

Р.В. Кирия, Т.Ф. Мищенко, Ю.В. Бабенко

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМЫ ПОДЗЕМНОГО КОНВЕЙЕРНОГО
ТРАНСПОРТА УГОЛЬНЫХ ШАХТ В РЕЖИМЕ
ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ГРУЗА В
АККУМУЛИРУЮЩИХ БУНКЕРАХ**

Аннотация. На основании метода динамики средних получен алгоритм определения средней пропускной способности и средней энергоемкости системы подземного конвейерного транспорта с бункерами, работающими в режиме поддержания заданного уровня груза в них. При этом учитывались простои конвейеров и бункеров, а также самоподобие структуры системы конвейерного транспорта.

Дан анализ эффективности функционирования системы подземного конвейерного транспорта в зависимости от максимальных уровней груза в бункерах и производительностей питателей.

Ключевые слова: системы подземного конвейерного транспорта, самоподобие структуры, функционирование, бункер, заданный уровень груза, пропускная способность, энергоемкость, критерий эффективности.

Основной задачей стоящей перед подземным конвейерным транспортом угольных шахт является повышение эффективности его работы, т.е. обеспечение максимальной пропускной способности при минимальных затратах электроэнергии идущей на транспортирование горной массы.

Другими словами, при заданных грузопотоках, поступающих из лав, обеспечить максимальную пропускную способность системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт при минимальной энергоемкости транспортирования.

При этом с увеличением пропускной способности системы конвейерного транспорта угольных шахт, энергоемкость ее транспортирования увеличивается, а с уменьшением пропускной способности энергоемкость транспортирования уменьшается.

В этом случае согласно [1, 2] за критерий эффективности системы конвейерного транспорта можно принять сверстку

$$K=c_1m_c-60c_2w_c, \quad (1)$$

где m_c – средняя пропускная способность (средняя производительность) системы конвейерного транспорта, т/мин; w_c – средняя энергоемкость (средняя электроэнергия, потребляемая системой конвейерного транспорта на транспортирование горной массы, кВт; c_1, c_2 – себестоимости одной тонны угля и одного кВт электроэнергии соответственно.

Следовательно, для эффективной работы системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт необходимо, чтобы при заданных значениях грузопотоков поступающих из лав критерий эффективности K принимает максимальное значение.

Одним из путей повышения эффективности работы системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт является поддержание заданного объема груза в бункере с помощью управления скоростью питателя в частности отключения питателя при достижении заданного максимального уровня груза в бункере и отключения питателя при достижении минимального значения уровня груза в бункере. При этом поступающие в бункеры грузопотоки не выключаются и их величина меньше производительностей питателей [3].

В этом случае ставится задача определения критерия эффективности системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт в зависимости от грузопотоков, поступающих из лав, объемов аккумулирующих бункеров, скоростей питателей и простоев конвейерного оборудования.

Согласно (1), для определения критерия эффективности функционирования K необходимо вычислить среднюю пропускную способность m_c и среднюю энергоемкость транспортирования w_c системы конвейерного транспорта угольных шахт в режиме поддержания заданного уровня груза в аккумулирующих бункерах.

В работах [2, 3] на основании метода динамики средних для марковских процессов получен алгоритм определения средней пропускной способности, средней энергоемкости системы конвейерного транспорта с последовательным и параллельным соединением конвейеров с бункерами, работающими в обыкновенном режиме, т.е. без управления скоростью питателей.

В данной работе, аналогично работам [2] и [3], рассмотрен вопрос определения средней пропускной способности и средней энергоёмкости транспортирования системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт с бункерами, работающими в режиме поддержания заданного уровня груза в бункере, и на основании этого определен критерий ее эффективности.

Системы конвейерного транспорта высокопроизводительных угольных шахт имеют разветвленную самоподобную древовидную структуру, состоящую из конвейеров и бункеров.

Для определения значений m_c и w_c необходимо знать структуру системы конвейерного транспорта.

Рассмотрим сначала последовательное соединение бункеров, работающих в режиме поддержания заданного уровня груза в бункере (рис. 1).

