузку, А/мин.

Важная характеристика потока при определении вместимости бункера – закон распределения длины промежутка между соседними А. Рассмотрим случайную величину T – промежуток времени между двумя произвольными поступлениями соседних А в простейшем потоке. Так как простейший поток не обладает последствием, то поступление на разгрузку одного А не влияет на поступление других А в дальнейшем. Поэтому вероятность того, что интервал между А будет не меньше или не больше величины t_n определяется как [10]

$$\begin{aligned} P(T \geq t_n) &= \exp(-\lambda t); \\ P(T < t_n) &= F(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \quad t_n > 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Вероятность прибытия А для разгрузки на ПС определим на примере ПС со следующими параметрами: $Q_{СТ} = 1000$ т/ч; грузоподъемность автосамосвалов $q_a = 30$ и 40 т; средняя интенсивность потока $\lambda = 29$ А/ч или 0,48 А/мин; время поступления А на разгрузку составляет $t_n = 2,0$ и 2,5 мин; количество мест разгрузки у бункера $Z = 1$.

Расчеты показали, что при интервалах поступления автосамосвалов $t_n = 2,0$ и 2,5 мин математическое ожидание распределения составит $a = 0,96$ и 1,2 А/мин, а вероятность того (формула (8)), что на разгрузку не прибывает ни одного А со-

ставит 0,618 и 0,699, прибудет один А – 0,26 и 0,34, прибудет два автосамосвала – 0,08 и 0,14, прибудет три автосамосвала – 0,03 и 0,06. Рассмотрим, как сделанное заключение отразится на результате расчета общей вместимости бункера. Очевидно, что со средней вероятностью 0,6 к бункеру не поступит объем ГМ (W_2), обеспечивающий работу магистрального транспорта. Например, при АКТ объем $W_2 = 0,6W_{\text{ИМТК}}$. Такой объем должен быть в бункере предусмотрен заранее как дополнительный. В этом случае формула для определения общей геометрической вместимости бункера запишется в виде

$$W = W' + W_2 = \frac{q_a}{(1 - K_W)} (\psi_a Z K_3 + m) + 0,6W_{\text{ИМТ}}. \quad (10)$$

В рассматриваемом примере при $W_{\text{ИМТ}} = 1000/60 = 16,6$ т/мин и при $Z = 1$ дополнительный объем W_2 составит 10 т, а общая вместимость бункера по формуле (10) – 80 т. При $Z = 2$ значение W составит 130 т.

Таблица 1. Изменение вероятностей интервалов прибытия автосамосвалов на разгрузку

Table 1. Changing the probabilities of frequency for dump trucks arrival for unloading

Исходные условия	Значение $t_n \pm \Delta t_n$					
	1,2 t_n	1,4 t_n	1,6 t_n	0,8 t_n	0,6 t_n	0,4 t_n
$a = 0,96; t_n = 2$ мин	2,4	2,8	3,2	1,6	1,2	0,8
$P(T > t_n)$	0,100	0,068	0,046	0,216	0,316	0,467
$P(T < t_n)$	0,900	0,932	0,954	0,784	0,684	0,533
$a = 1,2; t_n = 2,5$ мин	3,6	4,3	4,8	2,4	1,92	1,2
$P(T > t_n)$	0,027	0,010	0,008	0,090	0,146	0,301
$P(T < t_n)$	0,973	0,990	0,992	0,910	0,854	0,699

Для рассматриваемого примера результаты расчета вероятностей интервала прибытия автосамосвалов (формулы (9)) приведены в табл. 1 при условии вариации времени прибытия t_n на $\pm 20\%$, $\pm 40\%$, $\pm 60\%$. В таблице выделены наиболее вероятные интервалы прибытия А на разгрузку. Можно констатировать, что интервал прибытия А на разгрузку с вероятностью 0,99–0,95 не превысит величину 1,6 t_n при положительных значениях Δt . Таким образом, время прибытия А на разгрузку лежит в диапазоне (0,8–1,6) t_n или $t'_n = (1,6–3,2)$ мин и $t''_n = (2,4–4,8)$ мин для второго случая.

