

Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко  
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
СИСТЕМ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА  
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

*Аннотация.* На основании метода динамики средних для марковских процессов разработана математическая модель функционирования систем конвейерного транспорта с последовательным и параллельным соединением конвейеров и бункеров, а также с древовидной веерной и самоподобной структурами. В результате для этих систем конвейерного транспорта получен рекуррентный алгоритм определения их пропускной способности при различных соотношениях поступающих из лав грузопотоков и производительностей питателей. Получены оценки минимальных и максимальных значений пропускной способности рассмотренных систем конвейерного транспорта, приведен пример расчета.

*Ключевые слова:* системы конвейерного транспорта, бункер, марковская модель, функционирование, пропускная способность, самоподобная структура.

Системы конвейерного транспорта угольных шахт имеют сложную разветвленную структуру, состоящую из конвейеров и бункеров, связанных между собой с помощью питателей, перегружателей и перегрузочных узлов. Отказы конвейеров часто приводят к простоям лав и, как следствие, к снижению производительности системы конвейерного транспорта.

Для повышения пропускной способности систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт из-за ограниченности пространства широкое применение получили аккумулирующие бункеры (временное резервирование) [1, 2]. Однако эффективное применение аккумулирующих бункеров ограничивается отсутствием математического и программного обеспечения, позволяющего оптимизировать процессы функционирования систем конвейерного транспорта.

В настоящее время разработаны математические модели функционирования систем конвейерного транспорта без бункеров, применяемым, в основном, на открытых разработках полезного ископаемого [3, 4].

Вопросами моделирования функционирования систем конвейерного транспорта с бункерами занимались многие исследователи [1, 5–7].

При этом полученные математические модели функционирования системы конвейерного транспорта, в основном, касались системы с простой структурой «конвейер – бункер – конвейер».

Для систем конвейерного транспорта с более сложной структурой были получены имитационные модели. В работе [8] получены математические модели надежности сложных многофункциональных автоматических систем с бункерами, которые непосредственно невозможно использовать для определения пропускной способности разветвленной системы конвейерного транспорта с бункерами.

В статье разработаны математические модели функционирования систем подземного конвейерного транспорта с последовательным и параллельным соединением бункеров, а также самоподобной древовидной структуры.

В основе математической модели положен метод динамики средних для марковских процессов [9], в которой элементарная система «конвейер – бункер – конвейер» заменяется элементом (конвейером) с эквивалентными параметрами потоков отказов и восстановлений.

Анализ систем конвейерного транспорта угольных шахт показал, что в основном они имеют самоподобную древовидную структуру. Другими словами, структурную схему конвейерного транспорта можно разбить на иерархические уровни. При этом каждый уровень повторяет один и тот же граф. Такие геометрические структуры, согласно [10], называются древовидными фракталами.

На рис. 1 показаны типичные схемы подземного конвейерного транспорта угольных шахт с последовательным и параллельным соединением бункеров, а также системы конвейерного транспорта с бункерами древовидной структуры.

Древовидную структуру подземного конвейерного транспорта угольных шахт можно объяснить цикличностью технологии добычи угля: проходка – добыча – проходка. В результате каждый новый участок конвейерного транспорта подсоединяется к уже существующей системе, образованной в результате множества циклов добычи угля. Этот процесс можно сравнить с процессом роста дерева, где циклом является весна – лето – осень.

Поэтому математическое моделирование будет касаться именно таких типов систем конвейерного транспорта.

Как было показано в работах [3, 11], одним из основных показателей функционирования систем конвейерного транспорта являются средние значения пропускной способности  $m_c$ , определяемые по формуле

$$m_c = \sum_{i=0}^s P_i Q_i, \quad (1)$$

где  $P_i$  – вероятность того, что система конвейерного транспорта находится в  $i$ -ом состоянии;  $Q_i$  – производительность системы конвейерного транспорта, находящейся в  $i$ -ом состоянии;  $s$  – количество возможных состояний системы конвейерного транспорта при остановках или отказах конвейеров.

