

В.Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко, Р.В. Кирия, Д.Д. Брагинец, Д.А. Номеровский

ВЛИЯНИЕ ГРАНСОСТАВА НАСЫПНОГО ГРУЗА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ КРУТОНАКЛОННЫМИ КОНВЕЙЕРАМИ

В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований устойчивости насыпного груза на ленте КНК. Установлена взаимосвязь факторов, оказывающих существенное влияние на устойчивость груза на ленте, и выходных параметров. Разработаны рекомендации, позволяющие повысить устойчивость насыпного груза на ленте КНК.

ВПЛИВ ГРАНСКЛАДУ НАСИПНОГО ВАНТАЖУ НА СТІЙКІСТЬ ТРАНСПОРТУВАННЯ КРУТОПОХИЛИМИ КОНВЕЄРАМИ

В статті наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень стійкості насипного вантажу різного гранскладу на стрічці КПК. Встановлено взаємозв'язок чинників, що істотно впливають на стійкість вантажу на стрічці, і вихідних параметрів. Розроблено рекомендації, що дозволяють підвищити стійкість насипного вантажу на стрічці КПК.

INFLUENCE OF BULK COMMODITY GRAIN-SIZE COMPOSITION ON TRANSPORTATION STEADINESS BY HIGH-ANGLE CONVEYORS

In the article the results of theoretical and experimental researches of stability of piled up load of on the ribbon of abruptly inclined conveyer are given. Interconnection of factors that have a substantial influence on stability of load on the ribbon and out-parameters of abruptly inclined conveyer) is determined. Recommendation allowing to promote stability of piled up load on the ribbon of abruptly inclined conveyer are worked out.

ПРОБЛЕМА И ЕЕ СВЯЗЬ С НАУЧНЫМИ И ПРАКТИЧЕСКИМИ ЗАДАЧАМИ

Особенности применения крутонаклонных конвейеров (КНК) на горных предприятиях подробно изложены в [1-3]. Установлено [1], что наиболее эффективно их использование на карьерах. Однако в связи с появлением конвейеров фирмы Metso Minerals [3] область применения КНК может быть значительно расширена путем использования их при подземной добыче на

рудниках и шахтах [4].

Научные публикации по проектированию и эксплуатации КНК (рис. 1) с рифленной лентой 1, с перегородками 2, с повышенной желобчатостью 3, с прижимной лентой 4, с повышенной желобчатостью и прижимной лентой 5, трубчатые конвейеры 6 и вертикальные с карманами 7 и специальными сосудами фирмы Metso Minerals 8 свидетельствуют об ограничениях, определяющих область применения КНК в зависимости от крупности груза. Так, согласно [2-5], устойчивость насыпного гру-

за на ленте КНК зависит, главным образом, от степени заполнения поперечного сечения ленты, гранулометрического состава насыпного груза, бокового давления груза и влажности. При этом применение специальной прижимной ленты и роликов [2] позволяет создать дополнительную силу трения между лентой и грузом и увеличить предельный угол транспортирования до 70° при крупности до $0,2 B_l$ мм, где B_l – ширина конвейерной ленты; вертикальные конвейеры с карманами, специальными сосудами фирмы Metso Minerals работают надежно также при крупности насыпного груза не более $0,2 B_l$ мм [3]. Таким образом, вопросы транспортирования насыпных грузов крупностью свыше $0,2 B_l$ мм исследованы недостаточно и в технической литературе практически отсутствуют КНК для крупнокусковых грузов.

Целью настоящей статьи является установление взаимосвязи между крупностью насыпного груза и углом наклона КНК.



Рис. 1. Взаимосвязь предельных углов КНК различных конструкций в зависимости от крупности транспортируемого груза: 1 – мелкокусовой груз; 2 – крупнокусовой груз. Цифры по оси абсцисс соответствуют различным конструкциям КНК: 1-5 – конвейеры с рифленной лентой, с перегородками, с повышенной желобчатостью ленты, с прижимной лентой, с повышенной желобчатостью и прижимной лентой; 6-8 – конвейеры трубчатые, вертикальные с карманами, вертикальные со специальными сосудами

