

### **МИНИМАЛЬНЫЙ ОБЪЕМ АККУМУЛИРУЮЩЕГО БУНКЕРА**

На основі теорії випадкових процесів визначений мінімальний об'єм акумулюючого бункера системи підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт. При цьому розглядалися випадки з послідовним і паралельним з'єднанням конвеєрних ліній і бункерів.

### **MINIMUM VOLUME OF ACCUMULATING BUNKER**

On the basis of casual processes theory the minimum volume of accumulating bunker of the underground mining conveyor transport system is defined. The cases with successive and parallel connection of conveyor lines and bunkers were thus considered.

Системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт с высокопроизводительными лавами обладают, как правило, сложной структурой. Из-за отказов конвейерного оборудования пропускная способность таких систем довольно низкая.

Одним из способов повышения пропускной способности подземного конвейерного транспорта угольных шахт является применение аккумулирующих бункеров.

Известно, что аккумулирующие бункеры служат для накопления груза в случаях, связанных с аварийными, технологическими и организационными простоями конвейерных линий. Однако их объем в условиях шахты ограничен. Поэтому возникла задача нахождения минимального объема аккумулирующего бункера.

Определением емкости аккумулирующих бункеров для систем конвейерного транспорта занимались многие авторы [1-5].

В работах [1-4] с использованием марковских процессов удалось получить громоздкие аналитические выражения для простейшей системы транспорта с последовательным соединением конвейер-бункер-конвейер.

В статье [5] определен объем аккумулирующего бункера конвейерной линии методом статистического моделирования. Однако с помощью этого метода получить оптимальный объем аккумулирующего бункера очень сложно.

Поэтому в работе предложена простая инженерная модель определения минимального объема аккумулирующих бункеров для любой сложной системы конвейерного транспорта.

Рассмотрим сначала простую систему транспорта, состоящую из последовательно соединенных конвейерных линий, между которыми находится аккумулирующий бункер.

Поток груза, поступающий в бункер и убывающий из него, зависит от интервалов работы и простоя надбункерной и подбункерной конвейерной линии.

Согласно [6,7], интервалы работы  $t$  и простоя  $\tau$  конвейерного оборудования распределены по экспоненциальному закону с плотностью распределения

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

$$f(\tau) = \mu \exp(-\mu \tau),$$

где  $\lambda = 1/T_{cp}$  – параметр распределения времени поступления груза, 1/мин;

$T_{cp}$  – среднее время поступления груза, равное среднему времени работы конвейерной линии, мин;  $\mu = 1/T_{cn}$  – параметр распределения времени отсутствия груза, 1/мин;  $T_{cn}$  – среднее время отсутствия груза, равное среднему времени простоя конвейерной линии.

Предположим, что средняя производительность грузопотока при входе в надбункерную конвейерную линию постоянна и равна  $m_{Q1}$  (т/мин), а в месте разгрузки бункера средняя производительность питателя постоянна и равна  $m_{Q2}$  (т/мин). Тогда грузопоток, поступающий в бункер с надбункерной линии, согласно [6,7], описывается случайной функцией  $\zeta_1$  с математическим ожиданием, дисперсией и корреляционной функцией, равными

$$M[\zeta_1] = m_{Q1} \cdot \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1},$$

$$D[\zeta_1] = m_{Q1}^2 \cdot \frac{\lambda_1 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2},$$

$$R_{Q1}(\tau) = m_{Q1}^2 \frac{\lambda_1 \mu_1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2} \cdot e^{-(\mu_1 + \lambda_1)\tau}, \quad (1)$$

где  $\lambda_1, \mu_1$  – параметры экспоненциального закона распределения времени работы и времени простоя надбункерной конвейерной линии, соответственно, 1/мин.

По аналогии с предыдущим, грузопоток, разгружающий бункер, описывается случайной функцией  $\zeta_2$  с математическим ожиданием, дисперсией и корреляционной функцией

$$M[\zeta_2] = m_{Q2} \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2},$$

$$D[\zeta_2] = m_{Q2}^2 \cdot \frac{\lambda_2 \mu_2}{(\lambda_2 + \mu_2)^2},$$

$$R_{Q2}(\tau) = m_{Q2}^2 \frac{\lambda_2 \mu_2}{(\lambda_2 + \mu_2)^2} \cdot e^{-(\mu_2 + \lambda_2)\tau}, \quad (2)$$

где  $\lambda_2, \mu_2$  – параметры экспоненциального закона распределения времени работы и времени простоя подбункерной конвейерной линии, соответственно, 1/мин.

