

**Кирия Р.В.**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
СИСТЕМ ПОДЗЕМНОГО КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА  
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

**Kiriy R.V.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.  
(ІГТМ НАН України)

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ  
ПІДЗЕМНОГО КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ**

**R.V. Kiriya**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

**DETERMINATION OF POWER EFFICIENCY OF SYSTEMS OF  
UNDERGROUND CONVEYER TRANSPORT OF COAL MINES**

**Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос определения энергетической эффективности систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт с последовательным и параллельным соединением бункеров, а также с древовидной самоподобной структурой. При этом учитывались простои конвейерного оборудования и ограниченность объема груза в бункере. На основании математической модели функционирования систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт с использованием метода динамики средних получен алгоритм определения средней энергоемкости транспортирования систем конвейерного транспорта. На основании этого определен критерий эффективности систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт при различных соотношениях грузопотоков, поступающих из лав, и производительностей бункеров. Приведен пример расчета и дан анализ влияния величин грузопотоков, поступающих из лав, производительности питателей, объема аккумулирующих бункеров и стоимости 1 кВт электроэнергии на критерий эффективности функционирования систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт.

**Ключевые слова:** системы конвейерного транспорта, бункер, самоподобная структура, функционирование, пропускная способность, энергоемкость, энергетическая эффективность.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами**

В настоящее время в связи с удорожанием электроэнергии повысилась себестоимость добычи угля на угольных шахтах Украины. Одним из путей уменьшения себестоимости угля в этих условиях является снижение энергозатрат. Наибольшие потери электроэнергии при добыче угля приходятся на конвейерный транспорт.

Основной характеристикой экономической эффективности работы системы конвейерного транспорта является себестоимость транспортирования угля.

Себестоимость транспортирования состоит из суммарных расходов на перемещение груза, т.е. энергоемкость транспортирования  $C_{\Sigma}$ , и затрат, идущих на поддержание системы транспорта в рабочем состоянии  $C_P$ , куда входят расходы на ремонт и обслуживание.

Следовательно, экономическая эффективность транспортной системы определяется по формуле

$$C_T = C_{\Sigma} + C_P.$$

Расходы на перемещение груза зависят от производительности, длины, скорости ленты, состояния роlikоопор и роlikов конвейера. Затраты на ремонт и обслуживание систем конвейерного транспорта зависят от надежности конвейеров, стоимости затрат на их ремонт и от затрат, идущих на обслуживающий персонал. Величина  $C_P$  в процессе эксплуатации системы конвейерного транспорта не изменяется.

Энергоемкость транспортирования груза каждым конвейером определяется затратами электроэнергии, связанными с перемещением груза по ставу ленточного конвейера и ее потерями в приводе. Величина  $C_{\Sigma}$  из-за изменения грузопотока и скорости ленты конвейера в процессе эксплуатации изменяется.

Затраты механической энергии при транспортировании груза по ставу ленточного конвейера определяются работой силы сопротивления движению груза и ленты по роlikоопорам и работой силы тяжести при подъеме груза в случае наклонного ленточного конвейера.

Энергоемкость транспортирования, т.е. затраты электроэнергии, идущие на транспортирование горной массы, зависит от пропускной способности системы конвейерного транспорта угольных шахт.

Пропускная способность системы конвейерного транспорта из-за простоев конвейеров по аварийным, технологическим и организационным критериям может изменяться в широких пределах.

Следовательно, и энергоемкость транспортирования системы конвейерного транспорта так же из-за простоев конвейерного транспорта может изменяться в широких пределах.

При этом, если при увеличении пропускной способности системы конвейерного транспорта затраты электроэнергии на транспортирование горной массы увеличиваются, то при уменьшении пропускной способности – уменьшаются.

Поэтому за критерий энергетической эффективности системы конвейерного транспорта угольных шахт принимается комплексный показатель  $K$ , равный

$$K = c_1 m_c - 60 c_2 w_c, \quad (1)$$

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.

Для определения критерия эффективности функционирования  $K$  необходимо вычислить среднюю пропускную способность  $m_c$  и среднюю энергоемкость транспортирования  $w_c$  системы конвейерного транспорта угольных шахт с учетом простоев конвейеров, бункеров и конвейерного оборудования.