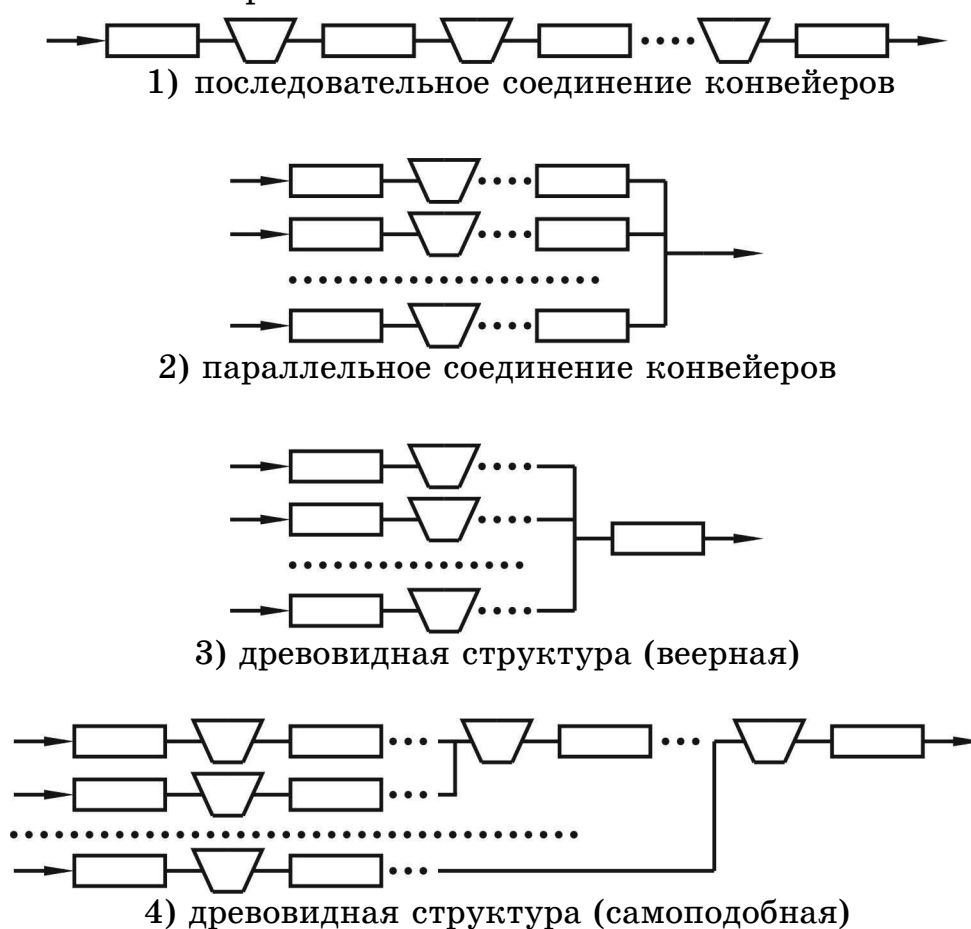


Рисунок 1 - Структурные схемы подземного конвейерного транспорта угольных шахт с бункерами

Как видно из формулы (1), для определения значения  $m_c$  необходимо знать структуру системы конвейерного транспорта, из которой определяется количество возможных состояний системы  $s$  и веро-

ятности  $P_i$  нахождения системы транспорта в каждом  $i$ -ом состоянии ( $i = 1, s$ ).

Рассмотрим сначала последовательное соединение бункеров (рис. 2).

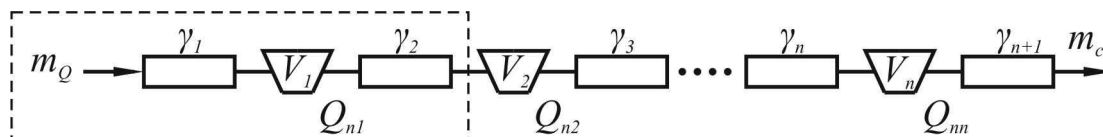


Рисунок 2 - Расчетная схема последовательного соединения бункеров

Для получения математических моделей функционирования систем конвейерного транспорта с бункерами воспользуемся свойством самоподобия структуры последовательного соединения бункеров.

Выделим в этой схеме с левого края простейшую систему «конвейер – бункер – конвейер», обведенную пунктирной линией (рис. 2).