При этом вероятности работы надбункерной и подбункерной конвейерных линий равны

$$P_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1}, \quad P_2 = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}. \quad (3)$$

Обозначим через  $V_{\delta}$  количество груза, находящегося в данный момент  $t$  в бункере. Величина  $V_{\delta}$  является случайной функцией, определяемой по формуле [8]

$$V_{\delta} = \int_0^t (\zeta_1 - \zeta_2) dt \quad (4)$$

или

$$V_{\delta} = \int_0^t \zeta_1 dt - \int_0^t \zeta_2 dt. \quad (5)$$

Согласно [8,9], при достаточно больших  $t$  ( $t \gg 1$ ) случайная функция  $V_{\delta}$  распределена по нормальному закону, ее математическое ожидание и дисперсия равны

$$V_{\delta, cp} = M[V_{\delta}] = \int_0^t M[\zeta_1] dt - \int_0^t M[\zeta_2] dt, \quad (6)$$

$$D_V = D_{V1} + D_{V2}, \quad (7)$$

где

$$D_{V1} = 2 \int_0^t (t - \tau) R_{Q1}(\tau) d\tau, \quad D_{V2} = 2 \int_0^t (t - \tau) R_{Q2}(\tau) d\tau$$

Подставляем значения  $M[\zeta_1]$ ,  $M[\zeta_2]$ ,  $R_{Q1}(\tau)$ ,  $R_{Q2}(\tau)$ , определенные по формулам (1) и (2), в (6) и (7), после интегрирования получим

$$V_{\delta, cp} = \frac{\mu_1 t}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot m_{Q1} - \frac{\mu_2 t}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot m_{Q2}, \quad (8)$$

$$D_{V1} = \frac{2\mu_1\lambda_1}{(\lambda_1 + \mu_1)} m_{Q1}^2 \left[ \frac{e^{-(\lambda_1 + \mu_1)t}}{(\lambda_1 + \mu_1)} + \frac{t}{\lambda_1 + \mu_1} - \frac{1}{(\lambda_1 + \mu_1)^2} \right], \quad (9)$$

$$D_{V2} = \frac{2\mu_2\lambda_2}{(\lambda_2 + \mu_2)} m_{Q2}^2 \left[ \frac{e^{-(\lambda_2 + \mu_2)t}}{(\lambda_2 + \mu_2)} + \frac{t}{\lambda_2 + \mu_2} - \frac{1}{(\lambda_2 + \mu_2)^2} \right]. \quad (10)$$

Среднее квадратичное отклонение функции  $V_{\delta}$  определяется по формуле

$$\sigma_V = \sqrt{D_{V1}^2 + D_{V2}^2}. \quad (11)$$

С вероятностью, не большей  $P=0,995$ , случайная функция  $V_{\delta}$  принимает значение

$$V_{\delta m} = V_{\delta cp} + 3\sigma_V. \quad (12)$$

Подставляя (8), (9), (10) и (11) в (12), после преобразования получим

$$V_{\delta m} = t \left[ (P_1 m_{Q1} - P_2 m_{Q2}) + 3 \sqrt{m_{Q1}^2 P_1 (1 - P_1) \cdot A_1 \cdot \frac{2}{t^2} + m_{Q2}^2 P_2 (1 - P_2) m_{Q2} \cdot A_2 \cdot \frac{2}{t^2}} \right], \quad (13)$$

где

$$\alpha_1 = \lambda_1 + \mu_1, \quad \alpha_2 = \lambda_2 + \mu_2, \\ A_1 = \frac{1}{\alpha_1^2} e^{-\alpha_1 t} + \frac{t}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_1^2}, \quad A_2 = \frac{1}{\alpha_2^2} e^{-\alpha_2 t} + \frac{t}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_2^2}.$$

В последнем равенстве заменим выражение, стоящее в скобках под радикалом, на аппроксиманту Паде [10]. В результате получим

$$2 \left( \frac{1}{\alpha_i^2} e^{-\alpha_i t} + \frac{t}{\alpha_i} - \frac{1}{\alpha_i^2} \right) \approx \frac{t^2}{1 + \frac{\alpha_i}{3} t}, \quad (14)$$

где  $i = 1, 2$ .