Вопросами определения пропускной способности систем конвейерного транспорта занимались многие исследователи [1–6].

В работах [5–6] на основании метода динамики средних для марковских процессов получен алгоритм определения средней пропускной способности системы конвейерного транспорта с последовательным и параллельным соединением конвейеров с бункерами и без бункеров, а также алгоритм определения средней пропускной способности системы конвейерного транспорта для древовидной веерной и самоподобной структур соединения конвейеров с бункерами и без бункеров.

В работе [6] приведен алгоритм определения средней энергоемкости транспортирования для систем конвейерного транспорта древовидной самоподобной структуры без бункеров.

В данной работе, на основе разработанных математических моделей функционирования систем конвейерного транспорта с бункерами [7], рассмотрен вопрос определения средней энергоемкости транспортирования системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт с бункерами и на основании этого определен критерий ее энергетической эффективности.

Системы конвейерного транспорта высокопроизводительных угольных шахт имеют разветвленную самоподобную древовидную структуру, состоящую из конвейеров, бункеров, питателей и перегрузочных узлов [7].

Согласно [6], средняя пропускная способность и средняя энергоемкость транспортирования системы конвейерного транспорта, с учетом простоев конвейерного оборудования, определяется по формулам

$$m_c = \sum_{k=1}^s P_k m_k, \quad (2)$$

$$w_c = \sum_{k=1}^s P_k w_k, \quad (3)$$

где  $m_k$  – пропускная способность системы конвейерного транспорта, находящейся в  $k$ -ом состоянии, т/мин;  $w_k$  – мощность электроэнергии, идущей на транспортирование груза системой конвейерного транспорта, находящейся в  $k$ -ом состоянии, кВт;  $P_k$  – вероятность нахождения системы конвейерного транспорта в  $k$ -ом состоянии;  $s$  – количество состояний системы конвейерного транспорта.

Рассмотрим сначала последовательное соединение бункеров (рис. 1)

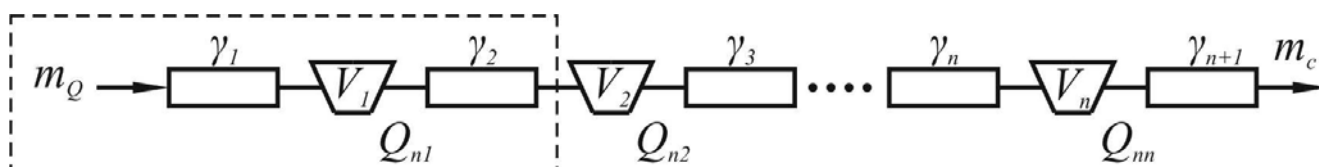


Рисунок 1 - Расчетная схема последовательного соединения бункеров

Согласно работе [8], средняя пропускная способность этой системы определяется из рекуррентного соотношения

$$m_c = m_{c_n}, \quad (4)$$

где при  $m_Q > Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[ \frac{\frac{e^{A_{1i}\gamma_{V_i}}}{\gamma_{\vartheta_i}} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - \bar{Q}_{n_i})} (e^{A_{1i}\gamma_{V_i}} - 1)}{1 + \frac{e^{A_{1i}\gamma_{V_i}}}{\gamma_{\vartheta_i}} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - \bar{Q}_{n_i})} (e^{A_{1i}\gamma_{V_i}} - 1)} \right] \bar{Q}_{n_i}, \quad (5)$$

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

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

при  $m_Q \leq Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[ \frac{1 + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i}\gamma_{V_i}})}{1 + \gamma_{i+1} e^{A_{2i}\gamma_{V_i}} + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i}\gamma_{V_i}})} \right] \bar{m}_{Q_i}, \quad (6)$$

$$\text{где } A_{2i} = \frac{\mu_c [\bar{m}_{Q_i} (1 + \gamma_{i+1}) - Q_{n_i}]}{\bar{m}_{Q_i} (Q_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})}; \bar{m}_{Q_i} = m_{c_{i-1}}; \bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{i+1}}; (i = 1, n; m_{c_0} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1};$$

$\mu_c = \mu_i$ );  $n$  – количество бункеров в системе;  $\gamma_i = \lambda_i/\mu_i$  – коэффициенты аварийности конвейеров системы конвейерного транспорта;  $\lambda_i, \mu_i$  – параметры потоков отказов и восстановлений конвейеров системы конвейерного транспорта соответственно, 1/мин;  $V_i$  – объемы бункеров,  $\text{м}^3$ .

