

**ПРЕДЕЛЬНЫЙ УГОЛ НАКЛОНА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА,  
ТРАНСПОРТИРУЮЩЕГО КРУПНОКУСКОВЫЕ ГРУЗЫ****<sup>1</sup>Кирия Р.В., <sup>1</sup>Монастырский В.Ф., <sup>1</sup>Смирнов А.Н., <sup>2</sup>Номеровский Д.А.**<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, <sup>2</sup>Фирма «Руна-Тех»**ГРАНИЧНИЙ КУТ НАХИЛУ СТРИЧКОВОГО КОНВЕЄРА, ЩО ТРАНСПОРТУЄ  
ВЕЛИКОШМАТКОВІ ВАНТАЖІ****<sup>1</sup>Кірія Р.В., <sup>1</sup>Монастирський В.Ф., <sup>1</sup>Смірнов А.М., <sup>2</sup>Номеровський Д.А.**<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, <sup>2</sup>Фірма «Руна-Тех»**LIMIT ANGLE OF THE BELT CONVEYOR INCLINATION AT  
TRANSPORTING LUMPY LOADS****<sup>1</sup>Kiriia R.V., <sup>1</sup>Monastyrskiy V.F., <sup>1</sup>Smirnov A.M., <sup>2</sup>Nomerovskiy D.A.**<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine, <sup>2</sup>Firm "Runa-Tekh"

**Аннотация.** Одним из путей снижения капитальных затрат и снижения длины трасс конвейерного транспорта является увеличение угла наклона конвейера. Из опыта известно, что ленточные конвейеры общего назначения, транспортирующие сыпучие грузы, имеют предельный угол  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$ . В то же время угол естественного откоса руды и угля равен  $40^{\circ}$  и  $35^{\circ}$  соответственно. Такая разница между углами откоса сыпучего груза и предельным углом наклона ленточного конвейера, транспортирующего сыпучие грузы, объясняется влиянием колебания ленты на состояние транспортируемого груза при его движении по роликоопорам ленточного конвейера. При воздействии колебаний ленты твердо-пластичное состояние сыпучей среды переходит в свободно-дисперсное состояние, при котором инерционные силы частиц превышают силы внутреннего кулонового трения между частицами. При этом, как показали экспериментальные исследования, движение сыпучей среды относительно ленты конвейера возникает при углах наклона конвейера  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$ , т.е. предельный угол наклона ленточного конвейера, транспортирующего сыпучие грузы, не превышает  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$ . В то же время предельный угол наклона ленточного конвейера, транспортирующего крупнокусковые грузы, недостаточно изучен. В статье определен предельный угол наклона ленточного конвейера, транспортирующего крупнокусковые грузы. При этом рассматривались различные типы роликоопор: с жестким ставом, амортизированные и подвесные с канатным ставом. На основании теоремы об изменении количества движения, примененной к крупному куску груза при его движении через роликоопору, определен предельный угол наклона ленточного конвейера. При этом предполагалось, что кусок груза при переходе через роликоопору начинает скользить по ленте конвейера. В результате получены аналитические зависимости предельного угла наклона ленточного конвейера от параметров конвейера (натяжения, скорости ленты), параметров роликоопор (расстояния между роликоопорами), длины кусков груза и коэффициента трения куска с лентой конвейера. Исследования полученных зависимостей показали, что наибольшее значение предельного угла наклона имеют ленточные конвейеры с амортизированными роликоопорами, а наименьшее значение – ленточные конвейеры с подвесными роликоопорами. Кроме того, установлено, что с увеличением скорости ленты конвейера и веса кусков транспортируемого груза предельный угол наклона конвейера уменьшается, а с увеличением натяжения ленты увеличивается. Определена критическая скорость ленты конвейера, при которой для любого угла наклона конвейера кусок груза начинает скользить по ленте конвейера.

**Ключевые слова.** Ленточные конвейеры, крупнокусковый груз, предельный угол наклона.

В настоящее время одной из прогрессивных технологий добычи полезных ископаемых, в частности железных руд, является циклично-поточная технология, включающая широкое применение конвейерного транспорта. Однако применение циклично-поточной технологии на горно-обогажительных комбинатах Кривбасса из-за увеличения глубины карьеров сопряжено с большими трудностями.

Прежде всего это связано с большими капитальными затратами на строительство тоннелей и траншей для конвейерного транспорта.