Подставляя (14) в (13), получим

$$V_{\delta m} = t \left[ (P_1 m_{Q1} - P_2 m_{Q2}) + 3 \sqrt{\frac{m_{Q1}^2 P_1 (P - P_1)}{1 + \frac{\alpha_1}{3} \cdot t} + \frac{m_{Q2}^2 P_2 (1 - P_2)}{1 + \frac{\alpha_2}{3} \cdot t}} \right]. \quad (15)$$

Формулу (15) перепишем в виде

$$V_{\delta m} = m_{Q1} \cdot t_{\delta} \left[ (P_1 - x P_2) + 3 \sqrt{\frac{P_1 (1 - P_1)}{1 + \frac{\alpha_1}{3} t} + \frac{x^2 P_2 (1 - P_2)}{1 + \frac{\alpha_2}{3} t}} \right], \quad (16)$$

где  $x = \frac{m_{Q2}}{m_{Q1}}$ ;  $t_{\delta}$  – время заполнения бункера, мин.

На рис. 1 показан график зависимости объема аккумулирующего бункера  $V_{\delta m}$  от  $x$  при следующих данных:  $\lambda_1 = 8,8 \cdot 10^{-3}$  мин<sup>-1</sup>,  $\mu_1 = 5 \cdot 10^{-2}$  мин<sup>-1</sup>,  $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-3}$  мин<sup>-1</sup>,  $\mu_2 = 4 \cdot 10^{-2}$  мин<sup>-1</sup>,  $m_{Q1} = 5,6$  т/мин;  $t_{\delta} = 40$  мин.

Из рис. 1 видно, что с увеличением  $x$  производительность разгрузочного питателя объем аккумулирующего бункера уменьшается. При этом при значении  $x = P_1/P_2 = 0,9$ , объем бункера равен  $V_{\delta} = 205$ т, а при  $x = 1$ , т.е. при равенст-

ве производительности поступления и разгрузки бункера ( $m_{Q1}=m_{Q2}$ ), объем бункера равен  $V_{\bar{o}} = 100$  т, это меньше предыдущего значения.

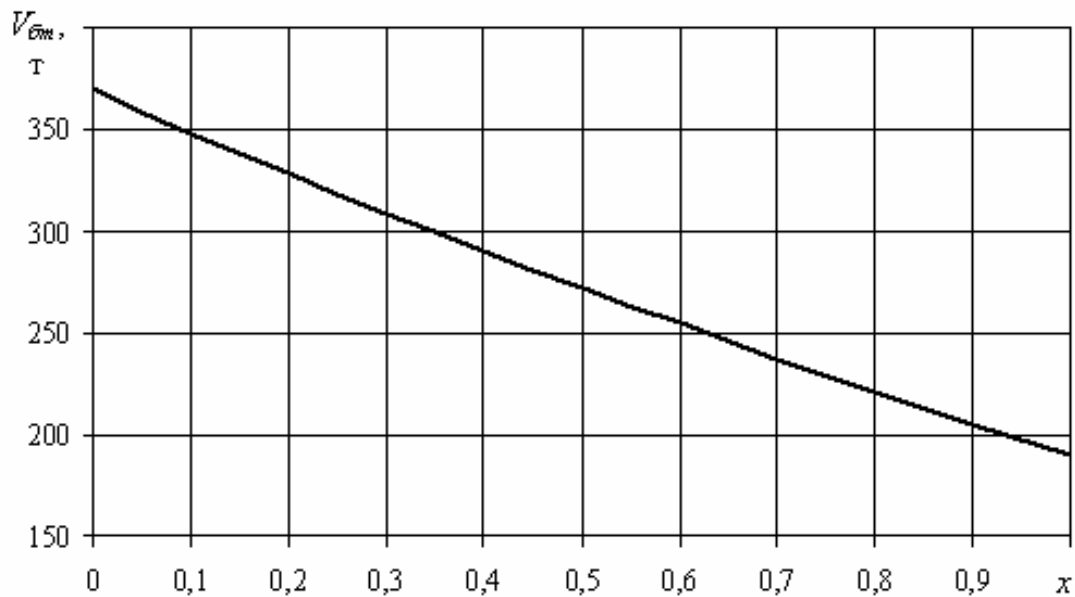


Рис. 1 – График зависимости объема аккумулирующего бункера от отношения производительностей разгрузочного питателя и подающего конвейера ( $x = m_{Q2}/m_{Q1}$ )

Однако, несмотря на это, минимальный объем бункера выбирается из условия [11]

$$V_{\bar{o}.cp} = 0$$

или, согласно (8) с учетом (13), имеем

$$m_{Q1}P_1 = m_{Q2}P_2. \quad (17)$$

Последнее равенство связано с тем, что при этом условии скорость накопления горной массы в бункере будет минимальной, а пропускная способность надбункерной и подбункерной конвейерных линий одинакова.

