

УДК 004.942:622.647.8 (043.3)

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.216>

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АККУМУЛИРУЮЩИХ БУНКЕРОВ В СИСТЕМАХ ПОДЗЕМНОГО КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА УГОЛЬНЫХ ШАХТ

¹Кирия Р.В.¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ АКУМУЛЮЮЧИХ БУНКЕРІВ В СИСТЕМАХ ПІДЗЕМНОГО КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

¹Кірія Р.В.¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

MATHEMATICAL MODELS OF FUNCTIONING OF ACCUMULATING BUNKERS IN SYSTEMS OF UNDERGROUND CONVEYOR TRANSPORT OF COAL MINES

¹Kiriia R.V.¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine

Аннотация. Статья посвящена вопросу математического моделирования функционирования аккумулирующих бункеров систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт при различных режимах их работы, а также на основании этих моделей определению оптимального объема аккумулирующих бункеров.

Конвейерный транспорт является одним из главных звеньев в добыче угля подземным способом.

В настоящее время в связи с интенсификацией горных работ широкое распространение получили шахты с большим количеством лав от 3 до 7 и производительностью угля от 6 до 15 тыс. тонн в смену. Система подземного конвейерного транспорта этих шахт представляет собой большое количество конвейеров со сложной разветвленной структурой. Однако такие системы конвейерного транспорта из-за большого количества конвейеров, их простоев по аварийным, технологическим и организационным причинам имеют низкую пропускную способность.

Для повышения пропускной способности систем подземного транспорта угольных шахт в связи с ограничением пространства применяются аккумулирующие бункеры. Аккумулирующие бункеры позволяют за счёт накопления некоторого количества груза в бункерах в случае простоя лав и конвейеров по различным причинам продолжать некоторое время работу системы конвейерного транспорта и тем самым увеличить её пропускную способность. Однако эффективность применения аккумулирующих бункеров в системе конвейерного транспорта угольных шахт невысокая из-за отсутствия достаточно простых математических моделей их функционирования, позволяющих определить количество и место расположения аккумулирующих бункеров в системе конвейерного транспорта, а также их оптимальные объёмы.

На основании теории марковских процессов получены упрощённые математические модели функционирования аккумулирующих бункеров, работающих в неуправляемом и управляемом режимах. Определена пропускная способность системы «конвейер – бункер – конвейер» с аккумулирующим бункером, работающим в неуправляемом и управляемом режимах. Проведён сравнительный анализ работы аккумулирующего бункера в неуправляемом и управляемом режимах. Определен максимальный объём аккумулирующего бункера, при превышении которого пропускная способность аккумулирующего бункера не увеличивается.

Ключевые слова: аккумулирующий бункер, система подземного конвейерного транспорта, математические модели функционирования

В настоящее время в системах подземного конвейерного транспорта угольных шахт широкое применение получили аккумулирующие бункеры [1].

Аккумулирующие (аварийные) бункеры предназначены для обеспечения независимой работы смежных технологических звеньев транспорта в периоды их кратковременных отказов в работе или остановок по той или иной причине, а также для уменьшения влияния простоев конвейерных линий на работу очистных и подготовительных забоев. Они устанавливаются на участках и магистральных выработках в местах перегрузки с конвейера на конвейер, а также в сопряжениях различных видов транспорта.

В системах подземного конвейерного транспорта угольных шахт аккумулярующие бункеры в основном работают трёх режимах – в неуправляемом режиме и двух управляемых режимах, т.е. в режимах поддержания объёма груза в бункере в заданных пределах [2].

В неуправляемом режиме работы аккумулярующего бункера (рис. 1) надбункерный конвейер при достижении максимального допустимого объёма груза в бункере $V_{\max}$ (м^3) выключается, а при достижении количества груза в бункере, равного нулю, питатель и подбункерный конвейер не выключаются, то есть постоянно работают независимо от количества груза в бункере. При этом, если количество груза в бункере станет меньше $V_{\max}$, то надбункерный конвейер сразу включается. Этот режим работы аккумулярующего бункера при максимальном поступающем в бункер грузопотоке, меньшем производительности питателя, совпадает с режимом перегрузки.

Недостатком этого режима работы аккумулярующего бункера, особенно для бункеров с большой высотой, является прямое попадание груза на питатель при загрузке бункера, что приводит к разрушению транспортного оборудования.

При первом управляемом режиме работы бункера (рис. 1) подбункерный конвейер и питатель включаются, если количество груза в бункере достигает заданного максимального значения V_{32} (м^3), и выключаются, если количество груза в бункере станет меньше заданного минимального значения V_{31} (м^3). Надбункерный конвейер не выключается, даже если объём груза в бункере достигает заданного максимального или минимального значения. В этом режиме работы аккумулярующего бункера средний грузопоток, поступающий в бункер, должен быть меньше среднего грузопотока, разгружаемого из бункера. Этот режим работы позволяет удерживать в бункере некоторое количество груза, т.е. предохранительную подушку и тем самым увеличить надёжность транспортного оборудования.

Кроме того, такой режим работы для аккумулярующих бункеров в системе конвейерного транспорта позволяет поддерживать постоянную работу надбункерных конвейерных линий и очистных забоев.

При втором управляемом режиме работы аккумулярующего бункера (рис. 1) количество груза в бункере поддерживается в заданных пределах с помощью включения и выключения надбункерного конвейера. При этом надбункерный конвейер

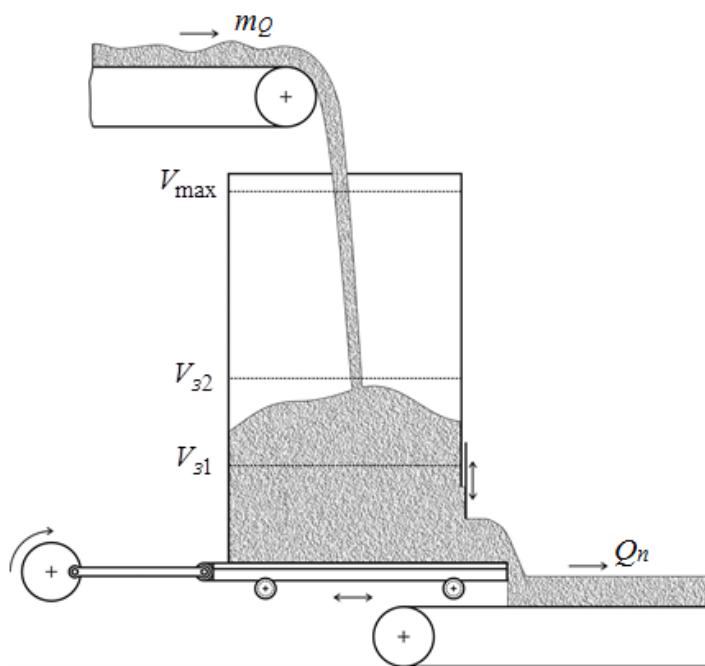


Рисунок 1 – Схема работы аккумулярующего бункера в режиме поддержания в нем объёма груза в заданных пределах

выключается, если количество груза в бункере превысит некоторое заданное максимальное значение V_{32} , и включается, если количество груза в бункере станет меньше некоторого заданного минимального значения V_{31} .

Подбункерный конвейер и питатель не выключаются даже при достижении количеством груза в бункере заданного максимального или минимального значения. В этом режиме работы грузопоток, поступающий в бункер, должен быть больше грузопотока, разгружаемого из бункера. Этот режим работы характерен для аккумулирующих бункеров, когда в системе конвейерного транспорта необходимо поддерживать постоянную работу подбункерных конвейерных линий.