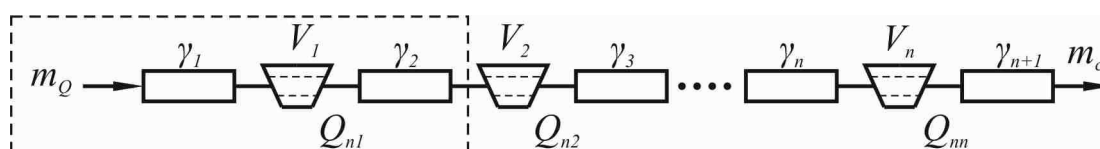


Рисунок 1 - Расчетная схема последовательного соединения бункеров

Для определения пропускной способности системы конвейерного транспорта с последовательным соединением бункеров воспользуемся свойством самоподобия ее структуры.

Выделим в этой схеме с левого края простейшую систему «конвейер – бункер – конвейер», обведенную пунктирной линией (см. рис. 1).

Согласно работам [4, 5], среднюю пропускную способность этой простейшей системы можно определить по формуле:

$$m_{c1} = \left(1 - \frac{\gamma_2}{1 + \gamma_2} e^{-\frac{\Delta V_1}{\bar{m}_{Q1}} \mu_1} \right) \bar{m}_{Q1}, \quad (2)$$

где $\bar{m}_{Q1} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}$; $\gamma_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}$; $\gamma_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$; $\Delta V_1 = V_{11} - V_{21}$ ($m_Q < Q_{n1}$).

Здесь m_Q – производительность надбункерного конвейера, т/мин; V_1 – объем бункера, м³; V_{11} , V_{21} – минимальный и максимальный объемы грузов в первом бункере, м³; γ_1 , γ_2 – коэффициенты аварийности надбункерного и подбункерного конвейеров; λ_1 , μ_1 и λ_2 , μ_2 –

параметры потоков отказов и восстановлений надбункерного и подбункерного конвейеров соответственно, 1/мин.

Продолжая этот процесс n раз (n – количество бункеров в системе), определим среднюю пропускную способность системы с последовательным соединением бункеров по рекуррентным формулам

$$m_c = m_{c_n}, \quad (3)$$

где

$$m_{c_i} = \left(1 - \frac{\gamma_{i+1}}{1 + \gamma_{i+1}} e^{-\frac{\Delta V_i \mu_i}{\bar{m}_{Q_i}}} \right) \bar{m}_{Q_i}, \quad (4)$$

$$\bar{m}_{Q_i} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_{\partial_i}} = m_{c_{i-1}}; \quad \Delta V_i = V_{1i} - V_{2i}; \quad \gamma_{\partial_i} = \frac{m_Q}{m_{c_{i-1}}} - 1; \quad m_{c_0} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1};$$

$\gamma_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$; ($i = 1, n$; $\mu_i = \mu_c$; $m_Q < Q_{n_i}$); n – количество бункеров в системе;

$\gamma_i = \lambda_i/\mu_i$ – коэффициенты аварийности конвейеров системы конвейерного транспорта; λ_i, μ_i – параметры потоков отказов и восстановлений конвейеров системы конвейерного транспорта соответственно, 1/мин; V_i – объемы бункеров, м³; V_{1i}, V_{2i} – минимальный и максимальный объемы груза в i -ом бункере.

Определим теперь для системы конвейерного транспорта с последовательным соединением бункеров, работающих в режиме заданного уровня груза в бункере, среднюю энергоемкость (см. рис. 1).

Рассмотрим сначала простейшую схему «конвейер – бункер – конвейер» и определим для нее затраты электроэнергии (мощности привода), идущей на транспортирование груза с учетом простоя конвейеров, в результате имеем:

$$w_1^{(s)} = \frac{w_0^{(s)}}{1 + \gamma_{c_0}} + w_2^{(c)}, \quad (5)$$

где $\gamma_{c_0} = \frac{m_{c_0}}{m_{c_1}} - 1$; $m_{c_0} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}$.

Здесь $w_1^{(s)}$ – мощность, потребляемая системой «бункер – конвейер – бункер», обведенной пунктирной линией, кВт; $w_0^{(s)} = w_1^{(c)}$ – мощность, потребляемая первым конвейером (кВт); $w_2^{(c)}$ – мощность, потребляемая вторым конвейером (кВт).