Согласно работе [12], среднюю пропускную способность этой простейшей системы можно определить по формуле:

при  $m_Q > Q_{n1}$

$$m_{c1} = \frac{\left[ \frac{e^{A_{11}\gamma V_1}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_{Q_1}}{(\bar{m}_{Q_1} - Q_{n1})} (e^{A_{11}\gamma V_1} - 1) \right]}{\left[ 1 + \frac{e^{A_{11}\gamma V_1}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_{Q_1}}{(\bar{m}_{Q_1} - Q_{n1})} (e^{A_{11}\gamma V_1} - 1) \right]} \bar{Q}_{n1}, \quad (2)$$

где  $m_Q$  – производительность надбункерного конвейера;  $Q_{n1}$  – производительность питателя;  $V_1$  – объем питателя;  $\gamma$  – удельный вес груза;

$$A_{11} = \frac{\mu_1 [m_Q - (1 + \gamma_1) \bar{Q}_{n1}]}{(m_Q - \bar{Q}_{n1}) \bar{Q}_{n1}}; \quad \bar{m}_{Q_1} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \quad \bar{Q}_{n1} = \frac{Q_{n1}}{1 + \gamma_2}; \quad \gamma_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1};$$

$\gamma_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$ ;  $\gamma_1, \gamma_2$  – коэффициенты аварийности надбункерного и подбункерного конвейеров;  $\lambda_1, \mu_1$  и  $\lambda_2, \mu_2$  – параметры потоков отказов и восстановлений надбункерного и подбункерного конвейеров соответственно;

при  $m_Q \leq Q_{n_1}$

$$m_{c_1} = \left[ \frac{1 + \frac{(Q_{n_1} - \bar{Q}_{n_1})}{(\bar{Q}_{n_1} - \bar{m}_{Q_1})} (1 - e^{A_{21}\gamma V_1})}{1 + \gamma_2 e^{A_{21}\gamma V_1} + \frac{(Q_{n_1} - \bar{Q}_{n_1})}{(\bar{Q}_{n_1} - \bar{m}_{Q_1})} (1 - e^{A_{21}\gamma V_1})} \right] \bar{m}_{Q_1}, \quad (3)$$

где  $A_{21} = \frac{\mu_2 [\bar{m}_{Q_1} (1 + \gamma_2) - Q_{n_1}]}{\bar{m}_{Q_1} (Q_{n_1} - \bar{m}_{Q_1})}$ .

Рассмотрим теперь систему последовательного соединения двух первых бункеров схемы последовательного соединения бункеров (рис. 3).

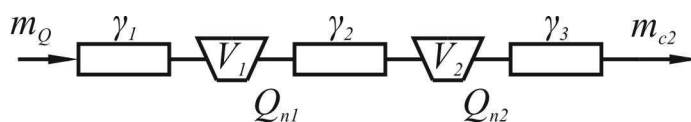


Рисунок 3 - Система последовательного соединения двух первых бункеров

Заменяем эту схему простейшей эквивалентной схемой «бункер – конвейер – бункер», у которой на вход надбункерного конвейера поступает груз средней производительностью  $m_Q$  (рис. 4).

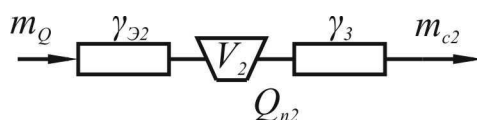


Рисунок 4 - Эквивалентная схема «бункер – конвейер – бункер»

Коэффициент аварийности надбункерного конвейера равен некоторому эквивалентному значению  $\gamma_{э2}$ . Среднее значение пропускной способности  $m_{c_2}$  на выходе из этой эквивалентной системы, согласно [12], определяется по формулам:

при  $m_Q > Q_{n_2}$

$$m_{c_2} = \left[ \frac{\frac{e^{A_{12}\gamma V_2}}{\gamma_{э2}} + \frac{\bar{m}_{Q_2}}{(\bar{m}_{Q_2} - Q_{n_2})} (e^{A_{12}\gamma V_2} - 1)}{1 + \frac{e^{A_{12}\gamma V_2}}{\gamma_{э2}} + \frac{\bar{m}_{Q_2}}{(\bar{m}_{Q_2} - Q_{n_2})} (e^{A_{12}\gamma V_2} - 1)} \right] \bar{Q}_{n_2}, \quad (4)$$