Вопросами исследования и моделирования функционирования системы «конвейер – бункер – конвейер» занимались многие исследователи [3-7]. Полученные в этих работах результаты применимы для частных случаев режимов функционирования аккумулирующего бункера. Приведённую в работе [7] математическую модель функционирования системы «конвейер – бункер – конвейер» из-за её сложности практически невозможно использовать в инженерных расчётах.

1 Модель функционирования аккумулирующего бункера в неуправляемом режиме

Рассмотрим простейшую систему «конвейер – бункер – конвейер», в которой аккумулирующий бункер работает в неуправляемом режиме (рис. 2).

Согласно работам [5, 8], предположим, что средняя величина грузопотока, поступающего на подбункерный конвейер, равна m_Q (т/мин), а длительности интервалов простоев и работы надбункерного и подбункерного конвейеров распределены по экспоненциальным законам. При этом интенсивности простоев и восстановлений надбункерного и подбункерного конвейеров обозначим через λ_1, μ_1 (мин⁻¹) и λ_2, μ_2 (мин⁻¹) соответственно. Объём аккумулирующего бункера и производительность питателя соответственно равны V (м³) и Q_n (т/мин). При этом предполагаем, что максимальный объём груза в бункере приблизительно равен объёму аккумулирующего бункера, т.е. $V \approx V_{\max}$.

Тогда средняя величина грузопотока $\bar{m}_Q$, поступающего в аккумулирующий бункер, и средняя величина грузопотока $\bar{Q}_n$, разгружаемого из бункера, определяются по формулам [9]:

$$\bar{m}_Q = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} m_Q; \quad (1)$$

$$\bar{Q}_n = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} Q_n. \quad (2)$$

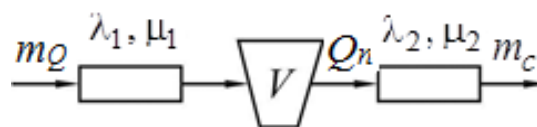


Рисунок 2 – Расчётная схема функционирования системы «конвейер – бункер – конвейер»

Рассмотрим сначала случай $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$, т.е. средний грузопоток, поступающий в аккумулирующий бункер, больше среднего грузопотока, разгружаемого из бункера.

Предположим, что подбункерный конвейер функционирует без остановок ($\lambda_2 = 0$), а производительность питателя постоянная и равна среднему грузопотоку $\bar{Q}_n$, разгружаемому из бункера. Тогда, так как $m_Q > \bar{Q}_n$, то граф состояния такой системы представлен на рис. 3.

На рис. 3 индекс «0» обозначает состояние системы, при котором надбункерный конвейер работает, индекс «1» обозначает состояние системы, при котором надбункерный конвейер не работает.

Обозначим через $P_0(m, t)$ и $P_1(m, t)$ соответственно вероятности нахождения системы в состояниях «0» и «1» при количестве груза в бункере, равном m , а через $P_{30}(t)$ – вероятность нахождения системы в состоянии «0» при заполненном бункере и $P_{n1}(t)$ – вероятность нахождения системы в состоянии «1» при порожнем бункере.

Процесс функционирования бункеров описывается системой уравнений Колмогорова [10], которая в этом случае имеет вид:

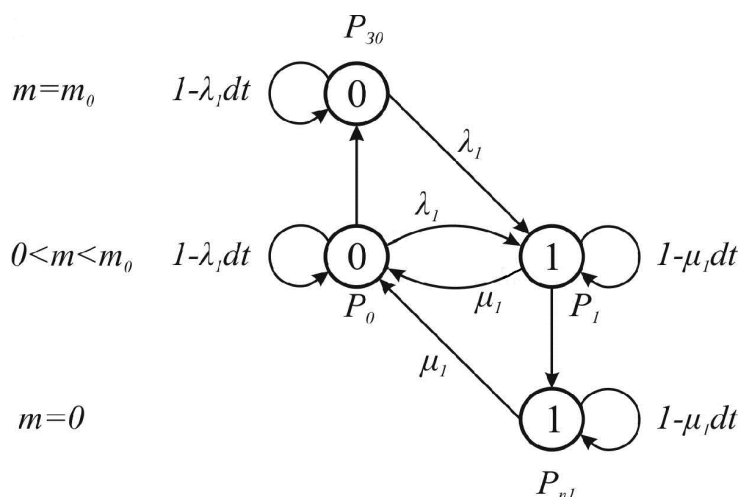


Рисунок 3 – Граф состояний системы «конвейер – бункер – конвейер» при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P_0}{\partial t} + (m_Q - \bar{Q}_n) \frac{\partial P_0}{\partial m} = -\lambda_1 P_0(m, t) + \mu_1 P_1(m, t), \\ \frac{\partial P_0}{\partial t} - \bar{Q}_n \frac{\partial P_1}{\partial m} = \lambda_1 P_0(m, t) - \mu_1 P_1(m, t), \\ \frac{dP_{30}}{dt} = -\lambda_1 P_{30}(t) + (m_Q - \bar{Q}_n) P_0(m_0, t), \\ \frac{dP_{n1}}{dt} = -\mu_1 P_{n1}(t) + \bar{Q}_n P_1(0, t). \end{array} \right. \quad (3)$$

При этом должны выполняться:

- начальные условия:

$$\text{при } t = 0 \quad P_0(m, 0) = P_1(m, 0) = P_{30}(0) = 0, \quad P_{n1}(0) = 1; \quad (4)$$

- граничные условия:

$$\text{при } m = m_0 \quad \bar{Q}_n P_1(m_0, t) = \lambda_1 P_{30}(t); \quad (5)$$

$$\text{при } m = 0 \quad (m_Q - \bar{Q}_n) P_0(0, t) = \mu_1 P_{n1}(t), \quad (6)$$

а также условие нормирования

$$P_{30}(t) + P_{n1}(t) + \int_0^{m_0} P_0(m, t) dm + \int_0^{m_0} P_1(m, t) dm = 1, \quad (7)$$

где m – текущее значение количества груза в бункере, т;

m_0 – максимальное допустимое количество груза в бункере, т.

Для стационарного случая, т.е. при $t \rightarrow \infty$, система уравнений (3) с учетом начальных и граничных условий (4)-(6) примет вид:

$$\begin{cases} (m_Q - \bar{Q}_n) \frac{dP_0}{dm} = -\lambda_1 P_0(m) + \mu_1 P_1(m), \\ -\bar{Q}_n \frac{dP_1}{dm} = \lambda_1 P_0(m) - \mu_1 P_1(m), \\ -\lambda_1 P_{30} + (m_Q - \bar{Q}_n) P_0(m_0) = 0, \\ -\mu_1 P_{n1} + \bar{Q}_n P_1(0) = 0, \\ \bar{Q}_n P_1(m_0) = \lambda_1 P_{30}, \\ (m_Q - \bar{Q}_n) P_0(0) = \mu_1 P_{n1}, \end{cases} \quad (8)$$

где $P_0(m), P_1(m)$ – значения $P_0(m, t)$ и $P_1(m, t)$ при $t \rightarrow \infty$;

P_{30} и P_{n1} – значения $P_{30}(t)$ и $P_{n1}(t)$ при $t \rightarrow \infty$.