Продолжая этот итерационный процесс n раз, в результате получим среднюю энергоёмкость транспортирования всей системой последовательного соединенных конвейеров и бункеров, равную

$$w_c = w_n^{(s)}, \quad (6)$$

где

$$w_i^{(s)} = \frac{w_{i-1}^{(s)}}{1 + \gamma_{c_{i-1}}} + w_{i+1}^{(c)}; \quad \gamma_{c_{i-1}} = \frac{m_{c_{i-1}}}{m_{c_i}} - 1 \quad (i = 1 \dots n). \quad (7)$$

Здесь $w_{i-1}^{(s)}$ – мощность энергии, потребляемой системой последовательно соединенных конвейеров и бункеров, расположенных до i -го бункера; $w_{i+1}^{(c)}$ – мощность энергии, потребляемая $(i+1)$ -ым конвейером; $m_{c_{i-1}}$ – пропускная способность системы последовательно соединенных конвейеров и бункеров, расположенных до i -го бункера, определяемая по формуле (4).

Согласно [6], мощность i -го конвейера системы конвейерного транспорта определяется по формуле

$$w_i^{(c)} = N_i, \quad (8)$$

где

$$N_i = \frac{L_i}{1000\eta_i} [k_{1i}v_{l_i}(q'_{p_i} + q''_{p_i} + 2q_{l_i})\omega'_i \cos \alpha_i + v_{l_i}q_{\Gamma_i}(k_{1i}\omega'_i \cos \alpha_i + \sin \alpha_i)] \quad (9)$$

Здесь N_i – мощность потребляемого приводом i -го конвейера, кВт; L_i – длина i -го конвейера, м; η_i – коэффициент полезного действия привода i -го конвейера; v_{l_i} – скорость ленты i -го конвейера, м/с; q_{Γ_i} , q_{l_i} – соответственно погонные веса насыпного груза и ленты i -го конвейера, Н/м; q'_{p_i} , q''_{p_i} – соответственно погонные веса вращающихся частей роlikоопор верхних и нижних ветвей ленты i -го конвейера, Н/м; α_i – угол наклона i -го конвейера, град; k_{1i} – коэффициент, учитывающий местное сопротивление i -го конвейера; ω'_i – коэффициент сопротивления движению ленты с грузом по роlikоопорам i -го конвейера.

В формуле (9) погонная нагрузка q_{Γ_i} зависит от текущей производительности конвейера Q_i (т/ч) и определяется по формуле

$$q_{\Gamma_i} = \frac{Q_i}{0,36v_{l_i}}. \quad (10)$$

Текущая производительность i -го конвейера системы конвейерного транспорта определяется по формуле

$$Q_i = 60m_{c_{i-1}} \quad (i = 1, n+1). \quad (11)$$

Рассмотрим систему конвейерного транспорта с параллельным соединением бункеров, работающих в режиме поддержания заданного уровня груза в бункере (рис. 2).

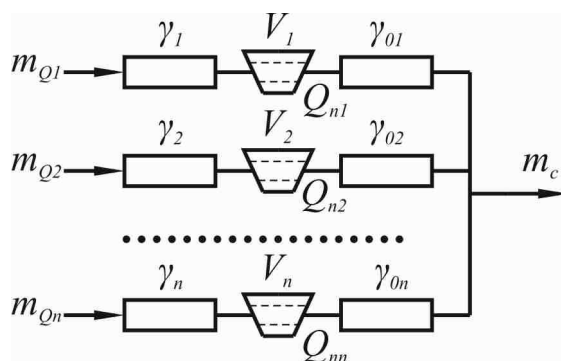


Рисунок 2 - Расчетная схема с параллельным соединением бункеров

Для этой системы, так же, как и в предыдущем случае, используя самоподобие ее структуры, в результате получим

$$m_c = \sum_{i=1}^n m_{c_i}, \quad (12)$$

где

$$m_{c_i} = \left(1 - \frac{\gamma_{0i}}{1 + \gamma_{0i}} e^{-\frac{\Delta V_i \mu_i}{\bar{m}_{Q_i}}} \right) \bar{m}_{Q_i}; \quad (13)$$

$$\bar{m}_{Q_i} = \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}; \quad \Delta V_i = V_{1i} - V_{2i} \quad (m_{Q_i} < Q_{n_i}; \quad i = 1, n; \quad \mu_c = \mu_i); \quad n - \text{ко-}$$

личество бункеров в системе; γ_i, γ_{0i} – коэффициенты аварийности надбункерного и подбункерного конвейеров.