где  $A_{12} = \frac{\mu_1[m_Q - (1 + \gamma_{\varepsilon_2})\bar{Q}_{n_2}]}{(m_Q - \bar{Q}_{n_2})\bar{Q}_{n_2}}$ ;  $\bar{m}_{Q_2} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_{\varepsilon_2}}$ ;  $\bar{Q}_{n_2} = \frac{Q_{n_2}}{1 + \gamma_3}$ ;

$$\gamma_{\varepsilon_2} = \frac{m_Q}{m_{c_1}} - 1; \gamma_3 = \frac{\lambda_3}{\mu_3};$$

при  $m_Q \leq Q_{n_2}$

$$m_{c_2} = \left[ \frac{1 + \frac{(Q_{n_2} - \bar{Q}_{n_2})}{(\bar{Q}_{n_2} - \bar{m}_{Q_2})} (1 - e^{A_{22}\gamma V_2})}{1 + \gamma_3 e^{A_{22}\gamma V_2} + \frac{(Q_{n_2} - \bar{Q}_{n_2})}{(\bar{Q}_{n_2} - \bar{m}_{Q_2})} (1 - e^{A_{22}\gamma V_2})} \right] \bar{m}_{Q_2}, \quad (5)$$

где  $A_{22} = \frac{\mu_2[\bar{m}_{Q_2}(1 + \gamma_3) - Q_{n_2}]}{\bar{m}_{Q_2}(Q_{n_2} - \bar{m}_{Q_2})}$ ;  $\bar{m}_{Q_2} = m_{c_1}$ ;  $\bar{Q}_{n_2} = \frac{Q_{n_2}}{1 + \gamma_3}$ .

Продолжая этот процесс  $n$  раз ( $n$  – количество бункеров в системе), приходим к рекуррентным формулам:

при  $m_Q > Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[ \frac{\frac{e^{A_{1i}\gamma V_i}}{\gamma_{\varepsilon_i}} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - Q_{n_i})} (e^{A_{1i}\gamma V_i} - 1)}{1 + \frac{e^{A_{1i}\gamma V_i}}{\gamma_{\varepsilon_i}} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - Q_{n_i})} (e^{A_{1i}\gamma V_i} - 1)} \right] \bar{Q}_{n_i}, \quad (6)$$

где  $A_{1i} = \frac{\mu_c[m_Q - (1 + \gamma_{\varepsilon_i})\bar{Q}_{n_i}]}{(m_Q - \bar{Q}_{n_i})\bar{Q}_{n_i}}$ ;  $\bar{m}_{Q_i} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_{\varepsilon_i}} = m_{c_{i-1}}$ ;  $\bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{i+1}}$ ;

$$\gamma_{\varepsilon_i} = \frac{m_Q}{m_{c_{i-1}}} - 1; \gamma_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}; (i = 1, n; m_{c_0} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \mu_c = \mu_i);$$

при  $m_Q \leq Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[ \frac{1 + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i}\gamma V_i})}{1 + \gamma_{i+1} e^{A_{2i}\gamma V_i} + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i}\gamma V_i})} \right] \bar{m}_{Q_i}, \quad (7)$$

где  $A_{2i} = \frac{\mu_c[\bar{m}_{Q_i}(1 + \gamma_{i+1}) - Q_{n_i}]}{\bar{m}_{Q_i}(Q_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})}$ ;  $\bar{m}_{Q_i} = m_{c_{i-1}}$ ;  $\bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{i+1}}$ ; ( $i = 1, n$ ;

$$m_{c_0} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \mu_c = \mu_i).$$

При этом пропускная способность всей системы конвейерного транспорта с последовательным соединением бункеров определяется на  $n$ -ой итерации по формуле:

$$m_c = m_{c_n}, \tag{8}$$

где  $n$  – количество бункеров в системе.

Рассмотрим систему конвейерного транспорта с параллельным соединением бункеров (рис. 5).