Одним из путей снижения капитальных затрат и снижения длины трасс конвейерного транспорта является увеличение угла наклона конвейера.

Из опыта известно, что ленточные конвейеры общего назначения, транспортирующие сыпучие грузы, имеют предельный угол  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$ . В то же время угол естественного откоса руды и угля равен  $40^{\circ}$  и  $35^{\circ}$  соответственно [1].

Такую разницу между углами откоса сыпучего груза и предельным углом наклона ленточного конвейера, транспортирующего сыпучие грузы, объясняется влиянием колебания ленты на состояние транспортируемого груза при его движении по роликоопорам ленточного конвейера.

Как показано в работе [2], при движении сыпучего груза с лентой конвейера при воздействии колебаний ленты твердо-пластичное состояние сыпучей среды переходит в свободно-дисперсное состояние, при котором частицы среды не сцеплены между собой силами кулонового трения и взаимодействуют между собой через удары. Такое состояние сыпучей среды называется быстрым движением. В этом случае инерционные силы частиц превышают силы внутреннего кулонового трения.

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, предельный угол наклона шероховатой наклонной плоскости, при котором возникает свободно-дисперсное состояние сыпучей среды, меньше угла внутреннего трения сыпучей среды и изменяется в пределах  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$  [3].

В то же время предельный угол наклона ленточного конвейера при транспортировании крупнокускового груза не достаточно изучен. Так в работе [4] был определен предельный угол наклона ленточного конвейера при транспортировании крупных кусков груза. При этом предполагалось, что на кусок груза при прохождении его через роликоопору действует динамическая нагрузка со стороны ролика, которая определяется через коэффициент динамичности. В результате этого он поворачивается вокруг своей нижней кромки и теряет устойчивость. При этом влияние трения на устойчивость куска груза на ленте отсутствует.

Вычисление по полученной зависимости предельного угла наклона конвейера для куска продолговатой формы показали, что его значение может превышать  $50^{\circ}$ , что не соответствует действительности.

В работе [5] также при определении предельного угла наклона ленточного конвейера, транспортирующего крупнокусковые грузы, крупный кусок груза при прохождении через роликоопору получает со стороны ролика ударное воздействие, при котором кусок груза получает угловую скорость и вращается вокруг задней своей кромки.

На основании теоремы об изменении кинетической энергии получена зависимость предельного угла наклона ленточного конвейера от параметров конвейера, веса и размеров куска груза, а также от коэффициента восстановления при ударе куска груза по роликоопоре. При этом предельный

угол наклона ленточного конвейера в этой работе также не зависит от угла трения куска груза о ленту.

В этой работе в полученной зависимости, так же, как и в работе [1], при малых скоростях движения ленты конвейера для куска удлиненной формы предельный угол наклона конвейера может превысить  $50^\circ$ . Однако, как будет показано дальше в работе, в отличие от ударного механизма при движении крупных кусков груза через роlikоопору ленточного конвейера возникают центробежные инерционные силы, действующие на кусок груза, уменьшающие давление куска груза на ролики роlikоопоры конвейера.

В данной работе приведены исследования взаимодействия куска груза при его движении через роlikоопору ленточного конвейера с различными типами роlikоопор и на основании этого определен предельный угол наклона ленточного конвейера в зависимости от параметров конвейера, типа и параметров роlikоопор, веса и размеров кусков транспортируемого груза, а также угла трения куска груза о ленту конвейера.

Рассмотрим движение куска груза произвольной формы через роlikоопору вместе с лентой конвейера, наклоненного под углом  $\alpha$  (град) к горизонту (рис. 1). Предположим, что кусок груза является твердым телом произвольной формы и длиной  $l_k$  (м).

Предположим также, что лента конвейера представляет собой гибкую тяжелую нерастяжимую нить, движущуюся вместе с куском груза со скоростью  $V_l$  (м/с). При этом скорость центра тяжести куска груза при переходе через роlikоопору меняется по направлению, не меняется по величине и равняется скорости ленты конвейера  $V_l$ .

Кроме того предположим, что под действием веса куска груза лента изгибается и угол набегания куска груза на роlikоопору  $\theta_1$  (град) приблизительно равен углу сбегания его с роlikоопоры  $\theta_2$  (град) и равен  $\theta$  (град), т.е.  $\theta_1 \approx \theta_2 = \theta$ .