По изменившимся условиям интервала прибытия А на разгрузку определим необходимый объем бункера W_2 :

$$W'_2 = \frac{Q_{\text{СТ}}}{60} t_{n \min}; \quad W''_2 = \frac{Q_{\text{СТ}}}{60} t_{n \max}. \quad (11)$$

Для рассматриваемого примера $W'_2 = 26,6$ т; $W''_2 = 53,3$ т. Очевидно, что с увеличением интервала прибытия А до величины $t_{n \max}$ в бункер не будет загружен объем W''_2 . При требовании непрерывности процесса этот объем должен быть предусмотрен заранее при проектировании технологической вместимости бункера. В то же время при снижении интервала прибытия А до величины $t_{n \min}$ в бункер поступит дополнительный объем ГМ (W'_2), а это означает, что в бункере так-

же должна быть заранее предусмотрена вместимость для размещения объема W'_2 . Условия по выражению (11) несовместимы. Поэтому в дальнейшем из двух значений W'_2 и W''_2 выбираем наибольшее значение W''_2 . При данном подходе значение общей геометрической вместимости бункера по выражению (10) составит 113 т при $Z = 1$.

Таким образом, для рассматриваемого примера при учете неравномерности работы СТ общая вместимость бункера увеличивается на 10–50 т при $Z = 1$.

Возьмем другой подход при определении интервала прибытия автосамосвалов к месту разгрузки.

Если принято, что поток прибывающих на разгрузку А следует закону Пуассона, то время между двумя соседними автосамосвалами распределяется по показательному закону [11]:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t),$$

где λ – интенсивность движения автомобилей.

Таблица 2. Интервалы времени между двумя соседними автосамосвалами
Table 2. Time interval between two neighbouring dump trucks

Номер реализации	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$0 \leq y_i \leq 1$	0,41	0,21	0,85	0,18	0,65	0,36	0,72	0,55	0,29	0,63
$t_i = -\frac{1}{\lambda} \ln y_i$, мин	1,86	3,27	0,33	3,54	0,85	2,10	0,66	1,18	2,51	0,95

Для получения алгоритма при моделировании случайных величин, распределенных по показательному закону, необходимо интегральную функцию закона выразить явно относительно аргумента:

$$y = F(t) = \int_0^t \lambda \exp(-\lambda t) dt = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (12)$$

откуда $t_i = -\frac{1}{\lambda} \ln y_i$; $0 \leq y_i \leq 1$.

Для рассматриваемого в примере случая ПС с производительностью $Q_{\text{СТ}} = 1000$ т/ч интенсивность движения составляет $\lambda = 29$ А/ч или 0,008 А/с. Для моделирования интервала времени между двумя соседними автосамосвалами следует воспользоваться случайными числами. Результаты расчета по выражению (12) для различных случайных чисел приведены в табл. 2.

По результатам можно сделать заключение, что отклонения интервалов движения между соседними автосамосвалами от заданного расчетного значения $t_{\text{н}} = 2$ мин составят: в сторону снижения интервала $\Delta t'$ в среднем на 40 %, в сторону повышения $\Delta t'$ в среднем на 48 %. Таким образом, время прибытия лежит в диапазоне $\Delta t' = (1,2-2,96)$ мин, что практически совпадает с выводами, сделанными ранее.

Приведем результаты промышленных исследований ПС при АКТ на Ингулецком ГОКе [13] производительностью 3500 т/ч. При $Z = 4$ значение $\lambda = 1,203$ А/мин, а математическое ожидание интенсивности поступления А к бункеру ПС $a = 1,21$ А/мин. В вероятной форме интенсивность поступления АТ к ПС можно записать следующим образом: частота прибытия одного автосамосвала – 32 %,

двух автосамосвалов – 25 %, трех – 10 %, четырех – 3,5 %, ни одного – 28 %. Таким образом, в течение часового интервала около 40 % времени на перегрузку одновременно прибывают более двух автосамосвалов, а в течение 28 % – ни одного автосамосвала. Как то, так и другое состояние системы должно быть скомпенсировано достаточной вместимостью бункера. В первом случае бункер должен принять сразу 2, 3 вместимости кузова автосамосвала, во втором случае в бункере должно быть размещено достаточное количество ГМ, чтобы обеспечить бесперебойную работу подсистемы магистрального транспорта. Таким образом, количество мест разгрузки в выражении (3) следует принимать не менее двух, а для компенсации отсутствия автосамосвалов в бункере всегда должен находиться объем горной массы, обеспечивающий работу подсистемы КТ за время между требуемым прибытием автосамосвалов с учетом амплитуды колебаний интервала прибытия Δt .

