

УДК 622.22



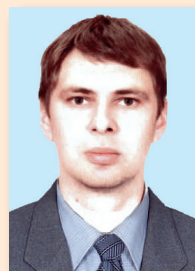
**В. Ф. МОНАСТЫРСКИЙ,**  
доктор техн. наук  
(ИГТМ НАН Украины)



**В. Ю. МАКСЮТЕНКО,**  
канд. техн. наук  
(ИГТМ НАН Украины)



**Д. Д. БРАГИНЕЦ,**  
аспирант  
(ИГТМ НАН Украины)



**Д. А. НОМЕРОВСКИЙ,**  
аспирант  
(ИГТМ НАН Украины)

## Об устойчивости насыпного груза на ленте крутонаклонного конвейера

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований устойчивости насыпного груза различного гранулометрического состава на ленте конвейера. Установлена взаимосвязь факторов, существенно влияющих на устойчивость груза, и выходных параметров (предельного угла наклона, производственного качества КНК). Разработаны рекомендации и технические решения, позволяющие повысить устойчивость насыпного груза на ленте КНК.

Особенности применения крутонаклонных конвейеров (КНК) различных конструкций на горных предприятиях подробно изложены в работах [1–3]. Наибольшая эффективность их использования на карьерах подтверждается [1]. Однако в последнее время в связи с появлением конвейеров Flexowell [3] область применения КНК значительно расширилась на шахтах и рудниках, а также на карьерах при необходимости загрузки полезного ископаемого на уступе и при его транспортировании с глубины 300–400 м. В Западном регионе Якутии (в Украине пока не применяются) конвейеры Flexowell успешно эксплуатируются на обогатительных фабриках и разрабатываются проектные решения для «слепых» вертикальных стволов с многопунктовой загрузкой на горизонте [4].

При проектировании КНК наиболее часто применяют следующие способы удержания насыпного груза на ленте [2]:

- увеличение сил сцепления между насыпным грузом и лентой путем создания рифов, выступов на ее поверхности;
- создание дополнительного давления на насыпной груз за счет изменения желобчатости ленты, применения прижимной ленты и различных конструкций перегородок;
- создание специальных карманов на ленте или жестко к ней при-

крепленных сосудов, позволяющих поднимать насыпной груз различной кусковатости под углом  $90^\circ$  с глубины 500 м.

Анализ каждого из этих направлений [2–5] свидетельствует об ограничениях, определяющих область применения КНК в зависимости от ряда факторов. Так, теоретическими и экспериментальными исследованиями [2, 5] доказано, что устойчивость насыпного груза на ленте глубокой желобчатости зависит главным образом от степени заполнения поперечного сечения ленты, крупности груза, его бокового давления, влажности и может быть обеспечена при углах транспортирования  $15\text{--}30^\circ$ . Оборудование КНК специальными прижимными лентой и роликами [2] позволяет создать дополнительную силу трения и увеличить предельный угол транспортирования в 1,5–2 раза.

Конвейеры с перегородками (выступами) дают возможность увеличить силу сопротивления сползанию насыпного груза по ленте [2] за счет дополнительной шероховатости ленты или перегородок. Вертикальные конвейеры с карманами, специальными сосудами Flexowell работают надежно при крупности насыпного груза не более 300 мм [3]. С повышением крупности груза производительность и ресурс КНК снижаются. В технической литературе