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

Для этой элементарной схемы определим затраты электроэнергии (мощности привода), идущей на транспортирование груза с учетом простоя конвейеров, в результате имеем:

$$w_1^{(s)} = \frac{w_0^{(s)}}{1 + \gamma_{c_0}} + w_2^{(c)}, \quad (7)$$

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 энергоемкость транспортирования всей системой последовательного соединенных конвейеров и бункеров, равную

$$w_c = w_n^{(s)}, \quad (8)$$

где

$$w_i^{(s)} = \frac{w_{i-1}^{(s)}}{1 + \gamma_{c_{i-1}}} + w_{i+1}^{(c)}; \quad \gamma_{c_{i-1}} = \frac{m_{c_{i-1}}}{m_{c_i}} - 1 \quad (i = 1 \dots n). \quad (9)$$

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.

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

$$w_i^{(c)} = N_i, \quad (10)$$

где

$$N_i = \frac{L_i}{1000\eta_i} [k_{1i}v_{li}(q'_{pi} + q''_{pi} + 2q_{li})\omega'_i \cos \alpha_i + v_{li}q_{\Gamma i}(k_{1i}\omega'_i \cos \alpha_i + \sin \alpha_i)]. \quad (11)$$

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

В формуле (11) погонная нагрузка  $q_{\Gamma_i}$  зависит от текущей производительности конвейера  $Q_i$  (т/ч) и определяется по формуле

$$q_{\Gamma_i} = \frac{Q_i}{0,36v_{\Gamma_i}}. \quad (12)$$

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

$$Q_i = 60m_{c_{i-1}} \quad (i = 1, n+1). \quad (13)$$

Рассмотрим систему конвейерного транспорта древовидной самоподобной структуры с бункерами (рис. 2).

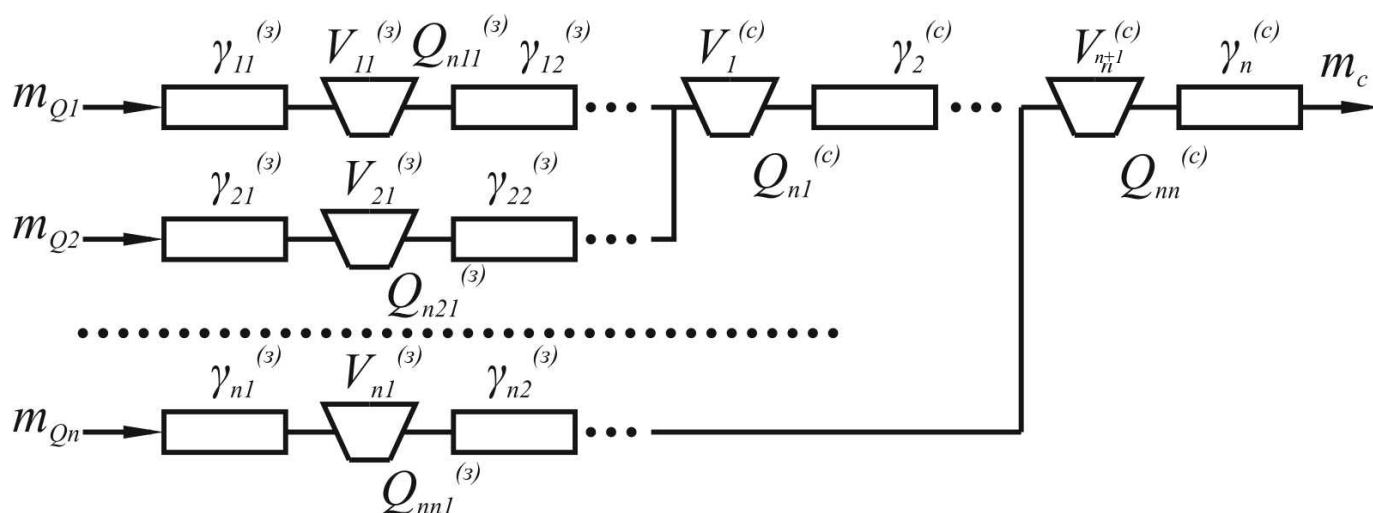


Рисунок 2 - Расчетная схема самоподобной древовидной структуры соединения бункеров