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

при  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[ \frac{\frac{e^{A_{1i}\gamma V_i}}{\gamma_i} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - \bar{Q}_{n_i})} (e^{A_{1i}\gamma V_i} - 1)}{1 + \frac{e^{A_{1i}\gamma V_i}}{\gamma_i} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - \bar{Q}_{n_i})} (e^{A_{1i}\gamma V_i} - 1)} \right] \bar{Q}_{n_i}, \tag{9}$$

где  $A_{1i} = \frac{\mu_c [m_{Q_i} - (1 + \gamma_i)\bar{Q}_{n_i}]}{(\bar{m}_{Q_i} - \bar{Q}_{n_i})\bar{Q}_{n_i}}$ ;  $\bar{m}_{Q_i} = \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}$ ;  $\bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{0i}}$ ;  $\gamma_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$ ;

при  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[ \frac{1 + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i}\gamma V_i})}{1 + \gamma_{0i} e^{A_{2i}\gamma V_i} + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i}\gamma V_i})} \right] \bar{m}_{Q_i}, \tag{10}$$

где  $A_{2i} = \frac{\mu_c [\bar{m}_{Q_i} (1 + \gamma_{0i}) - Q_{n_i}]}{\bar{m}_{Q_i} (Q_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})}$ ;  $\bar{m}_{Q_i} = \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}$ ;  $\bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{0i}}$ ;  $i = 1, n$ ;

$\mu_c = \mu_i$ .

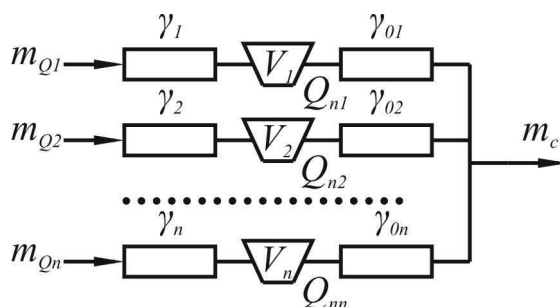


Рисунок 5 - Расчетная схема с параллельным соединением бункеров

При этом пропускная способность всей системы конвейерного транспорта с параллельным соединением бункеров определяется по формуле:

$$m_c = \sum_{i=1}^n m_{c_i}, \quad (11)$$

где  $n$  – количество бункеров в системе.

Для древовидной веерной структуры соединения бункеров (рис. 6) среднее значение пропускной способности системы конвейерного транспорта определяется по тем же формулам (9) и (10), в которых значения коэффициентов аварийности  $\gamma_{0_i}$  надбункерных конвейеров заменяется значением коэффициента аварийности  $\gamma_0$  сборного конвейера ( $\gamma_{0_i} = \gamma_0, i = 1, n$ ).

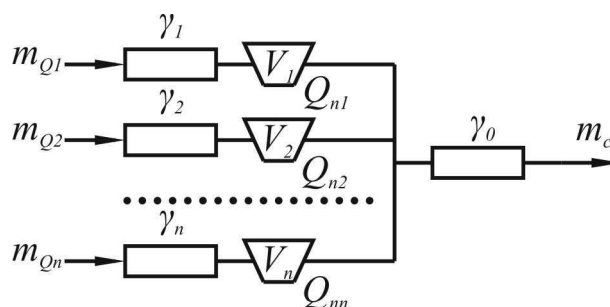


Рисунок 6 - Расчетная схема веерной структуры соединения бункеров

Рассмотрим систему конвейерного транспорта самоподобной древовидной структуры с бункерами (рис. 7).

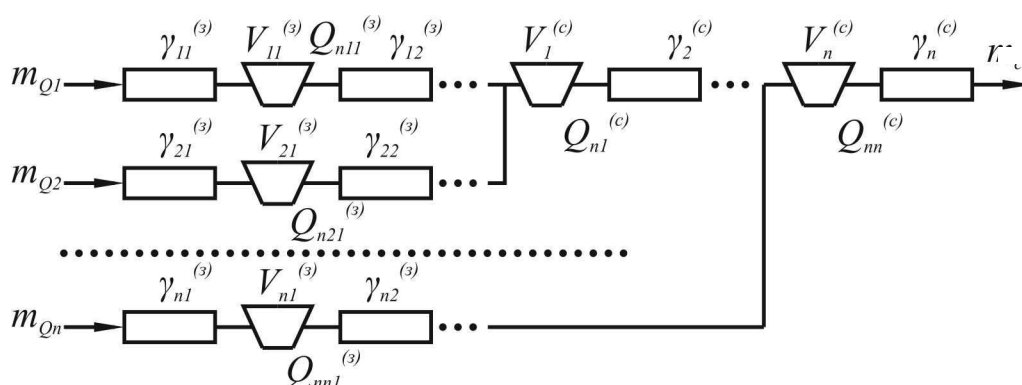


Рисунок 7 - Расчетная схема самоподобной древовидной структуры соединения бункеров