Для древовидной веерной структуры соединения бункеров (рис. 3) среднее значение пропускной способности системы конвейерного транспорта определяется по тем же формулам (12) и (13), в которых значения коэффициентов аварийности γ_{0i} надбункерных конвейеров заменяется значением коэффициента аварийности γ_0 сборного конвейера ($\gamma_{0i} = \gamma_0, i = 1, n$).

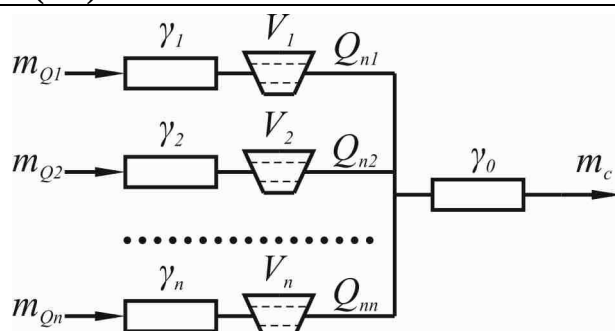


Рисунок 3 - Расчетная схема древовидной веерной структуры соединения бункеров

Энергоемкость транспортирования груза для системы конвейерного транспорта с параллельным соединением бункеров, по аналогии с системой конвейерного транспорта с последовательным соединением бункеров, определяется по рекуррентным формулам:

$$w_c = \sum_{i=1}^n w_i^{(s)}, \quad (14)$$

где

$$w_i^{(s)} = \frac{w_{0_i}^{(s)}}{1 + \gamma_{\varepsilon 0_i}} + w_{0_i}^{(c)}, \quad (15)$$

$$\gamma_{\varepsilon 0_i} = \frac{\overline{m}_{Q_i}}{1 + \gamma_i} - 1; \quad \overline{m}_{Q_i} = \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i} \quad (i = 1, n).$$

Здесь $w_{0_i}^{(s)}$, $w_{0_i}^{(c)}$ – мощности электроэнергии, идущие на транспортирование груза надбункерным и подбункерным конвейерами i -ой конвейерной линии (кВт), определяемые аналогично по формулам (8)–(10).

При этом производительности надбункерных и подбункерных конвейерных линий определяются по формулам $Q_i = 60m_{c_{0_i}}$, $Q_{0_i} = 60m_{c_i}$.

Рассмотрим систему конвейерного транспорта древовидной самоподобной структуры с бункерами, работающими в режиме поддержания заданного уровня груза (рис. 4).