Применив теорему изменения количества движения к куску груза при его прохождении через роlikоопору в проекции на оси ОХ и ОУ (см. рис. 1), соответственно получим систему уравнений:

$$\begin{cases} N_x \Delta t = m_k V_l \cos \theta_2 - m_k V_l \cos \theta_1; & (1) \\ (N_y - P_k \cos \alpha) \Delta t = -m_k V_l \sin \theta_1 - m_k V_l \sin \theta_2, & (2) \end{cases}$$

где  $N_x$ ,  $N_y$  – проекции на оси ОХ и ОУ силы реакции роlikоопоры, действующей на кусок груза при его прохождении через роlikоопору, Н;  $P_k$  – сила тяжести куска груза, направленная вертикально вниз, Н;  $m_k$  – масса куска груза, кг;  $\Delta t$  – интервал времени прохождения куска груза через роlikоопору, с.

Так как по предположению  $\theta_1 \approx \theta_2 = \theta$ , то из уравнения (1) имеем  $N_x = 0$ .

Следовательно, сила реакции роlikоопоры, действующая на кусок груза, направлена вверх перпендикулярно оси ОХ, т.е. перпендикулярна к оси

конвейера. Введя обозначение  $N_y = N$ , уравнение (2) после преобразования примет вид:

$$(N - P_k \cos \alpha) \Delta t = -2m_k V_l \sin \theta. \quad (3)$$

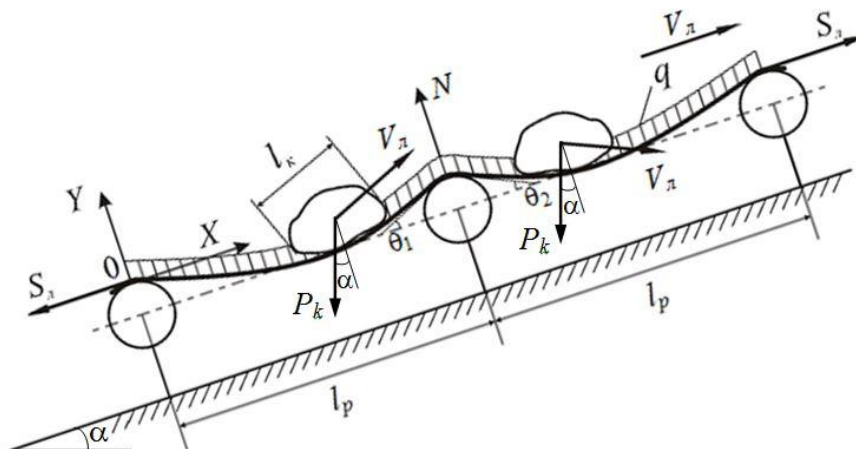


Рисунок 1 – Расчетная схема взаимодействия куска груза при его движении через роlikоопору

Величину  $\Delta t$  определим по формуле

$$\Delta t = \frac{l_k}{V_l}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), после преобразования получим

$$N = P_k \cos \alpha - \frac{2m_k V_l^2 \sin \theta}{l_k}. \quad (5)$$

Полагая  $\theta$  малым, имеем  $\sin \theta \approx \theta$ . Тогда предыдущее равенство с учетом того, что  $P_k = m_k g$ , примет вид

$$N = P_k \cos \alpha - \frac{2P_k V_l^2}{g l_k} \theta. \quad (6)$$

Согласно [6] для больших величин натяжений ленты  $S_l \geq 20000$  Н влиянием скорости ленты  $V_l$  на угол набегания ленты на роlikоопору можно пренебречь.

Тогда согласно [6, 7] угол набегания ленты конвейера на роlikоопору зависит от типа роlikоопор (жесткие, амортизированные и подвесные на канатном стае) и определяются по формулам:

– для жестких роlikоопор

$$\theta = \theta_\partial = \left( \frac{P_k}{S_l} + \frac{q l_p}{2S_l} \right) \cos \alpha, \quad (7)$$

где  $S_l$  – натяжение ленты конвейера, Н;  $q$  – сумма погонной нагрузки мелкокускового груза на ленту  $q_2$  (Н/м) и погонного веса ленты  $q_l$  (Н/м), т.е.  $q = q_2 + q_l$ ;  $l_p$  – расстояние между роlikоопорами, м;

– для амортизированных роликоопор

$$\theta = \theta_{\partial} - \theta_a, \quad (8)$$

где  $\theta_a = \frac{P_k \cos \alpha}{2S_l} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{4k+1}} \right)$ ;  $k = \frac{S_l}{cl_p}$ ;  $c$  – жесткость амортизированных

роликоопор, Н/м;

– для подвесных роликоопор с трехпорным канатным ставом

$$\theta = \theta_{\partial} + \theta_n, \quad (9)$$

где  $\theta_n = \frac{1}{2} \frac{(G' + ql_p) \cos \alpha}{S_k}$ ;  $G' = G + 2q_k l_p$ ;  $G$  – вес подвесных роликоопор, Н;  $q_k$  – погонный вес каната, Н/м;  $S_k$  – натяжение канатов, Н.