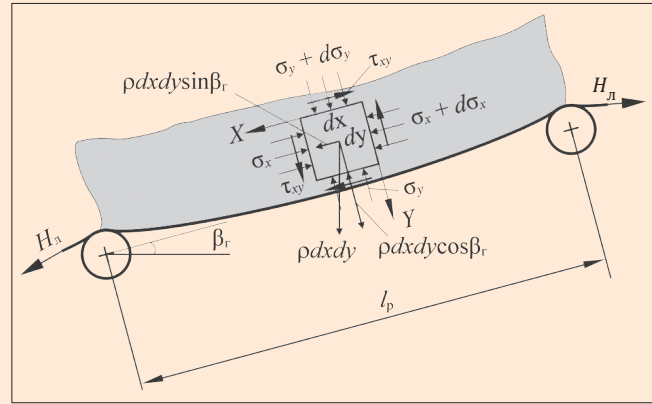
ре можно ознакомиться с результатами исследований влияния отдельных факторов на эффективность работы КНК. Однако общие корреляционные связи между входными факторами и выходными параметрами КНК раскрыты недостаточно. Авторы попытались установить эту взаимосвязь в целях повышения устойчивости насыпного груза на ленте. Для этого определяли значимые факторы.

Значимые факторы, влияющие на предельный угол транспортирования, выбирали в такой последовательности: отбирали из всего объема факторов-показателей системы показателей качества продукции (СПКП) [6] те, которые лучше всего отражают специфику работы конвейера; выбранные факторы ранжировали по значимости; устанавливали корреляционную взаимосвязь между факторами и параметрами; минимизировали количество входных факторов с учетом информативности и достоверности. Значимость факторов определяли в баллах с помощью метода экспертных оценок (по опросным листам и путем анализа литературных источников). Для исследований отобрали 18 факторов, из которых значимыми стали девять: крупность, гранулометрический состав, прочность, влажность, надежность, степень заполнения ленты, коэффициенты трения груза о ленту и внутреннего трения, боковое давление.

В статье приводятся результаты исследования взаимосвязи между крупностью груза и предельным углом наклона КНК.

Крутонаклонные конвейеры проектируются для насыпных грузов, которые отличаются влажностью, крупностью, крепостью и возможностью сохранять свою форму до определенного предела при приложении уплотняющей нагрузки. По крупности насыпные грузы различаются отношением  $a_{\max}/B_{\text{л}}$ , где  $a_{\max}$  — максимальный размер куска транспортируемого груза;  $B_{\text{л}}$  — размер вмещающего сосуда (ленты). Мелкокусковой груз ( $a_{\max}/B_{\text{л}} < 0,1$ ) состоит из совокупности твердых частиц различной формы, а расстояние между частицами заполнено воздухом или смесью воды и растворенных в ней минералов. Сортированные (среднекусковые) грузы ( $a_{\max}/B_{\text{л}} = 0,1 \dots 0,2$ ) отличаются большей крупностью частиц, которая необходима для выполнения определенных технологических операций (например, строительства дорог), а крупнокусковые ( $a_{\max}/B_{\text{л}} > 0,2$ ) — от мелко- и среднекусковых грузов структурой грузопотока: в среде мелкокускового груза на ленте конвейера размещены отдельные крупные фракции, соизмеримые с шириной ленты и шагом расстановки роликоопор. Крупные фракции в форме параллелепипеда ориентируются в потоке вдоль ленты и имеют локальные выступы, а на ленте конвейера после загрузки могут находиться на подсыпке и без нее [7].

Главная особенность КНК — удержание насыпного груза на ленте за счет уплотняющего воздействия. Насыпные грузы, обладающие свойством адгезии, могут уплотняться до такой степени, что их



**Рис. 1.** Схема определения напряженно-деформированного состояния мелкокусковых фракций при наклоне конвейера под углом  $\beta_r$  ( $H_{\text{л}}$  — натяжение ленты).

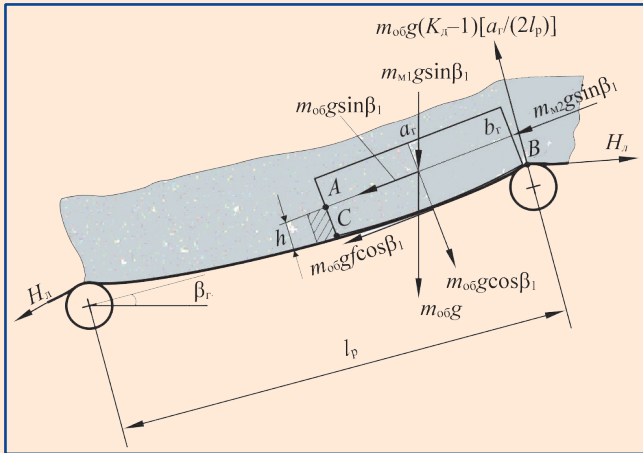
рассматривают как твердое недеформируемое тело, имеющее по периметру ленты сцепление силами трения. Насыпные грузы (песок, гравий), которые не уплотняются при воздействии на них дополнительных сил, а предельный угол транспортирования определяется углом внутреннего трения  $\varphi$ , можно отнести к упругопластичным.