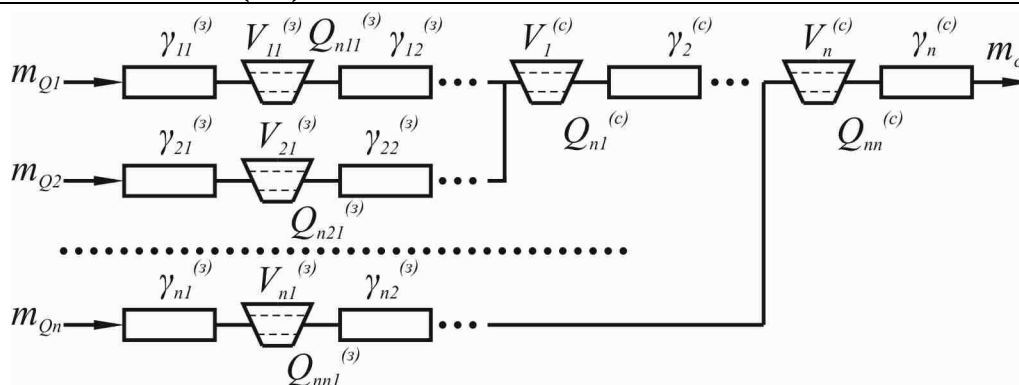


Рис. 4. Расчетная схема самоподобной древовидной структуры соединения бункеров

Обозначим через $\gamma_i^{(c)}, \gamma_{ij}^{(s)}$ – коэффициенты аварийности стволовых и забойных конвейеров соответственно; $V_i^{(c)}, V_{ij}^{(s)}$ – объемы бункеров стволовых и забойных путей, м^3 ; $Q_{n_i}^{(c)}, Q_{n_{ij}}^{(s)}$ – производительности питателей стволовых и забойных путей (т/мин), где $i = 1, n; j = 1, k_i$; k_i – количество бункеров в i -ой забойной линии; $V_{1_i}^{(c)}, V_{2_i}^{(c)}$ – максимальный и минимальный объемы груза в бункерах стволового пути, м^3 ; $V_{1_{ij}}^{(c)}, V_{2_{ij}}^{(s)}$ – максимальный и минимальный объемы груза в бункерах стволового пути, м^3 .

Согласно работе [2], пропускная способность этой системы определяется по рекуррентным формулам:

$$m_c = m_{c_n}, \quad (16)$$

где

$$m_{c_i} = \left(1 - \frac{\gamma_{i+1}^{(c)}}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)}} e^{-\frac{\Delta V_i^{(c)}}{m_i^{(s)}} \mu_i} \right) m_i^{(s)}, \quad (17)$$

$$\gamma_{\partial_i}^{(c)} = \frac{\sum_{k=1}^i m_{Q_k}}{m_i^{(s)}} - 1; \quad m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\partial_i}^{(s)}}; \quad m_{c_0} = 0;$$

$$\Delta V_i^{(c)} = V_{1_i}^{(c)} - V_{2_i}^{(c)}; \quad (\mu_i = \mu_c; i = 1, n; m_{Q_i} < Q_{n_i}).$$

Здесь $\gamma_i^{(c)}$ – коэффициенты аварийности конвейеров стволового пути; $\gamma_{\partial_i}^{(c)}$ – эквивалентные коэффициенты аварийности стволовых пу-

тей с бункерами; $\gamma_{\varepsilon_i}^{(s)}$ – эквивалентные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами;

Эффективные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами определяются по формулам:

$$\gamma_{\varepsilon_i}^{(s)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}^{(s)}} - 1, \quad (\gamma_{\varepsilon_1}^{(c)} = \gamma_{\varepsilon_1}^{(s)}, \quad i = 1, n), \quad (18)$$

где $m_{c_i}^{(s)}$ – средняя пропускная способность i -го забойного пути системы конвейерного транспорта с бункерами, определяемая аналогично по формулам (3) и (4).

Аналогично, как и при последовательном соединении конвейеров и бункеров, учитывая самоподобие древовидной системы конвейерного транспорта, получим рекуррентные формулы для определения средней энергоемкости транспортирования w_c системы конвейерного транспорта самоподобной древовидной структуры с бункерами (см. рис. 2) в виде:

$$w_c = w_n^{(s)}, \quad (19)$$

где

$$w_i^{(s)} = \frac{w_{i-1}^{(s)}}{1 + \gamma_{\varepsilon_{i-1}}^{(c)}} + w_{i+1}^{(c)} + w_{i+1}^{(s)}, \quad (i=1, n), \quad (20)$$

$$\gamma_{\varepsilon_{i-1}}^{(c)} = \frac{m_i^{(s)}}{m_{c_i}} - 1; \quad m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\varepsilon_i}^{(s)}}; \quad \gamma_{\varepsilon_i}^{(s)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}} - 1 \quad (w_0^{(s)} = w_1^{(s)};$$

$$w_i^{(c)} = N_i^{(c)}).$$

Здесь $w_i^{(s)}$ – мощность электроэнергии, потребляемой системой конвейерного транспорта на транспортирование горной массы на участке до $i+1$ бункера стволовой линии; $w_i^{(c)}$ – мощность электроэнергии, потребляемая i -м конвейером стволовой линии на транспортирование горной массы; $w_i^{(s)}$ – мощность электроэнергии, потребляемая i -м конвейером забойной линии на транспортирование горной массы; $\gamma_{\varepsilon_i}^{(s)}$ – эквивалентный коэффициент аварийности i -ой забойной конвейерной линии; $N_i^{(c)}$ – мощность привода i -го конвейера стволовой конвейерной линии, идущая на транспортирование горной массы, кВт; m_{Q_i} – средняя производительность i -го забоя, т/мин.