Для этой системы, используя так же, как и в предыдущих случаях, самоподобие структуры, получим рекуррентные соотношения, определяющие среднюю пропускную способность системы:



при  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \frac{\left[ \frac{e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}}}{\gamma_{\partial_i}^{(c)}} + \frac{m_i^{(s)}}{(m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})} \left( e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} - 1 \right) \right]}{\left[ 1 + \frac{e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}}}{\gamma_{\partial_i}^{(c)}} + \frac{m_i^{(s)}}{(m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})} \left( e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} - 1 \right) \right]} \bar{Q}_{n_i}^{(c)}, \quad (12)$$

где  $A_{1i} = \frac{\mu_c [m_i^{(s)}(1 + \gamma_{\partial_i}^{(c)}) - (1 + \gamma_{\partial_i}^{(c)})\bar{Q}_{n_i}^{(c)}]}{[m_i^{(s)}(1 + \gamma_{\partial_i}^{(c)}) - \bar{Q}_{n_i}^{(c)}]\bar{Q}_{n_i}^{(c)}}; \gamma_{\partial_i}^{(c)} = \frac{\sum_{k=1}^i m_{Q_k}}{m_i^{(s)}} - 1;$

$$m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\partial_i}^{(s)}}; \bar{Q}_{n_i}^{(c)} = \frac{Q_{n_i}^{(c)}}{1 + \gamma_{\partial_{i+1}}^{(c)}}; m_{c_0} = 0; \mu_c = \mu_i; i = 1, n;$$

$\gamma_i^{(c)}$  – коэффициенты аварийности стволовых путей с бункерами;  $\gamma_{\partial_i}^{(c)}$  – эквивалентные коэффициенты аварийности стволовых путей с бункерами;  $\gamma_{\partial_i}^{(s)}$  – эквивалентные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами;

при  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \frac{\left[ 1 + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} \left( 1 - e^{A_{2i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} \right) \right]}{\left[ 1 + \gamma_{\partial_{i+1}}^{(c)} e^{A_{2i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} \left( 1 - e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} \right) \right]} m_i^{(s)}, \quad (13)$$

где  $A_{2i} = \frac{\mu_c [m_i^{(s)}(1 + \gamma_{\partial_{i+1}}^{(c)}) - Q_{n_i}^{(c)}]}{m_i^{(s)}(Q_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})}, (\mu_c = \mu_i; i = 1, n).$

Здесь эффективные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами определяются по формулам:

$$\gamma_{\partial_i}^{(s)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}^{(s)}} - 1, (\gamma_{\partial_1}^{(c)} = \gamma_{\partial_1}^{(s)}, i = 1, n), \quad (14)$$

где  $m_{c_i}^{(s)}$  – средние пропускные способности  $i$ -го забойного пути системы конвейерного транспорта с бункерами, определяемые аналогично по формулам (6) и (7).

Средние пропускные способности забойных путей  $m_{c_i}^{(з)}$  определяются по формулам (6)–(8) для последовательного соединения забойных конвейеров с бункерами.

Для определения минимального и максимального значений пропускной способности рассмотренных выше систем конвейерного транспорта с бункерами положим в выше полученных рекуррентных формулах значения  $V_i = 0$  и  $V_i \rightarrow \infty$  соответственно для минимального и максимального значений. В результате получим:

– для последовательного соединения бункеров:

при  $m_Q > Q_{n_i}$

$$\frac{Q_{n_1} \cdot Q_{n_2} \cdot \dots \cdot Q_{n_n}}{m_Q^{n-1} \cdot \prod_{i=1}^{n+1} (1 + \gamma_i)} \leq m_c \leq \frac{Q_{n_n}}{1 + \gamma_{n+1}}; \quad (15)$$

при  $m_Q \leq Q_{n_i}$

$$\frac{m_Q}{\prod_{i=1}^{n+1} (1 + \gamma_i)} \leq m_c \leq \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \quad (16)$$

– для параллельного соединения бункеров

при  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_{n_i}}{(1 + \gamma_i)(1 + \gamma_{0_i})} \leq m_c \leq \sum_{i=1}^n \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{0_i}}; \quad (17)$$