Рассмотрим работу магистрального транспорта. Непрерывную работу КТ можно обеспечить лишь в том случае, если каждая последующая порция ГМ в автосамосвалах будет подходить к месту разгрузки и разгружаться после предыдущей не позднее, чем через интервал времени $t_{\text{ПКТ}}$ по условиям конвейерного МТ:

$$t_{\text{ПМТ}} = \frac{60q_a \psi_a}{Q_{\text{МТК}}},$$

а с учетом неравномерности работы СТ расчетный интервал $t_{\text{ПМТ}}$ должен быть увеличен введением поправки $\Delta t'_{\text{ПМТ}} = t'_n = (2-4) t_n$ (см. ранее). Для рассматриваемой ПС на Ингулецком ГОКе при $Q_{\text{МТК}} = 3500$ т/ч и при применении автосамосвалов грузоподъемностью 75 т, величина $t_{\text{ПМТ}}$ составляет 1,12 мин, а дополнительный объем $W_{2\text{МТ}}$ по условиям магистрального конвейерного транспорта 115–230 т.

В то же время условия работы МТ зависят от коэффициента равномерности выпуска ГМ из бункера K_p , от коэффициента готовности K_r , от рабочей вероятности бункерной системы P_p . Значение коэффициента K_p зависит от типа питателя, фракционного состава взорванной ГМ и размеров выпускных отверстий бункера.

Коэффициент готовности забункерной системы при конвейерном транспорте характеризует вероятность того, что система будет работоспособной в произвольно выбранный момент времени и определяется по формуле

$$K_r = \frac{T_n}{T_n + T_b},$$

где T_n и T_b – наработка на отказ системы, характеризующая среднее время работы системы между отказами и среднее время восстановления (устранения одного отказа системы).

Коэффициент готовности системы КТ, состоящий из n последовательно соединенных восстанавливаемых конвейеров с интенсивностью отказов λ и интенсивностью восстановления μ определяется по формуле [12]

$$K_r = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \quad K_{r\text{МТ}} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{1 - K_{ri}}{K_{ri}}},$$

где K_{ri} – коэффициент готовности i -го конвейера.

Из опыта работы отечественных и зарубежных транспортных систем можно сделать заключение: для ленточных конвейеров при перемещении крупнодробленых скальных и рыхлых вскрышных пород без скальных включений $K_r = 0,96-0,97$; при перемещении рыхлых вскрышных пород, склонных к налипанию и намерзанию, со скальными включениями $K_r = 0,90-0,92$; для ПС между конвейерами $K_r = 0,98$; для ПС с дробилками $K_r = 0,92-0,95$.

Производительность (часовая) КТ при годовом объеме перевозок Q_r определяется по формуле

$$Q_{\text{МТК}} = \frac{Q_r}{TK_r},$$

где T – годовое время работы КТ.

С учетом неравномерности выпуска ГМ из бункера и состояния бункерной системы при известной $Q_{\text{МТК}}$, минутный грузопоток системы определяется по формуле

$$W_{\text{МТК}} = \frac{Q_{\text{МТК}}}{60} P_p K_p.$$

Произведение $P_p K_p$ ориентировочно составляет величину $K_c = 0,9-0,95$, что в определенные промежутки времени снижает минутный и часовой грузопотоки и общее время работы МТ ($t_{\text{МТК}}$) на 5–10 %. Фактическое время работы МТ составляет $(0,90-0,95)t_{\text{МТК}}$, а время отсутствия извлечения ГМ из бункера $\Delta t_k = (0,05-0,1)t_{\text{МТК}}$, что и определяет требуемую дополнительную вместимость бункера $W_{2\text{МТК}}$, связанную с неравномерностью работы МТ:

$$W_{2\text{МТК}} = \frac{Q_{\text{МТК}}}{60} \Delta t_k.$$

Неизвлеченный объем ГМ ($W_{2\text{МТК}}$) оказывает влияние на общую вместимость бункера. Чтобы обеспечить бесперебойную работу СТ, в бункере должен быть предусмотрен заранее дополнительный объем. С учетом сказанного, общая вместимость бункера при АКТ

$$W = W' + W_2 = \frac{q_a}{(1 - K_W)} (\psi_a Z + m) + \frac{Q_{\text{МТК}}}{60} \Delta t_k. \quad (13)$$

При производительности системы $Q_{\text{МТК}} = 2000$ т/ч, при $Z = 2$ и при грузоподъемности АТ $q_a = 55$ т общая геометрическая вместимость бункера в соответствии с выражением (13) составит 310 т.