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели были выполнены теоретические и экспериментальные исследования устойчивости насыпного груза на ленте КНК, при этом крупность насыпного груза оценивалась соотношением a_{max}/B_l , где a_{max} – максимальный размер куска. Мелкокусовой груз представляет собой совокупность твердых частиц ($a_{max}/B_l < 0,1$) различной формы, а расстояние между частицами заполнено воздухом или смесью воды и растворенных в ней минералов. Сортированные грузы отличаются большей крупностью частиц ($a_{max}/B_l = 1,1 \div 0,2$), которая необходима для выполнения определенных технологических операций. Крупнокусовые насыпные грузы ($a_{max}/B_l > 0,2$) отличаются от мелкокусовых грузов структурой грузопотока: в среде мелкокусового груза на ленте конвейера размещены отдельные крупные куски, соизмеримые с шириной ленты и шагом расстановки роликоопор. Согласно [6], крупные куски имеют, чаще всего, форму параллелепипеда, ориентируются в потоке вдоль ленты и имеют локальные выступы, а на ленте конвейера после загрузки могут находиться на подсыпке и без нее.

В статье сформулированы следующие задачи:

1. Исследование процессов происходящих при транспортировании насыпных грузов различного грансостава на ленте КНК.

2. Разработка методики выполнения экспериментальных исследований устойчивости насыпного груза на ленте КНК и анализ полученных результатов.

ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА И РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние мелкокусовых фракций и определим предельный угол их транспортирования на ленте КНК (рис. 2).

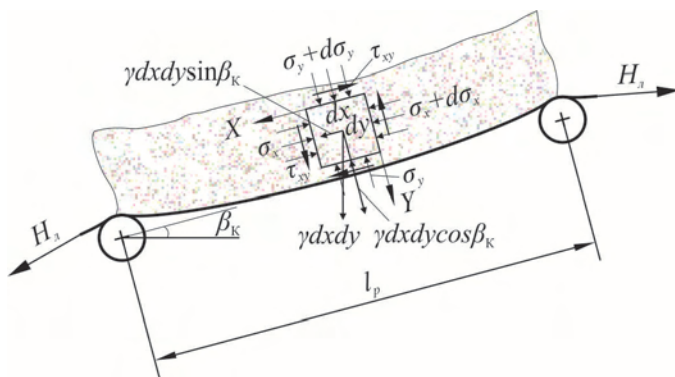


Рис. 2. Схема определения напряженно-деформированного состояния мелкокусковых фракций при наклоне конвейера под углом β_k

Для формализации расчетной схемы принимаем следующие допущения:

– насыпной груз состоит из частиц $a_{max} \ll 0,1 B_d$, что позволяет рассматривать его как сплошную среду;

– рассматриваем предельное напряженно-деформированное состояние насыпного груза, при котором отсутствует взаимное скольжение частиц относительно друг друга.

Выделим в общем объеме насыпного груза элемент с размерами $dx \cdot dy \cdot 1$, наклоненный к горизонтالي под углом β_k . На каждую площадку элемента действуют нормальные (σ_y , σ_x), касательные напряжения (τ_{xy}) и сила тяжести $G = dx \cdot dy \cdot \gamma$, которая в зависимости от угла β_k раскладывается на нормальную ($G \cos \beta_k$) и тангенциальную ($G \sin \beta_k$) составляющие.

Определим действующие напряжения на площадке, наклоненной под углом β_k к оси X (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_x \cos^2 \beta_k + \sigma_y \sin^2 \beta_k + \\ &+ 2\tau_{xy} \sin \beta_k \cos \beta_k; \\ \tau &= (\sigma_x + \sigma_y) \sin \beta_k \cos \beta_k + \\ &+ \tau_{xy} (\sin^2 \beta_k - \cos^2 \beta_k). \end{aligned} \quad (1)$$

Подставляя выражение (1) в $\tau = \sigma g \rho$ и рассматривая предельный случай $\beta_k = \rho$, получим:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \tau_{xy} \frac{(\sin^2 \beta_k + \cos^2 \beta_k)}{\sin \beta_k} \cos \beta_k; \\ \frac{\tau_{xy}}{\sigma_y} &= \operatorname{tg} \beta_k = \operatorname{tg} \rho. \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ – угол естественного откоса материала в движении.

Следовательно, предельный угол транспортирования насыпного груза на ленте в общем случае ограничивается углом естественного откоса материала. В частном случае удержания насыпного груза на ленте силами трения ($F_{сд} < N \operatorname{tg} \varphi$, где $F_{сд}$ – сдвигающая сила; N – нормальная составляющая силы тяжести; φ – угол внутреннего трения, предельное значение которого равно ρ) условием устойчивости является:

$$\operatorname{tg} \beta_k = f, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения скольжения груза по ленте.