Сортированные грузы представим как совокупность частиц примерно одинаковых размеров, имеющих выступы, с помощью которых они взаимодействуют с лентой, создавая дополнительное сопротивление сдвигу не за счет силы трения, а силы резания, возникающей при протягивании груза силой  $F_{\text{сд}}$  по ленте. При этом насыпной сортированный груз можно рассматривать как деформированное твердое тело с множеством выступов. Груз уплотняется вследствие уменьшения зазоров между частицами, увеличения давления на ленту и перестроения на ней груза.

В каждом сечении крупнокускового груза можно наблюдать мелкие фракции или крупные куски транспортируемого груза, так как на каждый крупный кусок груза в общем грузопотоке приходится порция мелкокусковых фракций [7]. Рассмотрим напряженно-деформированное состояние мелкокусковых фракций и определим предельный угол их транспортирования на ленте КНК (рис. 1).

Для расчетной схемы принимаем следующие допущения:

- насыпной груз состоит из частиц  $a_{\max} \ll 0,1 B_{\text{л}}$ , размеры которых считаются малыми по сравнению с размерами сосуда, что позволяет рассматривать его как сплошную среду;
- при касательных напряжениях  $\tau = \sigma \tan \varphi$  ( $\sigma$  — нормальные напряжения,  $\varphi$  — угол внутреннего трения) возникает предельное напряженно-деформированное состояние насыпного груза, при котором отсутствует взаимное скольжение частиц относительно друг друга.



**Рис. 2.** Схема определения предельного угла наклона конвейера при транспортировании крупного груза.

Выделим в общем объеме насыпного груза элементарный элемент с размерами  $dx dy$ , наклоненный к горизонтали под углом  $\beta_r$ . На каждую площадку элемента действуют нормальные  $\sigma$  и касательные  $\tau$  напряжения, сила тяжести  $g = \rho dx dy$  ( $\rho$  — удельная плотность), которая в зависимости от угла  $\beta_r$  раскладывается на нормальную  $g \cos \beta_r$  и тангенциальную  $g \sin \beta_r$  составляющие.

Определим действующие напряжения на площадке, наклоненной под углом  $\beta_r$  к оси  $X$  (см. рис. 1):

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

где  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  — проекции нормальных и касательных напряжений.

Подставляя выражение (1) в  $\tau = \sigma \tan \rho$  и рассматривая предельный случай  $\beta_r = \rho_0$ , получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \tau_{xy} \left[ \frac{\sin^2 \beta_r + \cos^2 \beta_r}{\sin \beta_r} \right] \cos \beta_r; \\ \tau_{xy} / \sigma_y &= \tan \beta_r = \tan \rho_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — угол естественного откоса материала в движении.

Следовательно, предельный угол транспортирования насыпного груза на ленте в общем случае ограничивается углом естественного откоса материала. В случае удержания насыпного груза на ленте силами трения ( $F_{сд} < N \tan \varphi$ , где  $F_{сд}$  — сдвигающая сила;  $N$  — нормальная составляющая силы тяжести;  $\varphi$  — угол внутреннего трения, предельное значение которого равно углу естественного откоса материала в движении  $\rho_0$ ), насыпной груз будет устойчив на ленте при выполнении условия

$$\tan \beta_r = f, \quad (3)$$

где  $f$  — коэффициент трения скольжения груза по ленте.