при  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$\sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{(1 + \gamma_i)(1 + \gamma_{0_i})} \leq m_c \leq \sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}; \quad (18)$$

– для веерного соединения бункеров

при  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$\frac{1}{1 + \gamma_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_i} \leq m_c \leq \frac{1}{1 + \gamma_0} \sum_{i=1}^n Q_{n_i}; \quad (19)$$

при  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$\frac{1}{1 + \gamma_0} \sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i} \leq m_c \leq \sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}; \quad (20)$$

– для самоподобного соединения бункеров с древовидной структурой

при  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$m_c^{(0)} \leq m_c \leq \frac{Q_{n_n}}{1 + \gamma_{n+1}^{(c)}}; \quad (21)$$

при  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$m_n^{(t)} \leq m_c \leq \sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{i_1}^{(s)}}, \quad (22)$$

где  $m_c^{(0)}$  – средняя пропускная способность системы конвейерного транспорта древовидной самоподобной структуры при  $V_i^{(c)} = 0$ , и  $V_{ij}^{(s)} = 0$ ;  $m_n^{(t)}$  – пропускная способность системы конвейерного транспорта с древовидной самоподобной структурой без бункеров [3].

Пропускная способность  $m_n^{(t)}$ , согласно работе [3], определяется по рекуррентным формулам:

$$m_n^{(t)} = \frac{m_{n-1}^{(t)}}{1 + \gamma_{n+1}^{(c)}}, \quad (23)$$

$$\text{где } m_{n-1}^{(t)} = \frac{m_{n-2}^{(t)}}{1 + \gamma_n^{(c)}} + \frac{m_{Q_n}}{1 + \gamma_{\varepsilon_n}^{(s)}}; \quad m_1^{(t)} = \frac{m_0^{(t)}}{1 + \gamma_2^{(c)}} + \frac{m_{Q_2}}{1 + \gamma_{\varepsilon_2}^{(s)}};$$

$$m_0^{(t)} = \frac{m_{Q_1}}{1 + \gamma_{\varepsilon_1}^{(s)}}.$$

Здесь  $m_i^{(t)}$  – средняя пропускная способность системы конвейерного транспорта с древовидной самоподобной структурой без бункеров после  $i$ -й итерации;  $\gamma_{\varepsilon_i}^{(s)}$  – эквивалентный коэффициент аварийности забойных путей без бункеров, определяемый по формулам (14) при  $V_{ij}^{(s)} = 0$  ( $i=1, n; j=1, k_i, k_i$  – количество бункеров в  $i$ -ом забойном пути).

На основании полученных аналитических выражений были проведены расчеты пропускной способности систем конвейерного транспорта самоподобной древовидной структуры с бункерами (см. рис. 7).

При этом исходные данные и результаты расчета представлены в таблицах 1 и 2.

В таблицах 1 и 2 показаны результаты расчета пропускной способности по формулам (13) и (14) для  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$  и  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$  соответственно.

Из таблиц 1 и 2 видно, что при  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$  пропускная способность систем конвейерного транспорта в пять раз выше, чем при  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$ .

Расчеты на основе полученных зависимостей показали, что с увеличением объемов аккумулирующих бункеров пропускная способность систем конвейерного транспорта любой структуры увеличивается, а при значениях объемов бункеров  $V_i^{(c)} \geq 500 \text{ м}^3$  и  $V_i^{(з)} \geq 500 \text{ м}^3$  пропускная способность практически не изменяется.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета пропускной способности в случае  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$  ( $n=5; k_i = 5$ )

$m_{Q_i}$ , Т/МИН	$Q_{n_i}^{(c)}$ , Т/МИН	$Q_{n_i}^{(з)}$ , Т/МИН	$\gamma_i^{(c)}$	$\gamma_{ij}^{(з)}$	$\mu_i$ , 1/МИН	$V_i^{(c)}$ , м <sup>3</sup>	$V_{ij}^{(з)}$ , Т/МИН	$m_i^{(s)}$ , Т/МИН	$m_c$ , Т/МИН
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	3,14	4,42
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,56	
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,57	
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,48	
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,42	

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета пропускной способности в случае  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$  ( $n=5; k_i = 5$ )