На рис. 3 представлена расчетная схема для определения угла наклона конвейера при транспортировании крупных кусков, размещенных в мелкокусковом грузе. Ку-

сок в форме параллелепипеда с размерами: a – длина, b – высота, c – ширина, движется со скоростью v_d и взаимодействует с роlikоопорами под углом набегания $\Delta\beta$. Приведенная масса куска – $m_{об}$, натяжение ленты – H_d . После взаимодействия кусок приподнимается передней гранью над роlikом (совершает равнозамедленное движение относительно линии «С») и движется совместно с лентой. Сила взаи-

модействия зависит от положения куска на ленте между роlikоопорами (l_p) и определяется из выражения:

$$R = m_{об} g \frac{a}{2l_p} (K_d - 1), \quad (4)$$

где K_d – коэффициент динамического взаимодействия.

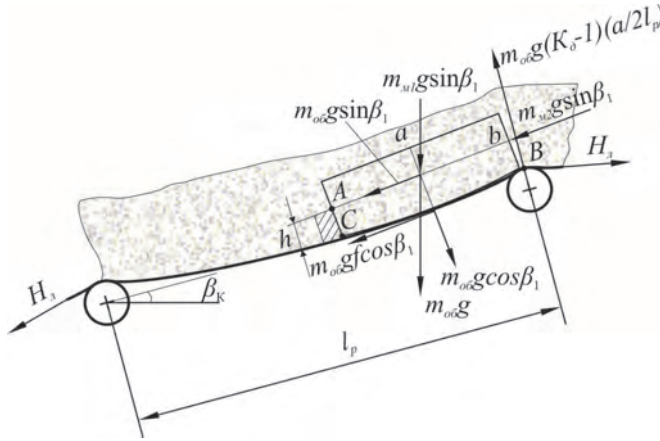


Рис. 3. Схема определения предельного угла наклона конвейера при транспортировании крупных кусков

При формализации модели принимаются следующие допущения: кусок – недеформируемое твердое тело; лента – гибкая нить, жесткостью на изгиб которой можно пренебречь; угол наклона ленты, обусловленный ее прогибом между роlikоопорами и шагом их расстановки, определяется взаимосвязью погонной нагрузки и натяжением ленты.

Согласно рис. 3, уравнение моментов сил относительно линии «А» имеет следующий вид:

$$m_{об} g \frac{b}{2} \sin \beta_1 = m_{об} g \frac{a}{2} \cos \beta_1 - m_{об} g \frac{a^2}{2l_p} (K_d - 1) \cos \beta_1;$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{a}{b} \cdot \frac{2l_p - a(K_d - 1)}{2l_p};$$

$$\beta_{k_{np}} = \varphi_{np} - \beta_1, \quad (5)$$

где $\beta_{k_{np}}$, φ_{np} – соответственно предельный угол наклона конвейера и угол, при котором кусок теряет устойчивость;

β_1 – угол взаимодействия куска с роlikоопорой.

Нетрудно видеть, что при $K_d = 1$ и $l_p = a$ имеем частный случай равновесного состояния куска, свободно лежащего на ленте $\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{a}{b}$. В момент пуска конвейера

действует сила инерции куска, возникающий при этом угол β_δ определится из выражения:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta_\delta &= \frac{a}{b}(1 + j/g); \\ \beta_{k_{np}} &= \varphi_{np} - (\beta_k + \Delta\beta + \beta_\delta), \end{aligned} \quad (6)$$

где j – среднее ускорение при пуске конвейера [7].