Решая уравнение (8) при условиях (4)-(7), получим

$$P_0(m) = \frac{\mu_1}{m_Q - \bar{Q}_n} e^{A_1 m} P_{n1}; \quad P_1(m) = \frac{\mu_1}{\bar{Q}_n} e^{A_1 m} P_{n1}; \quad P_{30} = \frac{\mu_1}{\lambda_1} e^{A_1 m_0} P_{n1};$$

$$P_{n1} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_1}{\lambda_1} e^{A_1 m_0} + \frac{\mu_1 m_Q}{\mu_1 m_Q - (\lambda_1 + \mu_1) \bar{Q}_n} (e^{A_1 m_0} - 1)}, \quad (9)$$

$$\text{где } A_1 = \frac{\mu_1 m_Q - (\lambda_1 + \mu_1) \bar{Q}_n}{\bar{Q}_n (m_Q - \bar{Q}_n)}.$$

Пропускная способность системы «конвейер – бункер – конвейер» в этом случае определится из выражения

$$m_c = \left[P_{30} + \int_0^{m_0} P_0(m) dm + \int_0^{m_0} P_1(m) dm \right] \bar{Q}_n. \quad (10)$$

Подставляя решение (9) в (10), после интегрирования получим значение пропускной способности системы «конвейер – бункер – конвейер» в виде:

$$m_c = \left[\frac{\frac{e^{A_1 m_0}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_Q}{(\bar{m}_Q - \bar{Q}_n)} (e^{A_1 m_0} - 1)}{1 + \frac{e^{A_1 m_0}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_Q}{(\bar{m}_Q - \bar{Q}_n)} (e^{A_1 m_0} - 1)} \right] \bar{Q}_n, \quad (11)$$

где $A_1 = \frac{\mu_1 [m_Q - (1 + \gamma_1) \bar{Q}_n]}{(m_Q - \bar{Q}_n) \bar{Q}_n}$; $\bar{m}_Q = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}$; $\bar{Q}_n = \frac{Q_n}{1 + \gamma_2}$; $\gamma_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}$; $\gamma_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$; $m_0 = \rho V$.

Здесь γ_1, γ_2 – коэффициенты простоя надбункерного и подбункерного конвейеров соответственно; ρ – удельная масса транспортируемого груза, т/м³.

Подставив m_0 в (11), предварительно выразив его через объём бункера V по формуле $m_0 = \rho V$, получим пропускную способность системы «конвейер – бункер – конвейер» в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом режиме при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$:

$$m_c = \left[\frac{\frac{e^{A_1 \rho V}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_Q}{(\bar{m}_Q - \bar{Q}_n)} (e^{A_1 \rho V} - 1)}{1 + \frac{e^{A_1 \rho V}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_Q}{(\bar{m}_Q - \bar{Q}_n)} (e^{A_1 \rho V} - 1)} \right] \bar{Q}_n, \quad (12)$$

где $A_1 = \frac{\mu_1 [m_Q - (1 + \gamma_1) \bar{Q}_n]}{(m_Q - \bar{Q}_n) \bar{Q}_n}$.

Устремим в правой части равенства (12) объём аккумулирующего бункера V к бесконечности ($V \rightarrow \infty$), после преобразования получим: при $V \rightarrow \infty$ $m_c \rightarrow \bar{Q}_n$.

Следовательно, в случае работы бункера в неуправляемом режиме при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$ с увеличением объёма аккумулирующего бункера V до бесконечности средняя пропускная способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» увеличивается и стремится к средней производительности подбункерного конвейера $\bar{Q}_n$.

Рассмотрим случай $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$, т.е. средняя величина грузопотока, поступающего в аккумулирующий бункер, меньше среднего грузопотока, разгружаемого из бункера.

Предположим, что в системе «конвейер – бункер – конвейер» надбункерная конвейерная линия функционирует без остановок ($\lambda_1 = 0$), а грузопоток, поступающий в бункер, постоянный и равняется среднему грузопотоку $\bar{m}_Q$, поступающему в бункер. Тогда, так как $\bar{m}_Q < Q_n$, то граф состояний этой системы имеет вид, представленный на рис. 4, где индекс «0» обозначает состояние системы,

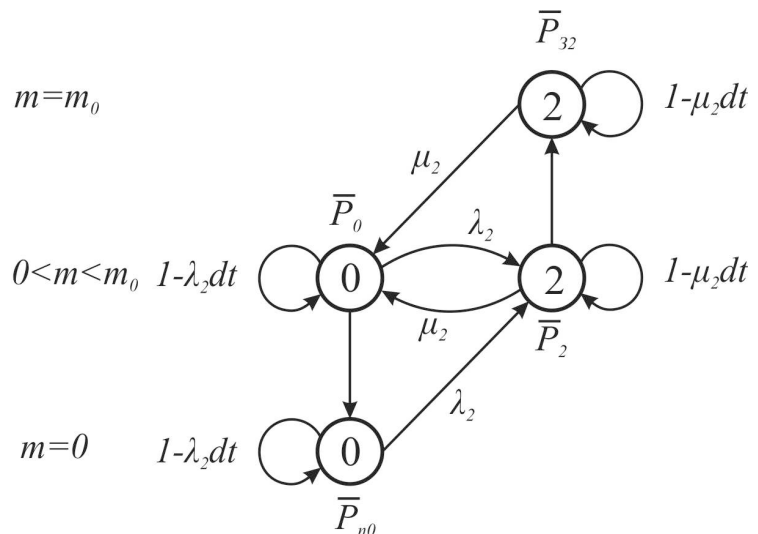


Рисунок 4 – Граф состояний системы «конвейер – бункер – конвейер» при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$

при котором подбункерный конвейер работает, индекс «2» обозначает состояние системы, при котором подбункерный конвейер не работает.

Обозначим через $\bar{P}_0(m, t)$ и $\bar{P}_2(m, t)$ соответственно вероятности нахождения системы в состояниях «0» и «2» при условии, что количество груза в бункере равно m , а через $\bar{P}_{32}(t)$ – вероятность нахождения системы в состоянии «2», при этом бункер заполнен, и $\bar{P}_{n0}(t)$ – вероятность нахождения системы в состоянии «0», при этом бункер пуст.

Система уравнений Колмогорова [10], описывающая процесс функционирования бункеров, в этом случае имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial t} + (\bar{m}_Q - Q_n) \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial m} = -\lambda_2 \bar{P}_0(m, t) + \mu_2 \bar{P}_2(m, t), \\ \frac{\partial \bar{P}_2}{\partial t} + \bar{m}_Q \frac{\partial \bar{P}_2}{\partial m} = \lambda_2 \bar{P}_0(m, t) - \mu_2 \bar{P}_2(m, t), \\ \frac{d\bar{P}_{32}}{dt} = -\mu_2 \bar{P}_{32}(t) + \bar{m}_Q \bar{P}_2(m_0, t), \\ \frac{d\bar{P}_{n0}}{dt} = -\lambda_2 \bar{P}_{n0}(t) + (\bar{m}_Q - Q_n) \bar{P}_2(0, t). \end{cases} \quad (13)$$

При этом должны выполняться:

- начальные условия:

$$\text{при } t = 0 \quad \bar{P}_0(m, 0) = \bar{P}_2(m, 0) = \bar{P}_{32}(0) = 0, \quad \bar{P}_{n0} = 1; \quad (14)$$

- граничные условия:

$$\text{при } m = m_0 \quad (Q_n - \bar{m}_Q) \bar{P}_0(m_0, t) = \mu_2 \bar{P}_{32}(t); \quad (15)$$

$$\text{при } m = 0 \quad \bar{m}_Q \bar{P}_2(0, t) = \lambda_2 \bar{P}_{n0}(t), \quad (16)$$

а также условие нормирования

$$\bar{P}_{32} + \bar{P}_{n0} + \int_0^{m_0} \bar{P}_0(m, t) dm + \int_0^{m_0} \bar{P}_2(m, t) dm = 1. \quad (17)$$