Расчетная схема для определения угла наклона конвейера при транспортировании крупного груза, размещенного в мелкокусковом, показана на рис. 2. Груз имеет такие размеры:  $a_r$  — длина,  $b_r$  — высота,  $c_r$  — ширина; форма — в виде параллелепипеда; движется со скоростью  $v_d$  (скорость ленты) и взаимодействует с роликоопорами под углом набегания  $\Delta\beta$ ; приведенная общая масса груза  $m_{об}$ ; натяжение  $H_d$ . Сила взаимодействия зависит от расстояния между роликоопорами  $l_p$  и определяется из выражения

$$R = m_{об} g \left[ a_r / (2l_p) \right] (K_d - 1), \quad (4)$$

где  $K_d$  — коэффициент динамического взаимодействия.

После взаимодействия с роликоопорами груз поднимается гранью над роликом под действием силы реакции (совершается равнозамедленное движение относительно линии  $C$ ), и он движется поступательно вместе с лентой. На ленте, кроме крупнокусковых фракций, присутствуют мелкокусковые фракции, которые увеличивают массу взаимодействия  $m_{об}$  и давление в плоскости ленты  $m_{м2} g \sin \beta_1$ . При формализации модели принимали следующие допущения: груз — недеформированное твердое тело; лента — гибкая нить, жесткостью на изгиб которой можно пренебречь; угол наклона ленты, обусловленный ее прогибом между роликоопорами и шагом их расстановки  $l_p$ , определяется взаимосвязью погонной нагрузки и натяжением ленты.

Уравнение моментов сил относительно линии  $A$  имеет следующий вид (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} m_{об} g (b_r / 2) \sin \beta_1 &= m_{об} g (a_r / 2) \cos \beta_1 - \\ &- m_{об} g \left[ a_r / (2l_p) \right] (K_d - 1) \cos \beta_1, \end{aligned} \quad (5)$$

при этом

$$\tan \beta_1 = (a_r / b_r) \left[ 2l_p - a_r (K_d - 1) \right] / (2l_p); \quad \beta_{пп} = \varphi_{пп} - \beta_1,$$

где  $\beta_{пп}$  и  $\varphi_{пп}$  — предельный угол подъема куса транспортируемого груза над роликом и угол, при котором кусок груза теряет устойчивость,  $\varphi_{пп} = 90^\circ$ ;  $\beta_1 = \beta_r + \Delta\beta$  — угол «встречи» груза с роликоопорой.

При  $K_d = 1$  и  $l_p = a_r$  частный случай равновесного состояния груза, свободно лежащего на ленте, имеет вид  $\tan \beta_1 = a_r / b_r$ . Если крупный груз лежит на ленте и на него в момент пуска конвейера действует сила инерции груза, то дополнительный угол  $\beta_d$  определится из выражений:

$$\tan \beta_d = (a_r / b_r) (1 + j / g); \quad \beta_{пп} = \varphi_{пп} - (\beta_r + \Delta\beta + \beta_d), \quad (6)$$

где  $j$  — среднее ускорение при пуске конвейера [8].

Если приравнять сумму моментов сил, действующих на груз (5) относительно линии  $C$ , к моменту инерции груза при вращении, то получим дифференциальное уравнение

$$\begin{aligned} J_r (d^2 \beta_2 / dt^2) &= m_{об} g \sin \beta_2 (b_r / 2) - \\ &- m_{об} g \cos \beta_2 (a_r / 2) + m_{об} g \left[ a_r^2 / (2l_p) \right] (K_d - 1) \cos \beta_2, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $J_{\Gamma}$  — момент инерции куска транспортируемого груза;  
 $a$ ;  
 $d^2\beta_2/dt^2 = 2\beta_{и}/t^2$  — соотношение параметров при равнозамедленном движении груза относительно линии  $C$  (см. рис. 2);  
 $\beta_{и}$  — дополнительный угол поворота груза от сил инерции при его движении на ленте.