Влияние сил инерции можно определить также если приравнять сумму моментов сил (5) моменту инерции куска при вращении:

$$\beta_u = \frac{0,5(b \sin \beta_1 - a \cos \beta_1) - a \left(1 - \frac{a(K_\delta - 1)}{2l_p} \right) \cos \beta_1}{\frac{2J_k}{m_{o\delta} g t^2} - \frac{b}{2} \cos \beta_1 - \frac{a}{2} \left(1 - \frac{a(K_\delta - 1)}{2l_p} \right) \sin \beta_1}. \quad (8)$$

Следовательно, предельный угол транспортирования насыпного груза на ленте конвейера с учетом (5), (8) определится:

$$\beta_{k_{np}} = \varphi_{np} - (\beta_k + \Delta\beta + \beta_u). \quad (9)$$

Рассмотрим случай транспортирования насыпного груза ленточным конвейером с рифленой лентой. Кусок в виде параллелепипеда (шара) лежит на конвейерной ленте, имеющей угол наклона β_k , и упирается гранью в риф (перегородку) высотой h . Составим уравнение моментов относительно линии «А» (рис. 4):

$$\begin{aligned} m_{o\delta} g \sin(\beta_k + \psi) \left(\frac{b}{2} - h \right) &= \\ &= m_{o\delta} g \cos(\beta_k + \psi) \cdot \frac{a}{2} + \\ &+ m_{o\delta} g \cos(\beta_k + \psi) \cdot h \cdot f_0, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} J_k \frac{d^2 \beta_2}{dt^2} &= m_{o\delta} g \sin \beta_2 \cdot \frac{b}{2} - m_{o\delta} g \cos \beta_2 \cdot \frac{a}{2} + \\ &+ m_{o\delta} g \frac{a^2}{2l_p} (K_\delta - 1) \cos \beta_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\frac{d^2 \beta_2}{dt^2} = \frac{2\beta_u}{t^2}$ – ускорение куска при равнозамедленном вращении относительно линии «С»;

β_u – дополнительный угол поворота куска от сил инерции при его движении на ленте, $\beta_2 = \beta_1 + \beta_u$. Решая (7) относительно β_u и считая $\sin \beta_u = \beta_u$, $\cos \beta_u = 1$, получим:

где $\psi = \operatorname{tg}(a/b)$.

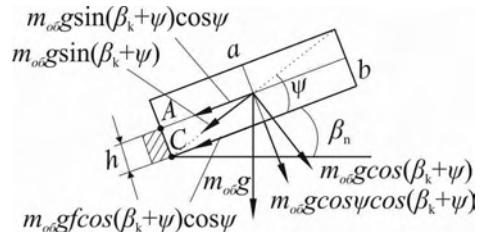


Рис. 4. Расчетная схема определения предельного угла наклона конвейера с выступами (перегородками) на ленте

Принимая $\beta_k + \psi + \beta_n$, после преобразований (10) получим

$$\beta_n = \arctg \left(\frac{a + 2f_0 h}{b - 2h} - \psi \right). \quad (11)$$

Очевидно, что при $h = 0$ $\beta_n = 0$; при

$h = b/2$ $\beta_n = 90^\circ$. Если в выражение (11) подставить $b = a$, $\psi = 0$ и заменить в числителе a на k , то получится значение предельного угла наклона конвейера для овальных кусков диаметром a :

$$\beta_o = \frac{2(k + f_0 h)}{a - 2h}, \quad (12)$$

где k – расстояние от центра куска до перегородки.

При $k = 0$, $h = 0$ имеем $\beta_o = 0$; при $k = a/2$, $h = a/2$ имеем $\beta_o = 90^\circ$. Очень важно в этом случае учитывать соотношение максимального диаметра куска к высоте перегородки:

$$\frac{a_{max}}{h} = \frac{2}{1 - \cos \alpha}, \quad (13)$$

где α – центральный угол, обусловленный высотой перегородки.

Анализ выражения (13) показывает, что для устойчивого движения груза на ленте независимо от формы куска соотношение a_{max}/h не должно быть более 2.

Рассмотрим еще один фактор, оказывающий влияние на эффективность применения конвейеров с перегородками (см. рис. 3). Согласно [6], при транспортировании насыпных грузов на конвейере возникает сегрегация крупных кусков, при которой процесс их «всплывания» происходит следующим образом. При взаимодействии куска с роlikоопорой и подъеме его центра тяжести на величину h_{cp} мелкокусковые фракции заполняют свободное пространство под плоскостью куска, а кусок продолжает перемещаться относительно ролика на подсыпке до момента пересечения его центром тяжести вертикальной оси ролика. При этом происходит шевеление куска на подсыпке из мелкокусковых фракций и под его плоскостью, с другой стороны, также образуется свободное пространство, куда устремляются мелкокусковые фракции. При решении данной задачи