Для стационарного случая, т.е. при $t \rightarrow \infty$, система уравнений (13) с учётом начальных и граничных условий (14)-(16) примет вид:

$$\begin{cases} (\bar{m}_Q - Q_n) \frac{d\bar{P}_0}{dm} = -\lambda_2 \bar{P}_0(m) + \mu_2 \bar{P}_2(m), \\ \bar{m}_Q \frac{d\bar{P}_2}{dm} = \lambda_2 \bar{P}_0(m) - \mu_2 \bar{P}_2(m), \\ -\mu_2 \bar{P}_{32} + \bar{m}_Q \bar{P}_2(m_0) = 0, \\ -\lambda_2 \bar{P}_{n0} + (Q_n - \bar{m}_Q) \bar{P}_0(0) = 0, \\ (Q_n - \bar{m}_Q) \frac{d\bar{P}_0}{dm} = \mu_2 \bar{P}_{32}, \\ \bar{m}_Q \bar{P}_2 = \lambda_2 \bar{P}_{n0}, \end{cases} \quad (18)$$

где $\bar{P}_0(m), \bar{P}_2(m)$ – значения $\bar{P}_0(m, t)$ и $P_1(m, t)$ при $t \rightarrow \infty$;

P_{30} и P_{n1} – значения $\bar{P}_{32}(t)$ и $\bar{P}_{n0}(t)$ при $t \rightarrow \infty$.

Решая уравнение (18) при условиях (14)-(17), получим

$$\begin{aligned} \bar{P}_0(m) &= \frac{\lambda_2}{\bar{m}_Q - Q_n} e^{A_2 m} \bar{P}_{n0}; \quad \bar{P}_2(m) = \frac{\lambda_2}{\bar{m}_Q} e^{A_2 m} \bar{P}_{n0}; \quad \bar{P}_{32} = \frac{\lambda_2}{\mu_2} e^{A_2 m_0} \bar{P}_{n0}; \\ \bar{P}_{n0} &= \frac{1}{1 + \frac{\lambda_2}{\mu_2} e^{A_2 m_0} + \frac{\lambda_2 Q_n}{(\lambda_2 + \mu_2) \bar{m}_Q - \mu_2 Q_n} (e^{A_2 m_0} - 1)}, \end{aligned} \quad (19)$$

где $A_2 = \frac{(\lambda_2 + \mu_2) \bar{m}_Q - \mu_2 Q_n}{\bar{m}_Q (Q_n - \bar{m}_Q)}.$

Пропускная способность в этом случае определяется из выражения

$$m_c = \bar{m}_Q \bar{P}_{n0} + Q_n \int_0^{m_0} \bar{P}_0(m) dm. \quad (20)$$

Подставляя решение системы уравнений (19) в (20), получим среднюю пропускную способность в виде:

$$m_c = \left[\frac{1 + \frac{(Q_n - \bar{Q}_n)}{(\bar{Q}_n - \bar{m}_Q)} (1 - e^{A_2 m_0})}{1 + \gamma_2 e^{A_2 m_0} + \frac{(Q_n - \bar{Q}_n)}{(\bar{Q}_n - \bar{m}_Q)} (1 - e^{A_2 m_0})} \right] \bar{m}_Q, \quad (21)$$

где $A_2 = \frac{\mu_2 [(1 + \gamma_2) \bar{m}_Q - Q_n]}{\bar{m}_Q (Q_n - \bar{m}_Q)}.$

Подставляя в левую часть (21) $m_0 = \rho V$, окончательно получим среднюю пропускную способность системы «конвейер – бункер – конвейер» в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом режиме при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ в виде:

$$m_c = \left[\frac{1 + \frac{(Q_n - \bar{Q}_n)}{(\bar{Q}_n - \bar{m}_Q)} (1 - e^{A_2 \rho V})}{1 + \gamma_2 e^{A_2 \rho V} + \frac{(Q_n - \bar{Q}_n)}{(\bar{Q}_n - \bar{m}_Q)} (1 - e^{A_2 \rho V})} \right] \bar{m}_Q, \quad (22)$$

где $A_2 = \frac{\mu_2 [\bar{m}_Q (1 + \gamma_2) - Q_n]}{\bar{m}_Q (Q_n - \bar{m}_Q)}.$

Устремим в левой части равенства (22) объём аккумулирующего бункера V к бесконечности ($V \rightarrow \infty$). После преобразования получим: при $V \rightarrow \infty$ $m_c \rightarrow \bar{m}_Q$.

Следовательно, в случае работы бункера в неуправляемом режиме при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ с увеличением объёма аккумулирующего бункера V до бесконечности

средняя пропускная способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» стремится к средней производительности надбункерного конвейера $\bar{m}_Q$.

Рассмотрим случай $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n$, то есть средняя величина грузопотока, поступающего в аккумулирующий бункер, равна среднему грузопотоку, разгружаемому из бункера.

В этом случае граф состояния системы «конвейер – бункер – конвейер» совпадает с графом состояния этой системы при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$ (см. рис. 3). Поэтому в этом случае справедлива система уравнений Колмогорова (3) и (8) при тех же начальных и граничных условиях.

Решая систему уравнений (8) при условиях (4)-(7), с учётом того, что $A_1 = 0$, в результате получим решение в виде:

$$P_0(m) = \frac{\mu_1}{m_Q - \bar{Q}_n} P_{n1}; P_1(m) = \frac{\mu_1}{\bar{Q}_n} P_{n1}; P_{30} = \frac{\mu_1}{\lambda_1} P_{n1}; P_{n1} = \frac{1}{1 + \frac{\mu_1}{\lambda_1} + \frac{\mu_1 m_Q m_0}{(m_Q - \bar{Q}_n) \bar{Q}_n}}. \quad (23)$$

Подставляя решение (23) в (10), после преобразования получим среднюю пропускную способность системы «конвейер – бункер – конвейер» в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом режиме при $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n$:

$$m_c = \left[\frac{\frac{1}{\gamma_1} + \frac{\mu_1 m_Q}{(m_Q - \bar{Q}_n) \bar{Q}_n} \rho V}{1 + \frac{1}{\gamma_1} + \frac{\mu_1 m_Q}{(m_Q - \bar{Q}_n) \bar{Q}_n} \rho V} \right] \bar{Q}_n. \quad (24)$$

Из формулы (24) следует, что m_c при $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n$ всегда меньше среднего грузопотока, разгружаемого из бункера $\bar{Q}_n$, т.е. $m_c < \bar{Q}_n$.

Устремив в левой части формулы (24) объём аккумулирующего бункера $V \rightarrow \infty$, в результате получим: при $V \rightarrow \infty$ $m_c \rightarrow \bar{Q}_n$.

Следовательно, средняя пропускная способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом режиме при $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n$ с увеличением объёма бункера увеличивается и при $V \rightarrow \infty$ стремится к средней производительности подбункерного конвейера $\bar{Q}_n$.

На рис. 5 – рис. 7 показаны графики зависимости средней пропускной способности m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» от объёма бункера V при различных соотношениях средних значений поступающего $\bar{m}_Q$ и разгружаемого $\bar{Q}_n$ грузопотоков, построенные согласно формулам (12), (22) и (24).

При этом для всех случаев средняя производительность поступающего грузопотока $m_Q = 3,7$ т/мин, а интенсивности простоев и восстановлений надбункерного и подбункерного конвейеров для графиков на рис. 5 и рис. 6 принимали значения соответственно $\lambda_1 = 0,025$ мин⁻¹; $\mu_1 = 0,0614$ мин⁻¹; $\lambda_2 = 0,017$ мин⁻¹;

$\mu_2 = 0,069 \text{ мин}^{-1}$; удельная масса груза $\rho = 1 \text{ т/м}^3$; для графиков на рис. 7 эти параметры принимали те же значения, кроме $\lambda_2 = 0,028 \text{ мин}^{-1}$.