Для определения предельного угла наклона ленточного конвейера предположим, что при этом угле наклона конвейера кусок груза при прохождении через роликоопору начинает скользить по ленте конвейера.

В этом случае проекция силы тяжести куска груза на направление движения ленты равняется силе трения куска груза о ленту конвейера, т.е.

$$P_k \sin \alpha = F_T. \quad (10)$$

Согласно закону Кулона имеем:

$$F_T = Nf_1, \quad (11)$$

где  $f_1$  – коэффициент трения куска груза по ленте конвейера.

Из равенств (10) и (11) имеем

$$N = \frac{P_k \sin \alpha}{f_1}, \quad (12)$$

Подставим (12) в (6), после преобразования получим

$$\sin \alpha = f_1 \cos \alpha - \frac{2V_l^2}{gl_k} \theta \cdot f_1. \quad (13)$$

В общем случае  $\theta$  зависит от  $\alpha$ . Подставляя в (13) значения  $\theta$  согласно формулам (7)–(9), получим уравнения относительно предельного угла наклона конвейера. Решая эти уравнения, получим предельный угол наклона ленточного конвейера для различных типов роликоопор.

В результате предельный угол наклона ленточного конвейера  $\alpha_n$  (рад) определяется по формуле

$$\alpha_n = \arctg \left[ \left( 1 - \frac{2V_l^2}{gl_k} \theta_{0i} \right) f_1 \right], \quad i = 1, 2, 3, \quad (14)$$

где  $\theta_{0i}$  – углы набегания ленты на роlikоопору горизонтального ленточного конвейера ( $\alpha = 0$ ) с жесткими, амортизированными и подвесными роlikоопорами, рад.

При этом в случае

– жестких роlikоопор

$$\theta_{01} = \frac{P_k}{S_l} + \frac{ql_p}{2S_l}; \quad (15)$$

– амортизированных роlikоопор

$$\theta_{02} = \frac{P_k}{2S_l} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{4k+1}} \right) + \frac{ql_p}{2S_l}; \quad (16)$$

– подвесных роlikоопор с трехпорным канатным ставом

$$\theta_{03} = \frac{P_k}{S_l} + \frac{ql_p}{2S_l} + \frac{1}{2} \frac{(G + ql_p + 2q_k l_p)}{S_k}. \quad (17)$$

Из анализа формулы (14) и формул (15)–(17) следует, что с увеличением скорости ленты конвейера и веса кусков груза предельный угол наклона конвейера уменьшается, а с увеличением натяжения ленты увеличивается.

Формула (14) имеет физический смысл, если выполняется условие

$$1 - \frac{2V_l^2}{gl_k} \theta_{0i} \geq 0.$$

Из последнего неравенства имеем

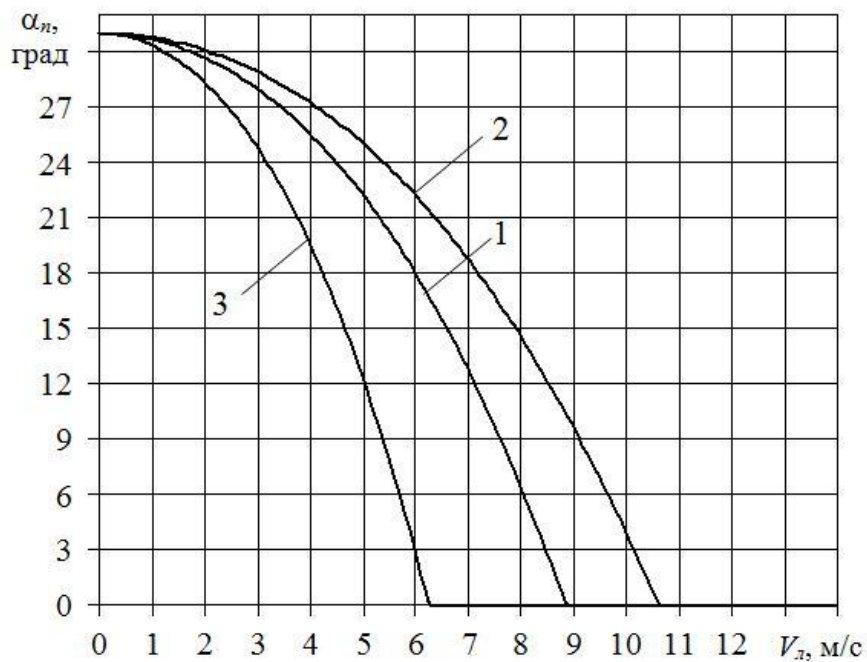
$$V_l \leq V_{kp} = \sqrt{\frac{gl_k}{2\theta_{0i}}}, \quad (18)$$