принималось $\psi = 0$, $m_{об} = m_k + m_{m1}$, где m_{m1} – присоединенная масса мелкокусковых фракций к массе куска; прогиб конвейерной ленты не превосходит величины $y \leq 0,1 l_p$, где l_p – расстояние между роlikоопорами; угол внутреннего трения насыпного груза $\varphi < \rho$, а сдвигающая сила $F_{сд} < Ntg \varphi$ (см. рис. 3). В этом случае насыпной груз на ленте удерживается силой трения и перегородками. Как показали кино съемка процесса взаимодействия куска с роlikоопорой и экспериментальное определение динамических характеристик (K_∂), после повторных взаимодействий куска на подсыпке значение h_{cp} практически не повышается и поэтому условием устойчивого движения куска на ленте является:

$$h_{неp} \gg h_{cp}. \quad (14)$$

Чем больше сила взаимодействия, тем больше h_{cp} и при пересечении вертикальной линии (φ_{np}) центром тяжести куска последний теряет устойчивость при невыполнении условий (8), (9), (10), (14).

Если силы, действующие на кусок, направлены вдоль конвейерной ленты, то устойчивость насыпного груза на ленте с выступами (перегородками) соблюдается при условии:

$$\tau_{cp} = \frac{\sum P_k}{F_n} \leq [\tau]_{cp},$$

где τ_{cp} , $[\tau]_{cp}$ – реальные и допустимые напряжения в перегородке под действием внешних сил;

$F_n = bl$ – площадь поперечного сечения перегородки;

b – ширина;

l – длина;

$\sum P_k$ – сумма проекций внешних сил на плоскость ленты.

Величину h_{cp} определим, согласно [7],

из уравнения баланса кинетической энергии вращения куска после взаимодействия и суммы работ потенциальных и внешних сил

$$h_{cp} = \frac{a^2}{2lp} (K_{\partial} - 1) - \frac{J_k \omega^2}{2m_k g}, \quad (15)$$

где $J_k = m_{об} \left(\frac{a^2 + b^2}{3} \right)$ – момент инерции

куска;

ω – угловая скорость куска после соударения.

Экспериментальные исследования устойчивости насыпного груза на ленте выполнялись на лабораторном стенде (рис. 5), угол наклона изменялся от 0 до 35°, скорость ленты – от 0,7 до 2 м/с, ширина ленты составляла $B_l = 500$ мм, длина конвейера – 8 м, роликоопоры – желобчатые, 3-х роликовые.



Рис. 5. Лабораторный стенд для определения устойчивости насыпного груза на ленте КНК

Методикой выполнения экспериментов предусматривалось определить устойчивость насыпного груза различного гранулометрического состава ($a_{max} > 0,2 B_l$; $a_{max} < 0,2 B_l$ мм) и вида (уголь, щебень, сухой песок, известняк, руда). При испытаниях использовались отдельные крупные куски $(0,3-0,5) B_l$. Устойчивость груза на

ленте фиксировали киносъемкой при остановленном конвейере, при движении ленты с перегородками высотой 10 мм и 25 мм и без них.

Анализ полученных результатов показал, что:

1. Сухой песок теряет устойчивость на неподвижной ленте при углах наклона конвейера 12°, при движении ленты – при 10°. Перегородки высотой 10 и 25 мм практически не повышают устойчивость сухого песка на ленте и он свободно пересыпается через них. В этом случае потеря сцепления между частицами песка происходит раньше (при углах наклона конвейера 10°), чем их отрыв от конвейерной ленты (14°).

2. Уголь, известняк, щебень крупностью $0,2 B_l$ мм теряют устойчивость на неподвижной ленте при углах наклона конвейера 23°, при подвижной ленте – при углах наклона конвейера 20°. Перегородка высотой 10 мм увеличивает угол транспортирования до 25°, высотой 25 мм – до 30°. Установлено, что скольжение материала относительно конвейерной ленты и потеря сцепления между частицами происходят практически одновременно при 25°.

3. Сортированные грузы (известняк крупностью $0,2 B_l$ мм) теряют устойчивость на неподвижной ленте конвейера при углах наклона 30°, при подвижной ленте – при углах наклона 23°. Перегородка высотой 25 мм удерживает груз на ленте при угле наклона конвейера 28°, перегородка высотой 35 мм – при 35°. Установлено киносъемкой, что сцепление между частицами сортированного груза превышает сцепление частиц с конвейерной лентой, при этом угол внутреннего трения между частицами составляет 30°, а угол трения материала с лентой – 27°.