В наихудшем случае работы системы, когда одновременно наблюдается неравномерность извлечения ГМ средствами МТ и неравномерность поступления ГМ средствами СТ, общая вместимость бункера должна рассчитываться с учетом обоих состояний:

$$W = \frac{q_a}{(1 - K_W)} (\psi_a Z + m) + \frac{Q_{\text{МТК}}}{60} \Delta t_k + \frac{Q_{\text{СТ}}}{60} t'_\Pi.$$

Рассмотрим влияние неравномерности прибытия и изменение времени погрузки состава на величину вместимости бункера W_2 при магистральном ЖТ.

Проведем оценку ПС только при номинальном часовом режиме работы СТ и МТ. Сменные колебания и неравномерность работы в межсменные промежутки не рассматриваются.

Известно, что время погрузки состава грузоподъемностью 1000 т при экскаваторной погрузке составляет до 60 мин при производительности ПС, равной 1000 т/ч. Эстакадно-бункерные ПС, оснащенные вибропитателями, способны повысить производительность ПС до 2000 т/ч при времени погрузки и смены состава $t_{\text{пог}} = 30\text{--}36$ мин (в зависимости от исполнения ПС и организации работ при погрузке). В то же время при организации работы магистрального ЖТ представляет трудность обеспечение постоянства времени $t_{\text{пог}}$. Наибольшее влияние на вместимость бункера W_2 оказывает неравномерность прибытия ЖТ с задержкой, характеризуемой величиной $+\Delta t_{\text{пог}}$. Такая задержка оказывает значительное влияние на работу сборочного АТ.

При известной вместимости состава $q_g n$ и заданной часовой производительности подсистемы МТ ($Q_{\text{МТЖ}}$) требуемое значение продолжительности погрузки и обмена составов на ПС определяется по формуле:

$$t_{\text{пог}} = \frac{60q_g n \psi_g}{Q_{\text{МТЖ}}} \approx \frac{60q_g n \psi_g}{Q_{\text{п}} K_t}, \quad (14)$$

где q_g и ψ_g – грузоподъемность и коэффициент использования грузоподъемности думпкара; n – количество думпкаров в составе; $Q_{\text{п}}$ – производительность питателя; K_t – коэффициент снижения производительности ПС из-за способа погрузки состава.

Средняя интенсивность (интервал) подачи составов на погрузку в течение одного часа

$$\lambda_c = \frac{60}{t_{\text{пог}}}. \quad (15)$$

Фактический интервал поступления локомотивосоставов на погрузку $t_{\text{ф пог}}$ отличается от среднего значения. Установлено, что интервал поступления составов к ПС на погрузку (время их погрузки) достаточно близко описывается распределением Эрланга второго и третьего порядков. Выражение плотности распределения записывается в виде [10]

$$f_K(t) = \frac{(\lambda_K K)^K}{(K-1)!} t^{K-1} \exp(-K\lambda) K^t,$$

где λ_K – плотность потока Эрланга при порядке распределения K определяется как $\lambda_K = \lambda/K$; λ – плотность потока (число составов, поступающих в единицу времени) пуассоновского потока.

Выражение для функции распределения Эрланга имеет вид

$$F(t) = \int_0^t \frac{(\lambda K)^K}{(K-1)!} t^{K-1} \exp(-K\lambda) K^t. \quad (16)$$

В зависимости от порядка K интеграл (16) выражается по-разному через элементарные функции. Приведем несколько примеров функции распределения

Эрланга порядков K , наиболее распространенных в эксплуатации железных дорог [10]:

$$\begin{aligned} K=1 & \left\{ \begin{aligned} F(t) &= 1 - \exp(-\lambda t); \\ F(t) &= 1 - (1 + 2\lambda t)\exp(-2\lambda t); \end{aligned} \right. \\ K=2 & \left\{ \begin{aligned} F(t) &= 1 - \frac{1}{2}(9\lambda^2 t^2 + 6\lambda t + 2)\exp(-3\lambda t); \\ F(t) &= 1 - \frac{1}{3}(\lambda^3 t^3 + 24\lambda^2 t^2 + 12\lambda t + 3)\exp(-4\lambda t). \end{aligned} \right. \\ K=3 & \\ K=4 & \end{aligned}$$