Решая (7) относительно  $\beta_{и}$  и считая, что  $\beta_2 = \beta_1 + \beta_{и}$ , а  $\sin \beta_{и} = \beta_{и}$ ,  $\cos \beta_{и} = 1$ , получаем:

$$\beta_{и} = \frac{0,5(b_r \sin \beta_1 - a_r \cos \beta_1) - a_r [1 - a_r(K_d - 1)/(2l_p)] \cos \beta_1}{2J_{\Gamma} / (m_{об} g t^2) - (b_r/2) \cos \beta_1 - (a_r/2) [1 - a_r(K_d - 1)/(2l_p)] \sin \beta_1}. \quad (8)$$

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

$$\beta_{пп} = \varphi_{пп} - (\beta_{пп} + \Delta\beta + \beta_{и}). \quad (9)$$

Рассмотрим случай транспортирования насыпного груза ленточным конвейером с рифленой лентой. Груз в виде параллелепипеда или шара лежит на конвейерной ленте, имеющей угол наклона  $\beta_r$ , и упирается гранью в риф (перегородку) высотой  $h$ , угол груза  $\psi = a_r/b_r$ . Составим уравнение моментов относительно линии  $A$  (рис. 3):

$$m_{об} g \sin(\beta_1 + \psi) [(b_r/2) - h] = m_{об} g \cos(\beta_1 + \psi) \times (a_r/2) + m_{об} g \cos(\beta_1 + \psi) h f_0. \quad (10)$$

После преобразований формулы (10) получим

$$\beta_{пп} = \arctg [(a_r - 2f_0 h) / (b_r - 2h)] - \psi. \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показал, что при  $h = 0$  дополнительный угол наклона конвейера  $\beta_{пп} = 0$ ; при  $h = b_r/2$  угол  $\beta_{пп} = 90^\circ$ . Если в выражение (11) подставить  $b_r = a_r$ ,  $\psi = 0$ , то получим значение предельного угла наклона конвейера для овального груза диаметром  $d$ :

$$\beta_0 = (k + f_0 h) / (d - 2h), \quad (12)$$

где  $k$  — расстояние от центра груза до установки перегородки.

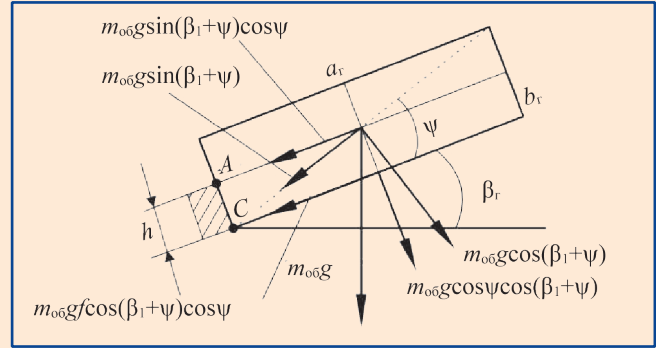
При  $k = 0$ ,  $h = 0$  угол  $\beta_0 = 0$ ; при  $k = a_r/2$ ,  $h = a_r/2$  угол  $\beta_0 = 90^\circ$ . В этом случае важно учитывать отношение максимального размера груза к высоте перегородки:

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

где  $\alpha$  — центральный угол, зависящий от высоты перегородки.

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

Рассмотрим еще один фактор, влияющий на эффективность применения конвейеров с перегородками (см. рис. 2). При транспортировании крупнокусовых насыпных грузов на конвейере возникает их сегрегация, при которой процесс «всплывания» происходит следующим образом. При взаимодей-



**Рис. 3.** Расчетная схема определения предельного угла наклона конвейера с выступами (перегородками) на ленте.

ствии груза с роликоопорой и подъеме его центра тяжести на среднюю высоту мелкокусовые фракции заполняют свободное пространство под плоскостью груза, а груз продолжает перемещаться относительно ролика на подсыпке до момента пересечения его центром тяжести вертикальной оси ролика. При этом происходит шевеление груза на подсыпке из мелкокусовых фракций и под его плоскостью, а также образуется свободное пространство, куда устремляются мелкокусовые фракции.