Обозначим через  $\gamma_i^{(c)}, \gamma_{ij}^{(z)}$  – коэффициенты аварийности ствольных и забойных конвейеров соответственно;  $V_i^{(c)}, V_{ij}^{(z)}$  – объемы бункеров ствольных и забойных путей;  $Q_{n_i}^{(c)}, Q_{n_{ij}}^{(z)}$  – производительности питателей ствольных и забойных путей, где  $i=1, n; j=1, k_i; k_i$  – количество бункеров в  $i$ -ой забойной линии.

Согласно работе [8], пропускная способность этой системы определяется по рекуррентным формулам:

при  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \frac{\left[ \frac{e^{A_{li}\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}}}{\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}} + \frac{m_i^{(s)}}{(m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})} (e^{A_{li}\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}} - 1) \right]}{\left[ 1 + \frac{e^{A_{li}\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}}}{\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}} + \frac{m_i^{(s)}}{(m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})} (e^{A_{li}\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}} - 1) \right]} \bar{Q}_{n_i}^{(c)}, \quad (14)$$

где  $A_{li} = \frac{\mu_c [m_i^{(s)}(1 + \gamma_{\vartheta_i}^{(c)}) - (1 + \gamma_{\vartheta_i}^{(c)})\bar{Q}_{n_i}^{(c)}]}{[m_i^{(s)}(1 + \gamma_{\vartheta_i}^{(c)}) - \bar{Q}_{n_i}^{(c)}]\bar{Q}_{n_i}^{(c)}}$ ;  $\gamma_{\vartheta_i}^{(c)} = \frac{\sum_{k=1}^i m_{Q_k}}{m_i^{(s)}} - 1$ ;  $m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\vartheta_i}^{(3)}}$ ;

$\bar{Q}_{n_i}^{(c)} = \frac{Q_{n_i}^{(c)}}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)}}$ ;  $m_{c0} = 0$ ;  $\mu_c = \mu_i$ ;  $i = 1, n$ ;  $\gamma_i^{(c)}$  – коэффициенты аварийности кон-

вейеров стволового пути;  $\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}$  – эквивалентные коэффициенты аварийности стволовых путей с бункерами;  $\gamma_{\vartheta_i}^{(3)}$  – эквивалентные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами;

при  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[ \frac{1 + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} (1 - e^{A_{2i}\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}})}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)} e^{A_{2i}\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}} + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} (1 - e^{A_{li}\gamma_{\vartheta_i}^{(c)}})} \right] m_i^{(s)}, \quad (15)$$

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

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

$$\gamma_{\vartheta_i}^{(3)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}^{(3)}} - 1 \quad (\gamma_{\vartheta_i}^{(c)} = \gamma_{\vartheta_i}^{(3)}, i = 1, n), \quad (16)$$

где  $m_{c_i}^{(3)}$  – средняя пропускная способность  $i$ -го забойного пути системы конвейерного транспорта с бункерами, определяемая аналогично по формулам (5)

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:

$$w_c = w_n^{(s)}, \quad (17)$$

где

$$w_i^{(s)} = \frac{w_{i-1}^{(s)}}{1 + \gamma_{\mathfrak{z}_{i-1}}^{(c)}} + w_{i+1}^{(c)} + w_{i+1}^{(z)}, \quad (i=1, n), \quad (18)$$

$$\gamma_{\mathfrak{z}_{i-1}}^{(c)} = \frac{m_i^{(s)}}{m_{c_i}} - 1; \quad m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\mathfrak{z}_i}^{(z)}}; \quad \gamma_{\mathfrak{z}_i}^{(z)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}} - 1 \quad (w_0^{(s)} = w_1^{(z)}, \quad w_i^{(c)} = N_i^{(c)}).$$

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;  $w_i^{(z)}$  – мощность электроэнергии, потребляемая  $i$ -м конвейером забойной линии на транспортирование горной массы;  $\gamma_{\mathfrak{z}_i}^{(z)}$  – 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,  $w_i^{(z)}$  для каждой забойной конвейерной линии определяется согласно рекуррентным соотношениям (9), полученным для последовательного соединения конвейеров и бункера.