Кроме того, $w_i^{(s)}$ для каждой забойной конвейерной линии определяется согласно рекуррентным соотношениям (7), полученным для последовательного соединения конвейеров и бункера.

На основании полученных рекуррентных соотношений для систем подземного конвейерного транспорта самоподобной древовидной структуры были получены средние значения пропускной способности, энергоемкости транспортирования, а также критерий эффективности по формулам (16)–(20) и (1).

В таблице 1 представлены исходные данные и результаты расчета указанных показателей для случая $m_{Q_i} < Q_{n_i}$. При этом в расчетах принимались стоимость 1 т угля $c_1 = 1200$ грн., стоимость 1 кВт электроэнергии $c_2 = 0,37$ грн.

Расчеты показали, что для системы подземного конвейерного транспорта древовидной структуры с бункерами, работающими в режиме поддержания заданного уровня груза в них, увеличение объемов бункеров стволового пути мало сказывается на величине коэффициента эффективности. При этом с уменьшением максимальных уровней грузов в бункерах забойных путей критерий эффективности системы конвейерного транспорта увеличивается.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета показателей эффективности системы конвейерного транспорта в случае управления бункерами ($n=5; k_i = 5$)

m_{Q_i} , т/мин	$Q_{n_i}^{(c)}$, т/мин	$Q_{n_{ij}}^{(s)}$, т/мин	$\gamma_i^{(c)}$	$\gamma_{ij}^{(s)}$	μ_i , 1/мин	$V_i^{(c)}$, м ³	$V_{2i}^{(c)}$, м ³	$V_{2ij}^{(s)}$, т/мин	$V_{ij}^{(s)}$, т/мин	m_c , т/мин	w_c , кВт	K , тыс. грн/ мин
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	500,0	100,0	100,0	20,0	17,2	868,7	1,3
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	500,0	100,0	100,0	20,0			
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	500,0	100,0	100,0	20,0			
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	500,0	100,0	100,0	20,0			
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	500,0	100,0	100,0	20,0			

Выводы. На основании метода динамики средних получен алгоритм определения средней пропускной способности и средней энергоемкости систем подземного конвейерного транспорта с бункерами, работающими в режиме поддержания заданного уровня груза в них. При этом учитывались простои конвейеров и бункеров, а также самоподобие структуры системы конвейерного транспорта.

Определен критерий эффективности функционирования системы подземного конвейерного транспорта при различных соотношении-

ях поступающих из лав грузопотоков и производительностей питателей бункеров.

При этом установлено, что критерий эффективности систем конвейерного транспорта с бункерами, работающими в режиме поддержания заданного уровня груза в них, больше на 15-30 %, чем критерий эффективности той же системы конвейерного транспорта с неуправляемыми бункерами.

Управляемыми параметрами, существенно влияющими на эффективность функционирования систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт, являются максимальные объемы уровней груза в бункерах и производительности питателей. При этом с уменьшением максимальных объемов уровней груза в бункерах критерий эффективности систем конвейерного транспорта увеличивается, а с увеличением производительностей питателей критерий эффективности сначала уменьшается, а затем увеличивается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирия Р. В. Адаптивное управление конвейерными линиями горных предприятий / Р. В. Кирия, В. Ф. Монастырский, В. Ю. Максютенко // Форум гірників–2011: Матеріали міжнарод. конф., 12–15 жовтня 2011 р. – Днепропетровск: Національний гірничий університет, 2011. – С. 87–95.
2. Кирия Р. В. Определение критерия эффективности функционирования систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия // Наукові вісті «Сучасні проблеми металургії». – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. – № 16. – С. 16–21.
3. Кирия Р. В. Математические модели функционирования систем конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2014. – Випуск 1. – С. 146–158.
4. Кирия Р. В. Математическая модель функционирования аккумулирующего бункера в режиме поддержания в нем объема груза в заданных пределах Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. – Дніпропетровськ: НметАУ. – 2012. – №15. – С. 85–96.
5. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
6. Шахмейстер, Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.