Составляющая вместимости бункера W_2 , зависящая от изменения объемов отгрузки ГМ из бункера, должна определяться с учетом неравномерности прибытия составов на загрузку и изменчивости интервалов прибытия, загрузки и обмена составов:

$$t_{\text{ф пог}} = t_{\text{пог}} + \Delta t_{\text{пог}}.$$

При известной средней часовой интенсивности прибытия составов на погрузку λ_c по выражению (15), задаваясь амплитудами отклонения времени прибытия составов на погрузку $+\Delta t_{\text{пог}}$ и значениями интервалов между прибытием двух соседних составов, применив свойства распределения Эрланга, можно определить вероятности того, что время прибытия составов не превысит принятую величину амплитуды отклонения $\Delta t_{\text{пог}}$ и вероятность прибытия двух соседних составов на ПС.

В табл. 3 приведены результаты расчета вероятностей для системы с параметром распределения Эрланга $K=2$. При вместимости состава 1000 т горной массы производительность $Q_{\text{МТЖ}} = 2000$ т/ч обеспечивается лишь при $t_{\text{пог}} \leq 30$ мин, при этом производительность загрузочного устройства в бункере (по формуле (14)) должна быть не менее 2200 т/ч. Любое повышение $t_{\text{пог}}$ при сохранении вместимости состава снижает производительность $Q_{\text{МТЖ}}$.

По результатам расчетов можно сделать заключение.

Во-первых, при расчетном времени обмена и погрузки состава $t_{\text{пог}} = 30$ мин, обеспечивающем производительность подсистемы МТ $Q_{\text{МТЖ}} = 2000$ т/ч, вероятность того, что параметр $t_{\text{пог}}$ определен с отклонением 15 мин, составляет не менее 0,8. Это означает, что с большой степенью вероятности в течение 15 мин выпуск ГМ из бункера производиться не будет.

Во-вторых, чтобы обеспечить непрерывность работы всей системы, и СТ в частности, необходимо в бункере предусмотреть дополнительную вместимость, компенсирующую задержку работы МТ. В рассматриваемом примере этот объем составит до 500 т горной массы, при производительности $Q_{\text{МТЖ}} = 1000$ т/ч – 250 т.

В-третьих, при параметре $t_{\text{пог}} = 30$ мин с вероятностью 0,804 интервал между прибытиями составов не превысит 45 мин, с вероятностью 0,595 – 30 мин, с вероятностью 0,209 – 30–45 мин.

Таким образом, для учета влияния неравномерности работы магистрального железнодорожного транспорта на вместимость бункера ПС можно принять 15-минутный интервал параметра $\Delta t_{\text{пог}}$ при вероятности события 0,81. При принятии параметра $t_{\text{пог}} = 10$ и 5 мин вероятность события соответственно составит 0,74 и 0,67.

Условимся, что работа ПС проходит в установившемся режиме при производительности системы 2000 т/ч, и при обеспечении заданного времени погрузки и обмена составов $t_{\text{пог}} = 30$ мин. В расчетном режиме минутное поступление ГМ

средствами СТ соответствует выражению (3), а минутное извлечение ГМ из бункера и поступление ее в средства МТ соответствует выражениям (4) и (5), а объемы поступления ГМ в бункер и извлечения из бункера удовлетворяют требованиям баланса системы. Баланс нарушается, если $t_{\phi \text{ пог}} \neq t_{\text{пог}}$ и $t_{\phi \text{ пог}} = t_{\text{пог}} + \Delta t_{\text{пог}}$.