На рис. 5 при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$ кривым 1, 2, 3 соответствуют значения $Q_n = 1; 2; 3 \text{ т/мин}$ (см. формулы (12)). На рис. 6 при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ кривым 1, 2, 3 соответствуют значения $Q_n = 4; 5; 6 \text{ т/мин}$ (см. формулы (22)). На рис. 7 при $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n$ кривая 1 соответствует значениям $m_Q = Q_n = 3,7 \text{ т/мин}$, т.е. $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n \approx 2,63 \text{ т/мин}$ (см. (24)); кривая 2 соответствует формуле Черкесова при тех же данных [6].

Кроме того, на рис. 5 – рис. 7 кружочками, треугольниками и квадратами показаны результаты имитационного моделирования.

Из рис. 5 видно, что в случае $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$ при увеличении объёма бункера V средняя пропускная способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» увеличивается, и при $V > 500 \text{ м}^3$ m_c не изменяется и принимает постоянное значение, равное: $m_c = 0,802 \text{ т/мин}$ при $Q_n = 1 \text{ т/мин}$; $m_c = 1,604 \text{ т/мин}$ при $Q_n = 2 \text{ т/мин}$; $m_c = 2,41 \text{ т/мин}$ при $Q_n = 3 \text{ т/мин}$. Кроме того, в рассматриваемом случае ($\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$) с увеличением производительности питателя Q_n средняя пропускная способность m_c увеличивается и при больших значениях объёма аккумулирующего бункера V ($V > 300 \text{ м}^3$) принимает постоянное значение, равное $\bar{Q}_n$.

Из рис. 6 видно, в случае $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ при увеличении объёма аккумулирующего бункера V средняя пропускная

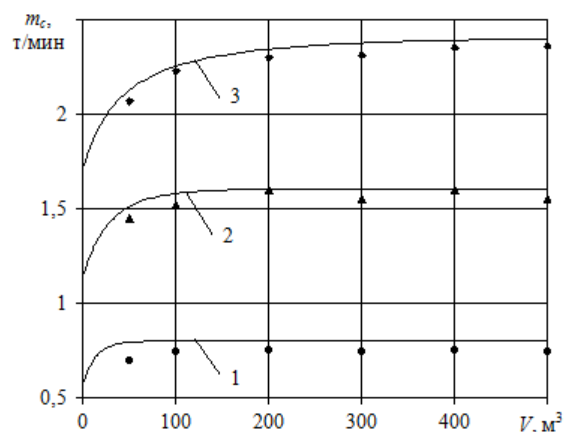


Рисунок 5 – Графики зависимости средней пропускной способности m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» от объёма бункера V при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$

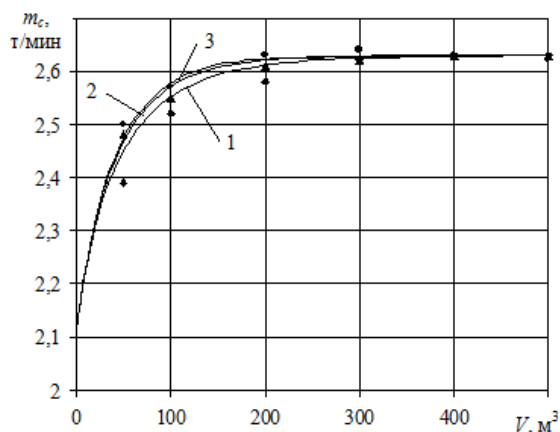


Рисунок 6 – Графики зависимости средней пропускной способности m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» от объёма бункера V при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$

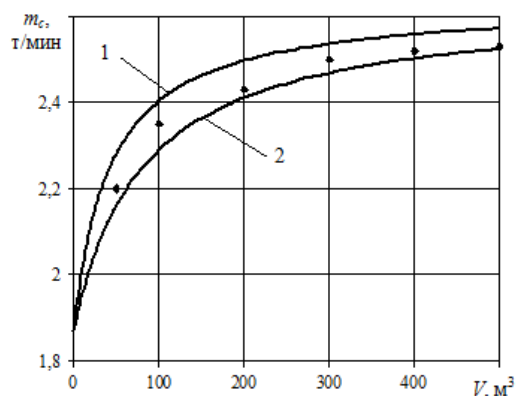


Рисунок 7 – Графики зависимости средней пропускной способности m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» от объёма бункера V при $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n$

способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» увеличивается и при $V > 500 \text{ м}^3$ m_c независимо от значения производительности питателя Q_n практически не изменяется и принимает постоянное значение, равное $m_c = 2,63 \text{ т/мин}$.

При этом с увеличением производительности питателя Q_n пропускная способность m_c увеличивается незначительно и в дальнейшем с увеличением Q_n при больших значениях объёма аккумулирующего бункера V ($V > 300 \text{ м}^3$) принимает постоянное значение $\bar{m}_Q$.

Если $\bar{m}_Q = \bar{Q}_n$ (см. рис. 7), то при увеличении объёма аккумулирующего бункера V средняя пропускная способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» также увеличивается и при $V > 500 \text{ м}^3$ независимо от значения производительности питателя Q_n практически не изменяется и принимает постоянное значение, равное $m_c = 2,63 \text{ т/мин}$.

Анализ функционирования системы «конвейер – бункер – конвейер» показал, что если средний грузопоток, поступающий в бункер, больше среднего грузопотока, разгружаемого из бункера, т.е. при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ с увеличением производительности питателя Q_n средняя пропускная способность m_c системы увеличивается и при стремлении объёма аккумулирующего бункера V к бесконечности ($V \rightarrow \infty$) m_c стремится к $\bar{Q}_n$. Если же $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$, то с увеличением Q_n средняя пропускная способность m_c системы практически не изменяется и при любом стремлении объёма аккумулирующего бункера V к бесконечности ($V \rightarrow \infty$) стремится к постоянному значению, равному $m_c = \bar{m}_Q$.

2 Модель функционирования аккумулирующего бункера в управляемом режиме

Рассмотрим систему «конвейер – бункер – конвейер», в которой аккумулирующий бункер работает в первом управляемом режиме (см. рис. 2).

Если аккумулирующий бункер работает в первом управляемом режиме, то при достижении объёмом груза в бункере заданного максимального значения, равного V_{32} , питатель отключается, а при достижении заданного минимального объёма груза в бункере, равного V_{31} , питатель включается, при этом надбункерный конвейер не отключается.

Предположим, что, как и в случае неуправляемого бункера, средняя величина грузопотока, поступающего на вход надбункерного конвейера, равна m_Q (т/мин), интенсивности простоев и восстановлений надбункерного и подбункерного конвейеров бункера равны λ_1, μ_1 (мин⁻¹) и λ_2, μ_2 (мин⁻¹) соответственно; производительность питателя бункера равна Q_n (т/мин); объём бункера равен V (м³), а заданные максимальный и минимальный объёмы груза в бункере равны соответственно V_{32} (м³) и V_{31} (м³) (см. рис. 1). При этом средний грузопоток $\bar{m}_Q$,

поступающий в бункер, меньше среднего грузопотока $\bar{Q}_n$, разгружаемого из бункера ($\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$).

Также предполагаем, что максимальный объём груза в аккумулирующем бункере равен объёму бункера, т.е. $V_{\max} \approx V$.

Если аккумулирующий бункер работает в первом управляемом режиме и бункер не переполняется, т.е. объём груза в бункере не превышает V , и при этом надбункерный конвейер работает, то средняя пропускная способность системы равна $\bar{m}_Q$.