На основании полученных рекуррентных соотношений для систем конвейерного транспорта самоподобной древовидной системы были получены средние значения пропускной способности, энергоемкости транспортирования, а также критерий эффективности по формуле (1).

В таблицах 1 и 2 представлены исходные данные и результаты расчета указанных показателей для случаев  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$  и  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$  соответственно. При этом в расчетах принимались стоимость 1 т угля  $c_1 = 1200$  грн., стоимость 1 кВт электроэнергии  $c_2 = 0,75$  грн.

Таблица 1 – Исходные данные и результаты расчета показателей эффективности системы конвейерного транспорта случае  $m_{Q_i} > Q_{n_i}$  ( $n=5$ ;  $k_i = 5$ )

| $m_{Q_i}$ ,<br>т/мин | $Q_{n_i}^{(c)}$ ,<br>т/мин | $Q_{n_i}^{(3)}$ ,<br>т/мин | $\gamma_i^{(c)}$ | $\gamma_{ij}^{(3)}$ | $\mu_i$ ,<br>1/мин | $V_i^{(c)}$ ,<br>м <sup>3</sup> | $V_{ij}^{(3)}$ ,<br>т/мин | $m_c$ ,<br>т/мин | $w_c$ ,<br>кВт | $K$ ,<br>тыс.<br>грн./мин |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------|----------------|---------------------------|
| 5,6                  | 5,0                        | 5,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     | 4,42             | 99,0           | 0,85                      |
| 5,6                  | 5,0                        | 5,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     |                  |                |                           |
| 5,6                  | 5,0                        | 5,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     |                  |                |                           |
| 5,6                  | 5,0                        | 5,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     |                  |                |                           |
| 5,6                  | 5,0                        | 5,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     |                  |                |                           |

Таблица 2 – Исходные данные и результаты расчета показателей эффективности системы конвейерного транспорта случае  $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$  ( $n=5$ ;  $k_i = 5$ )

| $m_{Q_i}$ ,<br>т/мин | $Q_{n_i}^{(c)}$ ,<br>т/мин | $Q_{n_i}^{(3)}$ ,<br>т/мин | $\gamma_i^{(c)}$ | $\gamma_{ij}^{(3)}$ | $\mu_i$ ,<br>1/мин | $V_i^{(c)}$ ,<br>м <sup>3</sup> | $V_{ij}^{(3)}$ ,<br>т/мин | $m_c$ ,<br>т/мин | $w_c$ ,<br>кВт | $K$ ,<br>тыс.<br>грн./мин |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|---------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------|----------------|---------------------------|
| 5,6                  | 6,0                        | 6,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     | 20,69            | 525,5          | 1,18                      |
| 5,6                  | 6,0                        | 6,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     |                  |                |                           |
| 5,6                  | 6,0                        | 6,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     |                  |                |                           |
| 5,6                  | 6,0                        | 6,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     |                  |                |                           |
| 5,6                  | 6,0                        | 6,0                        | 0,037            | 0,193               | 0,054              | 300,0                           | 100,0                     |                  |                |                           |

Из таблиц 1 и 2 видно, что если производительность питателей больше грузопотоков, поступающих из лав ( $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$ ), то средняя пропускная способность  $m_c$  и средняя энергоемкость  $w_c$  увеличиваются примерно в 5 раз, а критерий эффективности  $K$  увеличивается в 1,4 раза по сравнению со случаем, когда производительность питателей меньше поступающих из лав грузопотоков ( $m_{Q_i} > Q_{n_i}$ ).

Кроме того, из таблиц видно, что если величины грузопотоков, поступающих из лав, больше производительностей питателей ( $m_{Q_i} > Q_{n_i}$ ), то коэффициент эффективности  $K$  системы подземного конвейерного транспорта близок к нулю ( $K = 0,85$ ), т.е. работа системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт не эффективна.