При принятом параметре $t_{\text{пог}}$ из бункера не будет извлечено 500, 330 и 160 т горной массы соответственно, а сборочный транспорт продолжает работать в расчетном режиме. За время $t_{\text{пог}}$ автомобильным транспортом в бункер будет загружено

$$W_{2\text{МТЖ}} = W_{2\text{СТ}} = \frac{Q_{\text{СТ}}}{60} \Delta t_{\text{пог}},$$

а в бункере заранее должна быть предусмотрена вместимость для размещения объема $W_{2\text{СТ}}$

Таблица 3. Показатели вероятностных состояний
Table 3. Probability states indicators

Задаваемые и определяемые параметры	Значения					
Среднее время обмена и погрузки составов $t_{\text{пог}}$, мин	30			40		
Расчетная производительность подсистемы магистрального транспорта $Q_{\text{МТЖ}}$, т/ч	2000			1500		
Интенсивность погрузки составов, приведенная к 1 мин	0,033			0,025		
Заданная амплитуда отклонений времени погрузки состава $+\Delta t_{\text{пог}}$, мин	+5	+10	+15	+5	+10	+15
Вероятность того, что время погрузки состава не превысит $t_{\text{пог}} + \Delta t_{\text{пог}}$	0,67	0,74	0,81	0,66	0,73	0,76
Средняя интенсивность прибытия составов на погрузку за 1 час	2,0			1,5		
Расчетный интервал времени прибытия составов на погрузку, мин	30–45			40–55		
Вероятность того, что интервал между прибытиями двух составов находится в расчетном диапазоне	0,209			0,201		

С учетом неравномерности работы МТ и СТ и в часовом режиме общая вместимость бункера при комбинированном АЖТ

$$W = W' + W_2 = \frac{q_a}{(1 - K_W)} (\psi_a Z K_3 + m) + \frac{Q_{\text{СТ}}}{60} (t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{пог}}).$$

При производительности системы 2000 т/ч и при $Z = 2$ общая вместимость бункера составит около 750 т горной массы.

Заключение. Рассмотрены два подхода (детерминированный и вероятностный) при расчете вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте в карьерах. Показано, что при взаимодействии сборочного (автомобильного) транспорта и магистрального (железнодорожного) технологическая вместимость бункера должна предусматривать дополнительные объемы для размещения ГМ, обусловленные вероятностным характером интенсивности распределения и прибытия транспортных средств циклического действия к перегрузочной системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молдабаев С. К., Абен Е., Касымбаев Е. А., Сарыбаев Н. О. Комплектация комплексов циклично-поточной технологии при комбинированном автомобильно-железнодорожном виде транспорта // ГИАБ. 2019. № 7. С. 158–173.
2. 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. Красноярск, 2000. С. 104–106.
3. Кармаев Г. Д., Тюлькин А. П., Сумина И. Г. К вопросу размещения дробильно-перегрузочных пунктов комплексов ЦПТ по глубине карьеров // ГИАБ. 2009. № 10. С. 364–372.
4. Яковлев В. Л., Яковлев В. А. Актуальные проблемы карьерного транспорта и перспективы его развития // Проблемы недропользования. 2017. № 4(15). С. 5–9.
5. Nel S., Kizil M. S. and Knights P. Improving truck-shovel matching. In: Baafi E. Y., Kinimonth R. J. and Porter I. Proceedings of the 35th APCOM Symposium. 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia. 24–30 September 2011. P. 381–391.
6. Korolenko M. K., Perehudov V. V., Fedin K. A., Romanenko A. V., and Protasov V. P. The improvement of shovel and truck methods for rock hoisting in the context of Yuzhny GOK OJSC: monograph. Kryvyi Rih: Dionis, 2012.
7. Isaac Dzakpata, Peter Knights, Mehmet Siddik Kizil et al. Truck and shovel versus in-pit conveyors systems: a comparison of the valuable operating time // Coal Operators' Conference. Australia: University of Wollongong, 2016. P. 463–476.
8. Bozorgebrahimi E. The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining. University of British Columbia, 2004.
9. 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.
10. Акулиничев В. М., Кудрявцев В. А., Корешков А. Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог. М.: Транспорт, 1981. 222 с.
11. Завадский Ю. В. Решение задач автомобильного транспорта методом имитационного моделирования. М.: Транспорт, 1977. 72 с.
12. Васильев М. В., Волотковский В. С., Кармаев Г. Д. Конвейеры большой протяженности на открытых работах. М.: Недра, 1977. 246 с.
13. Смирнов В. П., Лель Ю. И. Теория карьерного большегрузного автотранспорта. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 285 с.