При решении данной задачи принималось:  $\psi = 0$ ,  $m_{об} = m_r + m_{м1}$ , где  $m_{м1}$  — присоединенная масса мелкокусовых фракций к массе груза; прогиб конвейерной ленты не превосходит  $u \leq 0,1l_p$ ; угол внутреннего трения насыпного груза  $\varphi < \rho_0$ ; а сдвигающая сила  $F_{сд} < Nt\varphi$ . В этом случае насыпной груз на ленте удерживается силой трения и перегородками. Как показали кино съемка процесса взаимодействия груза с роликоопорой и экспериментальное определение динамических характеристик  $K_{дr}$  после повторных взаимодействий груза на подсыпке значение  $h_{ср}$  практически не повышается и поэтому условие устойчивого движения груза на ленте

$$h_{пер} \gg h_{ср}, \quad (14)$$

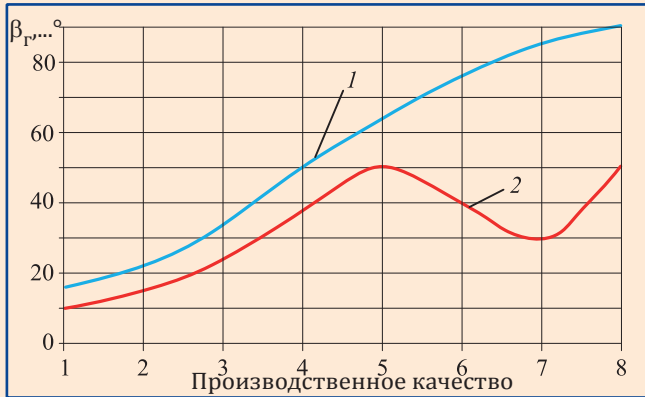
где  $h_{пер}$  и  $h_{ср}$  — высота перегородки и средняя высота подъема центра тяжести куска транспортируемого груза над роликом.

Чем больше сила взаимодействия, тем больше  $h_{ср}$  и при пересечении вертикальной линии  $\varphi_{пп}$  центром тяжести груза последний теряет устойчивость при невыполнении условий (11)–(14).

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

$$\tau_{ср} = \sum P_r / F_n \leq [\tau],$$

где  $\tau_{ср}$  и  $[\tau]$  — реальные средние и допустимые напряжения в перегородке под действием внешних сил;  $\sum P_r$  — сумма проекций внешних сил на плоскость ленты;



**Рис. 4.** Взаимосвязь предельных углов КНК в зависимости от их производственного качества: 1–5 — КНК с рифленой лентой, с перегородками, с повышенной желобчатостью, с прижимной лентой, с повышенной желобчатостью и прижимной лентой; 6–8 — конвейеры трубчатые, вертикальные с карманами, вертикальные со специальными сосудами Flexowell. Цифры на оси абсцисс соответствуют определенному техническому решению КНК, заложенному при создании их производственного качества.

$F_{\Pi} = bl$  — площадь поперечного сечения перегородки;  $b$  и  $l$  — ширина и длина перегородки.

Значение  $h_{\text{ср}}$  определим, согласно [7], из уравнения баланса кинетической энергии вращения груза после взаимодействия и суммы работ потенциальных и внешних сил:

$$h_{\text{ср}} = \left[ a_{\text{г}}^2 / (2l_{\text{п}}) \right] (K_{\text{д}} - 1) - J_{\text{г}} \omega^2 / (2m_{\text{г}} g), \quad (15)$$

где  $J_{\text{г}} = m_{\text{об}} \left[ (a_{\text{г}}^2 + b_{\text{г}}^2) / 3 \right]$  — момент инерции куска транспортируемого груза;  
 $\omega$  — угловая скорость груза после соударения.