Расчеты показали, что при увеличении стоимости 1 кВт электроэнергии до 1 грн. ( $c_2 = 1$  грн.), не зависимо от соотношения величин поступающих грузопотоков из лав и производительностей питателей коэффициент эффективности  $K < 0$ , т.е. работа системы подземного конвейерного транспорта не эффективна.

**Выводы.** На основании математических моделей функционирования систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт получен алгоритм определения средней энергоемкости транспортирования горной массы. При этом

учитывались простои конвейеров и бункеров, а также структура системы конвейерного транспорта.

Определен критерий эффективности функционирования системы подземного конвейерного транспорта при различных соотношениях поступающих из лав грузопотоков и производительностей питателей бункеров.

При этом установлено, если производительность питателей системы конвейерного транспорта больше грузопотоков поступающих из лав, то средняя пропускная способность и средняя энергоёмкость транспортирования и критерий эффективности существенно увеличиваются по сравнению со случаем, когда производительность бункеров меньше грузопотоков поступающих из лав.

Наиболее существенными параметрами, влияющими на эффективность функционирования систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт, являются величины грузопотоков, поступающих из лав, производительности питателей, объемы бункеров и стоимость 1 кВт электроэнергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы подземного транспорта на угольных шахтах / В. А. Пономаренко, Е. Л. Креймер, Г. А. Дунаев [и др.]. – М.: Недра, 1975. – 309 с.
2. Спиваковский А.О. Карьерный конвейерный транспорт / А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов, Г.В. Приседский. – М.: Недра, 1979. – 264 с.
3. Степанов П. Б. Надежность многобункерных конвейерных линий / П. Б. Степанов, Л. М. Алотин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1978. – №1. – С. 94-99.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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(90). – С. 135–141.
8. 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.

#### REFERENCES

1. Ponomarenko, V.A., Kreymer, Ye.L. and Dunayev, G.A. (1975), *Sistemy podzemnogo transporta na ugolnikh shakhtakh* [Systems of underground transport on coal mines], Nedra, Moscow, SU.
2. Spyvakovsky, A.O., Potapov, M.G. and Prysedskey, G.V. (1979), *Karyernyy konveyerny transport* [Open-cast mine conveyor transport], Nedra, Moscow, SU.
3. Stepanov, P.B. and Alotin, L.M. (1978), «Reliability of multibunker conveyor lines», *News of higher. Mountain magazine*, no. 1, pp. 94-99.
4. Klymov, B.G. and Boguslavsky, V.Ya. (1976), «Appreciating efficiency of functioning of the mine transport systems with bunkers», *News of higher. Mountain magazine*, no. 5., pp. 93–96.
5. Kyryya, R.V. (2010), «Use of fractals to determination of carrying capacity of the systems of conveyor transport of mine enterprises», *Sistemni terhnologiyi: Regionalniy mizvuzivskiy zbirnyk naukovikh prats* – Vok. 2(67), pp. 167–174.
6. Kyryya, R.V., Monastyrsky, V.F. and Maksyutenko, V.Yu. (2011), «Adaptive control by the conveyor lines of mine enterprises», *Forum gornyakov - 2011: Mamerialy mizhnarod.CONF.*, Dnepropetrovsk, UA, 2011 zhovtnya 12–15, pp. 87–95.

7. Kyryya, R.V., Myshchenko, T.F. and Babenko, Yu.V. (2014), «Mathematical models of functioning of the systems of conveyer transport of coal mines», *Sistemni tekhnologies: Regionalny mizhvuzivskiy zbirnik naukovykh prats*, Dnepropetrovsk, – Vypusk 1, pp. 146–158.

8. Kyryya, R.V., Myshchenko, T.F. and Babenko, Yu.V. (2013) «Development of rapid algorithm of determination of carrying capacity of the system «conveyor - bunker - conveyor», *Sistemni tekhnologies: Regionalny mizhvuzivskiy zbirnik naukovykh prats*, Dnepropetrovsk, – Vypusk 1, pp. 159-171.