Однако в случае достижения заданного максимального объёма груза в бункере V_{s2} при неработающем подбункерном конвейере возможно переполнение бункера, т.е. превышение объёма груза в бункере, равного максимальному объёму груза в бункера $V_{\max} = V$.

Обозначим через P_c вероятность того, что бункер не переполнится. Тогда средняя пропускная способности системы «конвейер – бункер – конвейер» будет равна

$$m_c = P_c \cdot \bar{m}_Q. \quad (25)$$

Определим вероятность переполнения аккумулирующего бункера $\bar{P}_c$. Эта вероятность равна вероятности произведения двух независимых событий: вероятности простоя подбункерного конвейера $\bar{P}_2$ и вероятности того, что за время заполнения T_1 (мин) надбункерным конвейером бункера грузом объёма $\Delta V_2 = V - V_{s2}$ подбункерный конвейер не начнёт работать.

Вероятность простоя подбункерного конвейера равна

$$\bar{P}_2 = 1 - P_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2}, \quad (26)$$

где $P_2 = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2}$ – вероятность работы подбункерного конвейера в данный момент времени.

Вероятность того, что за время T_1 подбункерный конвейер не начнёт работать, согласно экспоненциальному закону распределения времени его простоя, равна

$$P'_2 = e^{-\mu_2 T_1}. \quad (27)$$

Время T_1 заполнения бункера грузом до объёма ΔV_2 надбункерным конвейером при неработающем подбункерном конвейере определяется по формуле

$$T_1 = \frac{\rho \Delta V_2}{\bar{m}_Q}. \quad (28)$$

Согласно теореме о вероятности произведений двух независимых событий вероятность переполнения бункера $\bar{P}_c$ равна

$$\bar{P}_c = \bar{P}_2 P'_2. \quad (29)$$

Подставляя (26) и (27) в (29), в результате получим вероятность переполнения бункера

$$\bar{P}_c = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} e^{-\mu_2 T_1}, \quad (30)$$

где $T_1 = \frac{\rho \Delta V_2}{\bar{m}_Q}$.

Вероятность непереполнения бункера P_c определим по формуле

$$P_c = 1 - \bar{P}_c = 1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} e^{-\mu_2 T_1}$$

или с учётом (28) имеем:

$$P_c = 1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} e^{-\frac{\rho \Delta V_2}{\bar{m}_Q} \mu_2}. \quad (31)$$

Подставляя (31) в (25), получим пропускную способность системы «конвейер – бункер – конвейер» в случае работы аккумулирующего бункера в первом управляемом режиме

$$m_c = \left[1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} e^{-\frac{\rho \Delta V_2}{\bar{m}_Q} \mu_2} \right] \bar{m}_Q, \quad (32)$$

где $\Delta V_2 = V - V_{32}$.

Формула (32) совпадает с формулой работы [11], полученной для пустого бункера и постоянно работающего надбункерного конвейера.

Формулу (32) можно получить и другим путём, устремив $\bar{Q}_n \rightarrow \infty$ в выражении (22), полученном для аккумулирующего бункера, работающего в неуправляемом режиме при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$. При этом V необходимо заменить на разность $\Delta V_2 = V - V_{32}$.

Следовательно, средняя пропускная способность системы «конвейер – бункер – конвейер» с аккумулирующим бункером, работающим в первом управляющем режиме, при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ (см. рис. 2) [12] определяется по формуле

$$m_c = \left(1 - \frac{\gamma_2}{1 + \gamma_2} e^{-\frac{\rho \Delta V_2}{\bar{m}_Q} \mu_2} \right) \bar{m}_Q, \quad (33)$$

где $\bar{m}_Q = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}$; $\gamma_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}$; $\gamma_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$; $\Delta V_2 = V - V_{32}$ ($\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$).

В случае работы аккумулирующего бункера во втором управляющем режиме при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$, проводя аналогичные выкладки, получим для системы «конвейер – бункер – конвейер» среднюю пропускную способность

$$m_c = \left(1 - \frac{\gamma_1}{1 + \gamma_1} e^{-\frac{\rho \Delta V_1}{\bar{Q}_n} \mu_1} \right) \bar{Q}_n, \quad (34)$$

где $\bar{Q}_n = \frac{Q_n}{1 + \gamma_2}$; $\Delta V_1 = V - V_{31}$.

Формулу (34) можно получить также другим путём, устремив $m_Q \rightarrow \infty$ в выражении (12), полученном для аккумулирующего бункера, работающего в неуправляемом режиме при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$. При этом V необходимо заменить на разность $\Delta V_1 = V - V_{31}$.

Из формул (33) и (34) следует, что при больших значениях разностей ΔV_2 и ΔV_1 , т.е. при $\Delta V_2 \rightarrow \infty$ и $\Delta V_1 \rightarrow \infty$, $m_c \rightarrow \bar{m}_Q$ и $m_c \rightarrow \bar{Q}_n$ соответственно.

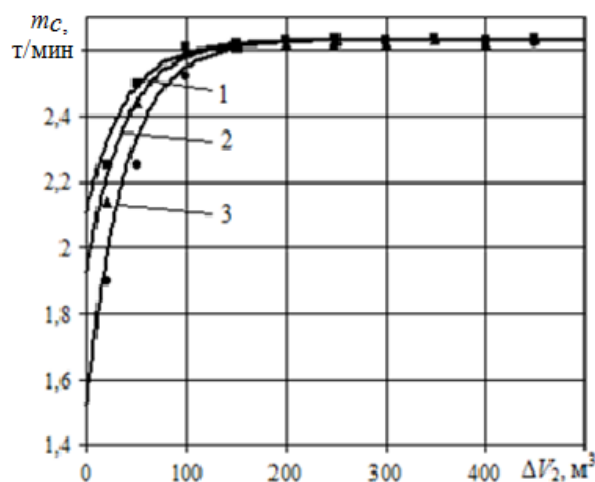
На рис. 8 показаны графики зависимости пропускной способности системы «конвейер – бункер – конвейер» при работе аккумулирующего бункера в первом управляемом режиме от ΔV_2 в случае $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ при различных значениях $\lambda_2 = 0,017; 0,025; 0,05 \text{ мин}^{-1}$, рассчитанные по формуле (33). При этом исходные данные принимали значения: $\lambda_1 = 0,025 \text{ мин}^{-1}$; $\mu_1 = 0,0614 \text{ мин}^{-1}$; $\mu_2 = 0,069 \text{ мин}^{-1}$; $m_Q = 3,7 \text{ т/мин}$; $\rho = 1 \text{ т/м}^3$.

Из графиков (см. рис. 8) видно, что с увеличением ΔV_2 средняя пропускная способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» увеличивается и при значениях $\Delta V_2 > 100 \text{ м}^3$ независимо от значений λ_2 принимает постоянное значение, равное $\bar{m}_Q$ ($\bar{m}_Q = 2,63 \text{ т/мин}$).

Кроме того, из рис. 8 видно, что при значениях $0 < \Delta V_2 < 100 \text{ м}^3$ с увеличением λ_2 пропускная способность m_c увеличивается.

На том же рисунке квадратами, треугольниками и кружочками показаны результаты имитационного моделирования. Расхождение результатов теории и имитационного моделирования не превышает 3 %.