На рис. 4 показаны результаты исследований, из которых видно, что для мелкокусковых грузов наиболее надежная конструкция — конвейеры с прижимной лентой и с карманами различной конструкции (см. рис. 4, кривая 1). С повышением крупности транспортируемого груза известные технические решения снижают предельный угол транспортирования и надежность их работы (см. рис. 4, кривая 2).

Экспериментальные исследования устойчивости насыпного груза на ленте выполнялись на лабораторном стенде (см. рис. 4), угол наклона изменялся от 0 до 35°, скорость ленты — от 0,7 до 2 м/с, ширина ленты составляла 500 мм, длина конвейера — 8 м, роликоопоры — желобчатые, трехроликовые.

Методикой выполнения экспериментов предусматривалось определение устойчивости насыпного груза различного гранулометрического состава ( $a_{\text{max}} > 0,2B_{\text{л}}$ ;  $a_{\text{max}} < 0,2B_{\text{л}}$ ) и вида (уголь, щебень, сухой песок, известняк, руда). При испытаниях использовали отдельный крупный груз  $(0,3-0,5)B_{\text{л}}$ .

Устойчивость груза на ленте фиксировали с помощью кинесъемки при остановленном конвейере, во время движения ленты с перегородками высотой 10 и 25 мм и без них.

При сравнении результатов этой работы с теоретическими данными обосновали принятые допущения и определили предельные углы транспортирования насыпных грузов различного гранулометрического состава, подтвердили соотношение (13) и условия (5), (6), (9), (11), (12), (14). Несовпадение теоретических и экспериментальных данных составляет 10 — 15 %. На основании выполненных исследований были разработаны рекомендации по повышению устойчивости груза на ленте конвейера и предложены технические решения [4, 9] для их реализации в промышленных условиях.

**Выводы.** Устойчивость груза на ленте КНК снижается в случае увеличения его крупности за счет повышения силы взаимодействия с роликоопорами, появления сил инерции груза и процесса сегрегации, а также при невыполнении отношения максимального размера груза к высоте перегородки и низкого производственного качества конвейеров для заданных условий.

## ЛИТЕРАТУРА

- Шешко Е. Е. Перспективы крутонаклонного подъема на горных предприятиях / Е. Е. Шешко, В. И. Морозов, Н. Г. Картавый // Горный журнал.— 1996.— № 6.— С. 56–59.
- Пертен Ю. А. Крутонаклонные конвейеры / Ю. А. Пертен.— Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1977.— 216 с.
- Передовая система крутонаклонной транспортировки на высоту до 500 метров.— № 1809-05-04-WPC / — St. Peterburg.— 2000.— 20 с.
- Пат. № 98580 Украина. Вертикальный ленточный конвейер с многопунктовой загрузкой / Монастырский В. Ф., Максютенко В. Ю., Виноградов В. В., Кирия Р. В.; заявитель и патентообладатель ИГТМ.— № а201105737; заявл. 06.05.11; опубл. 25.01.12, Бюл. № 10.— 4 с.
- Гущин В. М. Определение основных параметров конвейера с глубокой желобчатостью / В. М. Гущин // Изв. вузов. Горный журнал.— 1978.— № 6.— С. 82–84.
- Надежность в технике: ГОСТ 27301-95.— М.: Стандарт, 1995.— 101 с.
- Монастырский В. Ф. Управление процессом формирования насыпного груза в элементах загрузочных устройств конвейера / В. Ф. Монастырский, С. В. Монастырский // Математические заметки: сб. тр.— Якутск: Новосибирск СОРАН.— 1998.— С. 152–159.
- Котов М. А. К определению допустимого ускорения конвейерной ленты / М. А. Котов // Вопросы рудничного транспорта.— К.: Наукова думка, 1972.— № 12.— С. 48–52.
- Монастырский В. Ф. Выбор предельного угла наклона подъемного конвейера при транспортировании крупнокусковых грузов / В. Ф. Монастырский, Э. Г. Кайтанджан // Транспортные машины: сб. науч. тр.— К.: Наукова думка, 1979.— С. 83–86.