---

### Об авторе

**Кирия Руслан Виссарионович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом физико-механических основ горного транспорта, Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [kiriya\\_igtm@ukr.net](mailto:kiriya_igtm@ukr.net)

### About the author

**Kiriya Ruslan Vissarionovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Head of Department of Mining Transport Physics and Mechanics, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [kiriya\\_igtm@ukr.net](mailto:kiriya_igtm@ukr.net)

---

**Анотація.** В роботі розглянуто питання визначення енергетичної ефективності систем підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт з послідовним і паралельним з'єднанням бункерів, а також з деревовидною самоподібною структурою. При цьому враховувалися прості конвеєрного устаткування і обмеженість об'єму вантажу в бункері.

На підставі математичної моделі функціонування систем підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт з використанням методу динаміки середніх отримано алгоритм визначення середньої енергоємності транспортування систем конвеєрного транспорту. На підставі цього визначено критерій ефективності систем поземного конвеєрного транспорту вугільних шахт при різних співвідношеннях вантажопотоків, що поступають з лав, і продуктивності бункерів.

Приведено приклад розрахунку і дано аналіз впливу величин вантажопотоків, що поступають з лав, продуктивності живильників, об'єму акумулюючих бункерів і вартості 1 кВт електроенергії на критерій ефективності функціонування систем підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт.

**Ключові слова:** системи конвеєрного транспорту, бункер, самоподібна структура, функціонування, пропускна спроможність, енергоємність, енергетична ефективність.

**Abstract.** The paper is proved to the underground coal mines transport energy efficient conveyor systems problem with running in parallel with sequential connection bunkers, as well as self-similar and the tree structure. Downtime conveyor equipment and limited load in the hopper were considered in this scheme. Dynamics and average values methods are used in underground conveyor transport systems mathematical model using. The result was obtained with the transportation energy requirements algorithm for transport systems. The underground transport coal mine effective systems were defined at different ratios for open bunker incoming freight flows. An example of mathematical model effect analysis for the open freight flows incoming with feeders, hoppers performance and volume of accumulating cost of 1 kWh of electricity to the criterion of efficiency of functioning of systems of underground transport coal mines.

**Keywords:** systems of conveyer transport, bunker, samopodobnaya structure, functioning, carrying capacity, energoemkost, power efficiency.

*Статья поступила в редакцию 23.07.2014*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.Ф. Монастырским*

**Eliseev V.I.**, Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Researcher,  
**Lutsenko V.I.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **MATHEMATICAL MODEL OF SUCROSE SOLUTION NUCLEATE BOILING**

**Єлісєєв В.І.**, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.,  
**Луценко В.І.**, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.  
(ІГТМ НАН України)

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БУЛЬБАШКОВОГО КИПІННЯ РОЗЧИНУ ЦУКРОЗИ**

**Елисеев В.И.**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,  
**Луценко В.И.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ РАСТВОРА САХАРОЗЫ**

**Abstract.** A problem of nucleate boiling of an aqueous solution of sucrose moving in a vertical cylindrical channel is considered. The problem is based on the one-dimensional steady-state equations of heat and mass motion and transfer for the multiphase multicomponent flow written down in view of phase transition on the surfaces of the channel and in volume of the solution. Kinetics of nucleation on the pipe wall is based on semi-empirical dependences between frequency of bubbles formation, number of nucleation sites, structure of surface and the surface overheating. Two stages of the boiling process are considered. In subcooled liquid, bubbles formed on a wall are, at achieving critical radius, picked up by a flow and brought to the cold layers where they are collapsed emitting heat into solution. Temperature of the solution increases due to action of two factors – collapse of bubbles and liberation of the heat flow from the walls. In the overheated liquid, at presence of plenty of growing bubbles, a condition is possible when heat coming from the wall is equal to heat released by the bubbles in the liquid. Thermal balance is occurred in the solution, and the solution temperature does not increase in the upstream part of the flow.

A proposed mathematical model provides basic characteristics of the solution boiling in the channel and estimates their impact on the boiling dynamics.

**Keywords:** solution, nucleate boiling, critical radius, heat transfer.

### **Introduction**

Process of liquid boiling has been in focus of various researches for a long time, and, as a result, a great number of works are devoted to this phenomenon, for example [1-4].

Reason for such great attention is, in terms of theory, a variety of physical processes which impact on each other, and in terms of practice it is intensification of heat and mass transfer which can be associated with essential heat pickup, stabilization of temperature and accumulation of energy. Process of boiling can be divided into many stages or physical effects, each of them represents significant interest for study.