4. Крупный кусок параллелепипедной формы, соизмеримый с шириной ленты, теряет устойчивость на ней при углах наклона конвейера 30°, при подсыпке мелкокускового груза угол наклона конвейера снижается до 25°, при пуске конвейера – до 20°. Кусок кубической формы теряет ус-

тойчивость при углах наклона 20° . При соотношении максимальных размеров кусков к высоте перегородки $a_{max} / h_{пер} = 10; 4; 3; 2$ устойчивость их на ленте достигается при соотношениях 2,3 и обеспечивает транспортирование крупных кусков при различных скоростях и углах наклона конвейера до 35° .

5. При скоростях 0,7; 1,5; 2 м/с определялась вероятность потери устойчивости крупных кусков кубической формы (железная руда, $\rho = 5800 \text{ кг/м}^3$) различных размеров ($a_{max} > 0,2 B_{л}$ $a_{max} < 0,2 B_{л}$ мм). Потеря устойчивости кусков на ленте фиксировалась киносъёмкой в момент опрокидывания их через опорную грань при углах наклона конвейера $10; 20; 30^\circ$. Установлено, что при $a_{max} < 0,2 B_{л}$ мм вероятность потери устойчивости при наклоне конвейера до 20° и скоростях 2 м/с практически равна нулю и только при угле наклона 30° вероятность потери устойчивости куска

повышается до 0,1. С увеличением $a_{max} > 0,2 B_{л}$ мм вероятность потери устойчивости крупных кусков возрастает и при углах наклона конвейера $20; 30^\circ$ и скорости движения ленты 2 м/с составляет, соответственно, 0,2; 0,35.

ВЫВОДЫ

– устойчивость насыпного груза на ленте КНК определяется с учетом силы взаимодействия крупных кусков с роликоопорой (5), сил инерции кусков (6), (8), процесса сегрегации (14) и соотношения максимального размера куска к высоте перегородки (13);

– значения предельных углов КНК, полученные расчетным способом, хорошо согласуются с данными эксперимента при крупности насыпного груза $a_{max} > 0,2 B_{л}$, $a_{max} < 0,2 B_{л}$ мм.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шешко, Е.Е. Перспективы крутонаклонного подъема на горных предприятиях [Текст] / Е.Е. Шешко, В.И. Морозов, Н.Г. Картавый // Горный журнал. – 1996. – № 6. – С. 56-59.

2. Пертен, Ю.А. Крутонаклонные конвейеры [Текст] / Ю.А. Пертен. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1977. – 216 с.

3. Передовая система крутонаклонной транспортировки на высоту до 500 метров [Текст]: брошюра №1809-05-04-WPC / St. Peterburg, 2000. – 20 с.

4. Вертикальный ленточный конвейер с многопунктовой загрузкой [Текст]: пат. № 98580 Украина / В.Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко, В.В. Виноградов, Р.В. Кирия; № а201105737; заявл. 06.05.2011; опубл. 25.01.12, Бюл. № 10.

5. Гуцин, В.М. Определение основных параметров конвейера с глубокой желобчатостью [Текст] / В.М. Гуцин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1978. – № 6. – С. 82-84.

6. Монастырский, В.Ф. Управление процессом формирования насыпного груза в элементах загрузочных устройств конвейера [Текст]: сб. тр. «Математические заметки» / В.Ф. Монастырский, С.В. Монастырский. – Якутск: Новосибирск СОРАН. – 1998. – С. 152-159.

7. Котов, М.А. К определению допустимого ускорения конвейерной ленты [Текст] / М.А. Котов // Вопросы рудничного транспорта. – К.: Наукова думка. – 1972. – №12. – С. 48-52.

ОБ АВТОРАХ

Монастырский Виталий Федорович – д.т.н., с.н.с. отдела физико-механических основ горного транспорта Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Максютенко Валерий Юрьевич – к.т.н., заведующий отделом физико-механических основ горного транспорта Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Кирия Руслан Виссарионович – к.т.н., с.н.с. отдела физико-механических основ горного транспорта Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Брагинец Дмитрий Дмитриевич – м.н.с. отдела физико-механических основ горного транспорта Ин-

ститута геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Номеровский Денис Анатольевич – аспирант Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.