Из (17) имеем

$$x_m = \frac{m_{Q2}}{m_{Q1}} = \frac{P_1}{P_2}. \quad (18)$$

Тогда, подставив в (16) вместо  $x$  выражение для  $x_m$  из (18), после преобразования получим минимальный объем бункера

$$V_{\bar{o}.min} = 3m_{Q1}t_{\bar{o}} \sqrt{\frac{P_1(1-P_1)}{1 + \frac{\alpha_1}{3}t_{\bar{o}}} + \frac{P_1^2(1-P_2)}{P_2\left(1 + \frac{\alpha_2}{3}t_{\bar{o}}\right)}} \quad (19)$$

или

$$V_{\delta \min} = 3m_{Q1}t_{\delta}K_{\delta m}, \quad (20)$$

где

$$K_{\delta m} = \sqrt{\frac{P_1(1-P_1)}{1 + \frac{\alpha_1}{3}t_{\delta}} + \frac{P_1^2(1-P_2)}{P_2\left(1 + \frac{\alpha_2}{3}t_{\delta}\right)}}.$$

Кроме того, по заданной производительности надбункерной конвейерной линии  $m_{Q1}$  и значениях  $P_1$  и  $P_2$  из равенства (17) определяется производительность питателя  $Q_n$ , при которой обеспечивается минимальный объем аккумулирующего бункера

$$Q_n = m_{Q2} = m_{Q1} \frac{P_1}{P_2}. \quad (20)$$

В таблице 1 приведены минимальные значения объема аккумулирующего бункера  $V_{\delta \min}$  для различных суточных производительностей лав  $Q_{сут}$ , средних минутных грузопотоков  $Q_{ср.мин}$ , производительностей питателей  $Q_n$  при следующих значениях параметров конвейерных линий:  $\lambda_1=8,8 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ ,  $\mu_1=5 \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$ ,  $\lambda_2=2 \cdot 10^{-3} \text{ мин}^{-1}$ ,  $\mu_2=4 \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$  и при нормативном времени заполнения аккумулирующего бункера  $t_{\delta}=40 \text{ мин}$  [12]. При этом  $P_1$  и  $P_2$  при расчете приняли значения  $P_1=0,85$  и  $P_2=0,95$ .

Таблица 1 – Минимальные объемы горных бункеров

$Q_{сут}$ (Т/сут)	1000	2000	3000	4000	5000
$Q_{ср.мин}$ (Т/мин)	1,90	3,70	5,60	7,40	9,30
$Q_n$ (Т/мин)	1,65	3,21	4,86	6,42	8,07
$V_{\delta \min}$ (Т)	70	136	207	273	343

Следовательно, оптимальная вместимость аккумулирующих бункеров определяется из условия (17) и зависит от показателей надежности надбункерной и подбункерной линий, а так же времени заполнения бункера.

Рассмотрим систему транспорта, состоящую из двух параллельных надбункерных конвейерных линий и подбункерным сборным конвейером (рис. 2).

В этом случае горная масса с каждой лавы по участковым конвейерным линиям 1 и 2 с вероятностью работы каждой линии  $P_1$  и  $P_2$  поступает в бункера  $B_1$  и  $B_2$ , а затем на сборную конвейерную линию 3, вероятность работы которой равна  $P_3$ . Тогда, согласно работе [11], средние увеличения количества груза в бункерах  $B_1$  и  $B_2$  равны

$$Q_{\delta 1} = m_{Q1}P_1 - Q_{п1}P_3, \quad (22)$$

$$Q_{\delta 2} = m_{Q2}P_2 - Q_{п2}P_3, \quad (23)$$

где  $m_{Q1}$ ,  $m_{Q2}$  – минутные производительности 1 и 2 лав, соответственно, т/мин;  
 $Q_{п1}$ ,  $Q_{п2}$  – производительности питателей бункеров Б<sub>1</sub> и Б<sub>2</sub>, соответственно,  
 т/мин.

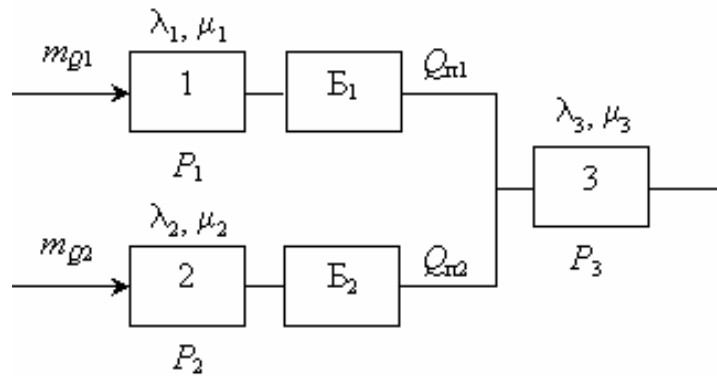


Рис. 2 – Схема системы транспорта с двумя параллельными надбункерными конвейерными линиями и подбункерным сборным конвейером