На рис. 9 приведены графики зависимости пропускной способности m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» при работе аккумулирующего бункера в первом управляемом режиме от ΔV_2 и пропускной способности m_c при работе аккумулирующего бункера в неуправляемом режиме от V в случае $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$, рассчитанные по формуле (33) (кривая 1) и по формуле (22) (кривые 2, 3, 4) при различных значениях производительности питателя $Q_n = 4,0; 5,0; 7,0 \text{ т/мин}$ соответственно. При этом интенсивности простоев и восстановлений



1 – $\lambda_2 = 0,017 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $\lambda_2 = 0,025 \text{ мин}^{-1}$; 3 – $\lambda_2 = 0,05 \text{ мин}^{-1}$

Рисунок 8 – Графики зависимости пропускной способности m_c аккумулирующего бункера, работающего в первом управляемом режиме, от ΔV_2 в случае $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$

надбункерного конвейера равнялись $\lambda_1 = 0,025 \text{ мин}^{-1}$; $\mu_1 = 0,0614 \text{ мин}^{-1}$, а подбункерного конвейера – $\lambda_2 = 0,017 \text{ мин}^{-1}$; $\mu_2 = 0,069 \text{ мин}^{-1}$, величина грузопотока, поступающего на надбункерный конвейер, равнялась $m_Q = 3,7 \text{ т/мин}$; $\rho = 1 \text{ т/м}^3$.

Как показывают графики, пропускная способность аккумулирующего бункера, работающего в первом управляемом режиме, всегда больше пропускной способности бункера, работающего в неуправляемом режиме. Кроме того, с увеличением производительности питателя пропускная способность бункера, работающего в неуправляемом режиме, увеличивается, и при достижении объема аккумулирующего бункера V больше 300 м^3 пропускная способность бункера достигает максимального значения, равного среднему значению поступающего в бункер грузопотока, не зависимо от режима его работы, т.е. $m_c = \bar{m}_Q$.

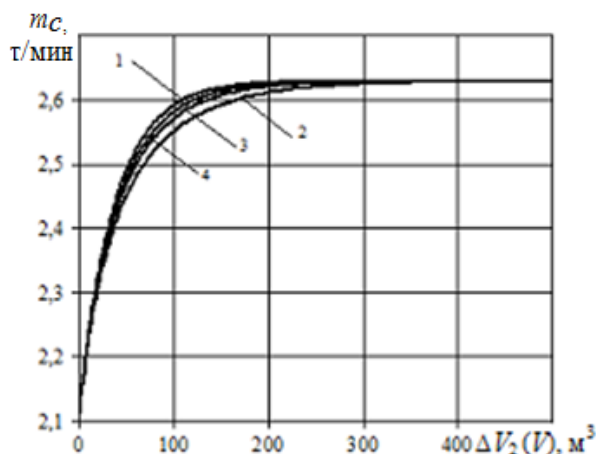


Рисунок 9 – Графики зависимости пропускной способности m_c аккумулирующего бункера, работающего в управляемом и неуправляемом режимах, от $\Delta V_2(V)$ в случае

$$\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$$

Задаваясь малым значением разности ε среднего значения пропускной способности бункера m_c и среднего значения поступающего в бункер грузопотока $\bar{m}_Q$ ($\bar{m}_Q - m_c = \varepsilon$), из равенства (33) определяем максимальное значение объема аккумулирующего бункера независимо от режима его работы в случае $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ по формуле

$$V_{\max} = \frac{\bar{m}_Q}{\rho} \cdot \frac{\ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} \cdot \frac{\bar{m}_Q}{\varepsilon}\right)}{\mu_2} + V_{\min}, \quad (35)$$

где $V_{\min}$ – минимальный допустимый объем груза в аккумулирующем бункере, м^3 ;

ε – заданная точность ($\varepsilon = 0,01$), т/мин .

Для неуправляемого и второго управляемого режимов работы аккумулирующего бункера при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$ можно также согласно формулам (12) и (34) определить максимальный объем аккумулирующего бункера, равный

$$V_{\max} = \frac{\bar{Q}_n}{\rho} \cdot \frac{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \cdot \frac{\bar{Q}_n}{\varepsilon}\right)}{\mu_1} + V_1. \quad (36)$$

Из формулы (35) следует, что в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом и первом управляемом режимах при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ максимальный

объём аккумулирующего бункера с увеличением поступающего в него среднего грузопотока $\bar{m}_Q$ увеличивается, зависит от интенсивностей простоя и восстановления подбункерного конвейера λ_2 и μ_2 и не зависит от среднего грузопотока $\bar{Q}_n$, разгружаемого из бункера.

Из формулы (36) следует, что в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом и втором управляемом режимах при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$ максимальный объём бункера с увеличением разгружаемого из него грузопотока $\bar{Q}_n$ увеличивается, зависит от интенсивностей простоя и восстановления надбункерного конвейера λ_1 и μ_1 и не зависит от среднего грузопотока $\bar{m}_Q$, поступающего в бункер.

Выводы

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. На основе теории марковских процессов разработаны математические модели, описывающие процесс функционирования системы «конвейер – бункер – конвейер» с аккумулирующим бункером, работающем в неуправляемом режиме, а также в управляемом режиме, т.е. в режиме поддержания объёма груза в бункере в заданных пределах.

2. Установлено, что пропускная способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом режиме независимо от соотношений средних грузопотоков, поступающего в бункер $\bar{m}_Q$ и разгружаемого из него $\bar{Q}_n$, с увеличением объёма бункера V сначала увеличивается, а затем при увеличении объёма бункера асимптотически стремится к постоянному значению, равному $\bar{Q}_n$ при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ и $\bar{m}_Q$ при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$. При этом при $\bar{m}_Q \geq \bar{Q}_n$ пропускная способность m_c с увеличением $\bar{Q}_n$ увеличивается, а при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ пропускная способность m_c практически не изменяется.

3. Установлено, что пропускная способность m_c системы «конвейер – бункер – конвейер» в случае работы аккумулирующего бункера в первом управляемом режиме при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ с увеличением минимального объёма незаполненной части бункера ΔV_2 увеличивается и при дальнейшем увеличении ΔV_2 асимптотически приближается к $\bar{m}_Q$. При этом пропускная способность m_c на 13 % больше пропускной способности той же системы, но в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом режиме.

4. Установлено, что в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом и первом управляемом режимах при $\bar{m}_Q < \bar{Q}_n$ максимальный объём аккумулирующего бункера с увеличением поступающего в него среднего грузопотока $\bar{m}_Q$ увеличивается, зависит от интенсивностей простоя и восстановления подбункерного конвейера λ_2 и μ_2 и не зависит от среднего грузопотока $\bar{Q}_n$, разгружаемого из бункера.

5. Установлено, что в случае работы аккумулирующего бункера в неуправляемом и втором управляемом режимах при $\bar{m}_Q > \bar{Q}_n$ максимальный объем бункера с увеличением разгружаемого из него грузопотока $\bar{Q}_n$ увеличивается, зависит от интенсивностей простоя и восстановления надбункерного конвейера λ_1 и μ_1 и не зависит от среднего грузопотока $\bar{m}_Q$, поступающего в бункер.

6. Полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем конвейерного транспорта горных предприятий, а также при создании их систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петренко С.Я., Полант Г.Я., Шконда В.В., Чулика А.Н. Прогрессивная техника и технология на подземном транспорте угольных шахт. К.: Техника, 1990. 271 с.
2. Кирия Р.В., Максютенко В.Ю., Брагинец Д.Д. Управление бункерами, работающими в системах конвейерного транспорта угольных шахт. *Збірник наукових праць НГУ. Дніпропетровськ*, 2012. № 37. С. 230-236.
3. Владзиевский А.П. Автоматические линии в машиностроении. Книга 1. М.: Машгиз, 1958. 430 с.
4. Кордонский Х.Б. Приложения теории вероятностей в инженерном деле. М. – Л.: Физматгиз, 1963. 436 с.
5. Системы подземного транспорта на угольных шахтах / В.А. Пономаренко, Е.Л. Креймер, Г.А. Дунаев и др. М.: Недра, 1975. 309 с.
6. Шахмейстер Л.Г., Ярошевский Б.И. Расчет осредняющей емкости у лавы методами теории массового обслуживания. *Уголь Украины*. 1967. №8. С. 66-68.
7. Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью. М.: Советское радио, 1974. 296 с.
8. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 420 с.
9. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
10. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2011. 448 с.
11. Хенли Э.Дж., Кумamoto Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
12. Kiriya R.V., Babenko J.V. Modeling of functioning processes of underground conveyor transport of coal mines with controlled accumulative hoppers. *Системні технології. Дніпро*, 2016. Вип. 6 (107). С. 88-97.

REFERENCES

1. Petrenko, S.Ya., Polant, G.Ya., Shkonda, V.V. and Chupika, A.N. (1990), *Progressivnaya tekhnika i tekhnologiya na podzemnom transporte ugolnykh shakht* [Progressive engineering and technology in underground transport of coal mines], Tekhnika, Kiev, Ukraine.
2. Kiriya, R.V., Maksyutenko, V.Yu. and Braginets, D.D. (2012), "Coal mine conveyor transport systems bunker control", *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no. 37, pp. 230-236.
3. Vladziyevskiy, A.P. (1958), *Avtomaticheskije linii v mashinostroyenii. Kniga 1* [Automatic lines in mechanical engineering. Book 1], Mashgiz, Moscow, USSR.
4. Kordonskiy, Kh.B. (1963), *Prilozheniya teorii veroyatnostey v inzhenernom dele* [Applications of probability theory in engineering], Fizmatgiz, Moscow-Leningrad, USSR.
5. Ponomarenko, V.A., Kreymmer, E.L. and Dunaev, G.A. (1975), *Sistemy podzemnogo transporta na ugolnykh shakhtakh* [Underground transport systems in coal mines], Nedra, Moscow, USSR.
6. Shakhmeyster, L.G. and Yaroshevskiy, B.I. (1967), "Calculation of the averaging capacity of a lava by the methods of queuing theory", *Coal of Ukraine*, no. 8, pp. 66-68.
7. Cherkesov, G.N. (1974), *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem s vremennoy izbytochnostyu* [Reliability of technical systems with temporary redundancy], Sovetskoye radio, Moscow, USSR.
8. Druzhinin, G.V. (1986). *Nadezhnost' avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem* [Reliability of automated production systems], Energoatomizdat, Moscow, USSR.
9. Gnedenko, B.V., Belyaev, Yu.K. and Soloviev, A.D. (1965), *Matematicheskiye metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in the theory of reliability], Nauka, Moscow, USSR.
10. Venttsel, E.S. and Ovcharov, L.A. (2011), *Teoriya sluchaynykh protsessov i yeye inzhenernyye prilozheniya: uchebnoye posobiye* [The theory of random processes and its engineering applications: a training manual], KNORUS, Moscow, Russia.
11. Henli, E.Dzh. and Kumamoto, H. (1984), *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem i otsenka riska* [Reliability of technical systems and risk assessment], Mashinostroeniye, Moscow, USSR.
12. Kiriya, R.V. and Babenko, J.V. (2016), "Modeling of functioning processes of underground conveyor transport of coal mines with controlled accumulative hoppers", *Systemni tekhnologii*, no. 6 (107), pp. 88-97.

Об авторе

Кирия Руслан Виссарионович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им.

Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, kiriya.igtm@gmail.com

About the author

Kiriia Ruslan Visarionovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, kiriya.igtm@gmail.com

Анотація. Стаття присвячена питанню математичного моделювання функціонування акумулюючих бункерів систем підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт при різних режимах їх роботи, а також на підставі цих моделей визначенню оптимального об'єму акумулюючих бункерів.

Конвеєрний транспорт є однією з головних ланок у видобутку вугілля підземним способом.

В даний час у зв'язку з інтенсифікацією гірничих робіт широкого поширення набули шахти з великою кількістю лав від 3 до 7 і продуктивністю вугілля від 6 до 15 тис. тон за зміну. Система підземного конвеєрного транспорту цих шахт являє собою велику кількість конвеєрів зі складною розгалуженою структурою. Однак такі системи конвеєрного транспорту через велику кількість конвеєрів, їх простоїв через аварійні, технологічні та організаційні причини мають низьку пропускну здатність.

Для підвищення пропускну здатності систем підземного транспорту вугільних шахт у зв'язку з обмеженням простору застосовуються акумулюючі бункери. Акумулюючі бункери дозволяють за рахунок накопичення певної кількості вантажу в бункерах в разі простою лав і конвеєрів з різних причин продовжувати деякий час роботу системи конвеєрного транспорту і тим самим збільшити її пропускну здатність. Однак ефективність застосування акумулюючих бункерів в системі конвеєрного транспорту вугільних шахт невисока через відсутність досить простих математичних моделей їх функціонування, що дозволяють визначити кількість і місце розташування акумулюючих бункерів в системі конвеєрного транспорту, а також їх оптимальні об'єми.

На основі теорії марковських процесів отримано спрощені математичні моделі функціонування акумулюючих бункерів, які працюють в некерованому і керованому режимах. Визначено пропускну здатність системи «конвеєр – бункер – конвеєр» з акумулюючим бункером, що працює в некерованому і керованому режимах. Проведено порівняльний аналіз роботи акумулюючого бункера в некерованому і керованому режимах. Визначено максимальний об'єм акумулюючого бункера, при перевищенні якого пропускну здатність акумулюючого бункера не збільшується.

Ключові слова: акумулюючий бункер, система підземного конвеєрного транспорту, математичні моделі функціонування

Abstract. The article is devoted to the question of mathematical modeling of the functioning of storage bins of underground conveyor systems of coal mines under various operating modes, as well as the determination of the optimal volume of storage bins based on these models.

Conveyor transport is one of the main links in underground coal mining.

Currently, due to the intensification of mining operations, mines with a large number of lavas from 3 to 7 and coal productivity from 6 to 15 thousand tons per shift have become widespread. The underground conveyor system of these mines is a large number of conveyors with a complex branched structure. However, such conveyor transport systems due to the large number of conveyors, their downtime for emergency, technological and organizational reasons have low throughput.

To increase the throughput capacity of underground coal mine transport systems due to space limitations, storage bins are used. Accumulating bunkers allow, due to the accumulation of a certain amount of cargo in the bunkers in the event of idle time of the lavas and conveyors, for various reasons, to continue the operation of the conveyor transport system for some time and thereby increase its throughput. However, the efficiency of the use of storage bins in the conveyor system of coal mines is low due to the lack of sufficiently simple mathematical models of their functioning, which allows determining the number and location of accumulating bins in the system of conveyor transport, as well as their optimal volumes.

Based on the theory of Markov processes, simplified mathematical models of the functioning of accumulating bunkers operating in uncontrolled and controlled modes are obtained. The throughput of the conveyor-hopper-conveyor system with an accumulating hopper operating in uncontrolled and controlled modes is determined. A comparative analysis of the operation of the storage hopper in uncontrolled and controlled modes is done. The maximum volume of the storage hopper is determined, beyond which the capacity of the storage hopper does not increase.

Keywords: storage bunker, underground conveyor system, mathematical models of functioning

Статья поступила в редакцию 26.02.2020

Рекомендовано к печати чл.-корр. НАН Украины, д-ром техн. наук А.П. Круковским