$m_{Q_i}$ , Т/МИН	$Q_{n_i}^{(c)}$ , Т/МИН	$Q_{n_i}^{(з)}$ , Т/МИН	$\gamma_i^{(c)}$	$\gamma_{ij}^{(з)}$	$\mu_i$ , 1/МИН	$V_i^{(c)}$ , м <sup>3</sup>	$V_{ij}^{(з)}$ , Т/МИН	$m_i^{(s)}$ , Т/МИН	$m_c$ , Т/МИН
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,28	20,69
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	8,53	
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	12,61	
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	16,75	
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	20,69	

Кроме того, расчеты предельных оценок пропускной способности заданной системы конвейерного транспорта самоподобной древо-видной структуры показали, что в случае  $m_{Q_i} = 5,6$  т/мин и

$Q_{n_i} = 5$  т/мин ( $m_{Q_i} > Q_{n_i}$ ) пропускная способность принимает минимальное значение  $m_{c \min} = m_c^{(0)} = 0,25$  т/мин при  $V_i^{(c)} = V_{ij}^{(z)} = 0$  и максимальное значение  $m_{c \max} = 4,82$  т/мин при  $V_i^{(c)} = V_{ij}^{(z)} = \infty$ .

При  $m_{Q_i} = 5,6$  т/мин и  $Q_{n_i} = 6$  т/мин ( $m_{Q_i} < Q_{n_i}$ ) пропускная способность принимает минимальное значение  $m_{c \min} = m_c^{(t)} = 8,72$  т/мин при  $V_i^{(c)} = V_{ij}^{(z)} = 0$  и максимальное значение  $m_{c \max} = 23,47$  т/мин при  $V_i^{(c)} = V_{ij}^{(z)} = \infty$ .

**Выводы.** На основе метода динамики средних для марковских процессов получены математические модели функционирования системы конвейерного транспорта с последовательным и параллельным соединением бункеров, а также с древовидной веерной и самоподобной структурой, позволяющие определить пропускную способность системы конвейерного транспорта угольных шахт.

При этом установлено, что если средние производительности поступающих из лав грузопотоков  $m_{Q_i}$  больше производительности питателей  $Q_{n_i}$  ( $m_{Q_i} \geq Q_{n_i}$ ), то пропускная способность системы конвейерного транспорта намного меньше пропускной способности в случае если  $m_{Q_i} < Q_{n_i}$ .

Кроме того, с увеличением объемов аккумулирующих бункеров до определенного значения пропускная способность систем конвейерного транспорта увеличивается, а при значениях объемов бункера свыше этого значения – практически не изменяется.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Системы подземного транспорта на угольных шахтах / В. А. Пономаренко, Е. Л. Креймер, Г. А. Дунаев [и др.]. – М.: Недра, 1975. – 309 с.
2. Черкесов Г. Н. Надежность технических систем с временной избыточностью / Г. Н. Черкесов. – М.: Советское радио, 1974. – 296 с.
3. Кирия Р. В. Применение фракталов к определению пропускной способности систем конвейерного транспорта горных предприятий / Р. В. Кирия // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010. – Випуск 2(67). – С. 167–174.
4. Спиваковский А.О. Карьерный конвейерный транспорт / А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов, Г.В. Приседский. – М.: Недра, 1979. – 264 с.
5. Алотин Л. М. Моделирование и расчет транспортных систем горных предприятий / Л. М. Алотин, П. Б. Степанов. – Алма-Ата: Наука, КазССР, 1979. – 214 с.
6. Степанов П. Б. Надежность многобункерных конвейерных линий / П. Б. Степанов, Л. М. Алотин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1978. – №1. – С. 94-99.
7. Климов Б. Г. Оценка эффективности функционирования шахтных транспортных систем с бункерами / Б. Г. Климов, В. Я. Богуславский // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1976. – № 5. – С. 93–96.
8. Копп В. Я. Моделирование автоматизированных производственных систем / В. Я. Копп. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 700 с.
- 9.9. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие. 5-е изд. / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: КНОРУС, 2011. – 448 с.
10. Шредер Н. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая / Н. Шредер. – Ижевск: НИЦ, 2005. – 528 с.
11. 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.
12. Кирия Р. В. Разработка быстрого алгоритма определения пропускной способности системы «конвейер – бункер – конвейер» / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2013. – Випуск 1. – С. 146–158.