Приравнивая равенства (22) и (23) к нулю, получим условия, при которых средние объемы бункеров Б<sub>1</sub> и Б<sub>2</sub> были бы минимальными

$$m_{Q1}P_1 = Q_{п1}P_3, \quad (24)$$

$$m_{Q2}P_2 = Q_{п2}P_3. \quad (25)$$

Из последних равенств определим производительности питателей  $Q_{п1}$  и  $Q_{п2}$ :

$$Q_{п1} = m_{Q1} \frac{P_1}{P_3}, \quad (26)$$

$$Q_{п2} = m_{Q2} \frac{P_2}{P_3}. \quad (27)$$

Беря отношение левых и правых частей равенств (26) и (27), получим

$$\frac{Q_{п1}}{Q_{п2}} = \frac{m_{Q1} P_1}{m_{Q2} P_2}. \quad (28)$$

Если  $m_{Q1} = m_{Q2}$ , то из (28) имеем

$$\frac{Q_{п1}}{Q_{п2}} = \frac{P_1}{P_2}. \quad (29)$$

Следовательно, в системе транспорта с двумя параллельными конвейерными линиями с бункерами и сборным конвейером объемы бункеров будут минимальными, если выполняются условия (26) и (27).

В этом случае оптимальные объемы каждого бункера, согласно (19), опре-

деляются по формулам

$$V_{1\delta\min} = 3m_{Q1}t_{\delta} \sqrt{\frac{P_1(1-P_1)}{1 + \frac{\alpha_1}{3}t_{\delta}} + \frac{P_1^2(1-P_3)}{P_3\left(1 + \frac{\alpha_3}{3}t_{\delta}\right)}}, \quad (30)$$

$$V_{2\delta\min} = 3m_{Q2}t_{\delta} \sqrt{\frac{P_2(1-P_2)}{1 + \frac{\alpha_2}{3}t_{\delta}} + \frac{P_2^2(1-P_3)}{P_3\left(1 + \frac{\alpha_3}{3}t_{\delta}\right)}}, \quad (31)$$

где

$$\alpha_1 = \lambda_1 + \mu_1, \quad \alpha_2 = \lambda_2 + \mu_2, \quad \alpha_3 = \lambda_3 + \mu_3,$$

$$P_1 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1}, \quad P_2 = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}, \quad P_3 = \frac{\mu_3}{\lambda_3 + \mu_3}.$$

Здесь  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  – параметры экспоненциального закона распределения времени работы 1 и 2 конвейерных линий и сборного конвейера, соответственно, 1/мин;  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  – параметры экспоненциального закона распределения времени простоя 1 и 2 конвейерных линий и сборного конвейера, соответственно, 1/мин;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алотин Л.Н., Белгородский В.Л. Исследование и обоснование увеличения угледобычи при использовании аккумулирующего бункера в транспортной линии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1970. - №6. - С. 108-111.
2. Севостьянов Б.А. Задача о влиянии емкости бункеров на среднее время простоя автоматических линий станков // Теория вероятности и ее применение. - 1962. - Т. VII. - Вып. 4. - С. 438-447.
3. Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью. - М.: Советское радио, 1974. - 296 с.
4. Кариман С.А., Брайцев А.В., Шрамко В.Н. Вероятностное описание работы бункера при стационарном входящем потоке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1972. - №4. - С. 83-90.
5. Кузнецов Б.А., Эрперт А.М. Определение промежуточных емкостей в конвейерных системах методом статистического моделирования // Шахтный и карьерный транспорт. - М.: Недра, 1975. - С. 87-92.
6. Спиваковский А.О. Теория ленточных конвейеров / А.О. Спиваковский, В.Г. Дмитриев. - М.: Наука, 1982. - 192 с.
7. Шахмейстер Л.Г. Вероятностные методы расчета транспортных машин / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев. - М.: Машиностроение, 1983. - 256 с.
8. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. - М.: Наука, 1968. - 464 с.
9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. - М.: Высшая школа, 2000. - 480 с.
10. Бейкер Джон. Грейвс-Моррисс П. Аппроксимации Паде. - М.: Мир, 1986. - 502 с.
11. Кирия Р.В. Д.Д. Увеличение пропускной способности конвейерных линий при использовании аккумулирующих бункеров // Сб. науч. тр. Геотехническая механика. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. - 2007 - Вып. № 58. - С.
12. Основные положения по проектированию подземного транспорта для новых и действующих угольных шахт. - М.: ИГД им. Скочинского, 1986 - 357 с.