Поступила в редакцию 7 апреля 2020 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

Шестаков Виктор Степанович – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: shestakov.v.s@mail.ru

Сантов Виль Ирхужеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: tit.ural@mail.ru

Абдулкаримов Магомед Казбекович – старший преподаватель кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: abdmg@list.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-99-112

Determining the capacity of a bunker as a part of the handling system with combined transport

Arkadii V. Iudin¹, Viktor S. Shestakov¹, Vil I. Saitov¹, Magomed K. Abdulkarimov¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. Significant share of the costs for deep quarries is the cost of rock mass reloading from the “assembly transport” to the main transport make up a considerable proportion in open pit development costs. Portable handling systems with bunkers are used, the parameters of which are determined by several methods. **Methodology.** In this work, when determining the capacity of the bunker, two approaches have been considered: deterministic – transport systems operate at nominal conditions; probabilistic – transport systems operate with their inherent unevenness. The methodology adopted is based on the geometry of the bunker in the configuration of the “inverted obelisk”, as the most productive system. Formulas to calculate the technological and geometric capacity of the bunker have been proposed. The proposed method parameters design takes into account assembly (automobile) transport arrival rate, which is described by the Poisson distribution and railway transport arrival rate described by the distribution of Erlang. Several numerical examples reveal practical application for bunker parameters determination.

Results. The significance of the required additional bunker volumes has been justified in order to make up for cyclic transport vehicles irregular operation within combined transport complexes.

Key words: combined transport; handling system; bunker; flow rate; distribution; probability; interval; availability.

REFERENCES

1. Moldabaev S. K., Aben E., Kasymbaev E. A., Sarybaev N. O. Complete sets of cyclic-flow technology with combined road-rail transport. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 7: 158–173. (In Russ.)
2. Sviridov L. T., Kochegarov A. V., Arutiunian S. S. To the rationale of the structure and parameters of a loading bunker with a feeder. In: *Chemical and timber complex. Problems and solutions: proceedings of Internat. sci.-pract. conf.* Krasnoyarsk; 2000. (In Russ.)
3. Karmaev G. D., Tiulkin A. P., Sumina I. G. Regarding the issue of accommodating the crushing-handling stations of cyclical and continuous complexes according to the depth of an open pit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009; 10: 364–372. (In Russ.)
4. 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.)
5. Nel S., Kizil M. S. and Knights P. Improving truck-shovel matching. In: Baafi E. Y., Kinimonth R. J. and Porter I. *Proceedings of the 35th APCOM Symposium. 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia. 24–30 September 2011*. P. 381–391.
6. Korolenko M. K., Perehudov V. V., Fedin K. A., Romanenko A. V., and Protasov V. P. *The improvement of shovel and truck methods for rock hoisting in the context of Yuzhny GOK OJSC: monograph*. KryvyiRih: Dionis, 2012.
7. Isaac Dzakpata, Peter Knights, Mehmet Siddik Kizil et al. Truck and shovel versus in-pit conveyors systems: a comparison of the valuable operating time. *Coal Operators' Conference*. Australia: University of Wollongong, 2016. P. 463–476.
8. Bozorgebrahimi E. *The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining*. University of British Columbia, 2004.
9. 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.)
10. Akulinichev V. M., Kudriavtsev V. A., Koreshkov A. N. *Mathematical methods in rail ways operation*. Moscow: Transport Publishing; 1981. (In Russ.)
11. Zavatskii Iu. V. *Solving the problems of automobile transport by the method of simulation modeling*. Moscow: Transport Publishing; 1977. (In Russ.)
12. Vasiliev M. V., Volotkovskii V. S., Karmaev G. D. *Long conveyers at opencast operations*. Moscow: Nedra Publishing; 1977. (In Russ.)
13. Smirnov V. P., Lel Iu. I. *The theory of open pit heavy motor transport*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2002. (In Russ.)

Received 7 April 2020

Information about authors:

Arkadii V. Iudin – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: gpt2004@mail.ru

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

Vil I. Saitov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: tit.ural@mail.ru

Magomed K. Abdulkarimov – senior lecturer, Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: abdmg@list.ru

Для цитирования: Юдин А. В., Шестаков В. С., Сaitов В. И., Абдулкаримов М. К. К определению вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 99–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-99-112

For citation: Iudin A. V., Shestakov V. S., Saitov V. I., Abdulkarimov M. K. Determining the capacity of a bunker as a part of the handling system with combined transport. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 99–112 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-99-112