где  $V_{kp}$  – критическая скорость ленты конвейера.

Следовательно, при скорости ленты конвейера  $V_l$ , меньшей либо равной критической скорости  $V_{kp}$ , т.е. при  $V_l \leq V_{kp}$ , предельный угол наклона конвейера  $\alpha_n = 0$ . Это означает, что при скорости ленты  $V_l \leq V_{kp}$  и любом угле наклона ленточного конвейера  $\alpha$  центробежная сила, действующая на кусок груза при его переходе через роlikоопору конвейера больше либо равняется проекции силы тяжести куска груза на нормаль к направлению движения ленты. При этом давление куска груза на роlikоопору равняется нулю, и кусок груза начинает скользить вниз по ленте конвейера.

На рисунке 2 показаны графики зависимости предельного угла наклона ленточного конвейера в зависимости от скорости ленты конвейера для различных типов роlikоопор: жесткие, амортизированные и подвесные с

трехопорным канатным ставом (соответственно кривые 1, 2, 3). При этом параметры конвейера, роликоопор и груза принимали значения:  $S_n = 20000$  Н;  $S_k = 20000$  Н;  $q = 200$  Н/м;  $q_k = 100$  Н/м;  $l_p = 1$  м;  $c = 5000$  Н/м;  $P_k = 400$ ;  $l_k = 0,4$  м;  $f_1 = 0,6$ .



1 – жесткие роликоопоры; 2 – амортизированные роликоопоры;  
3 – подвесные роликоопоры с трехопорным канатным ставом

Рисунок 2 – Зависимости предельного угла наклона ленточного конвейера  $\alpha_n$  от скорости ленты конвейера  $V_n$  для различных типов роликоопор

Из графиков (см. рис. 2) видно, что с увеличением скорости ленты конвейера  $V_n$  предельный угол наклона ленточного конвейера уменьшается по параболической зависимости и при скоростях ленты, равных  $V_n = 6,3$  м/с;  $V_n = 8,9$  м/с;  $V_n = 10,6$  м/с, соответственно для жестких, амортизированных и подвесных роликоопор принимает значение, равное нулю, т.е.  $\alpha_n = 0$ .

Кроме того, наибольшее значение предельного угла наклона имеют ленточные конвейеры с амортизированными роликоопорами, а наименьшее значение – ленточные конвейеры с подвесными роликоопорами.

Теперь исследуем влияние длины куса груза  $l_k$  на предельную скорость наклонного ленточного конвейера, при которой кусок груза начинает скользить по ленте конвейера.

Для случая ленточного конвейера с жесткими роликоопорами подставляя в (13) угол  $\theta$  согласно формуле (7), после преобразования получим

$$\operatorname{tg}\alpha = f_1 - \frac{2V_n^2}{gl_k S_n} \left( P_k + \frac{ql_p}{2} \right) f_1. \quad (19)$$

Из последнего равенства (19) определим  $V_n$ , в результате получим

$$V_n = \sqrt{\frac{gl_k S_n (1 - f_1^{-1} \operatorname{tg} \alpha)}{ql_p + 2P_k}}. \quad (20)$$

Кроме того, на основании статистической обработки данных карьеров Кривбасса установлено, что характерными крупными кусками, транспортируемыми ленточными конвейерами, являются куски столбчатой формы, вес которых определяется по формуле [8]

$$P_k = 0,22\gamma_u l_k^3, \quad (21)$$

где  $\gamma_u$  – удельный вес куска транспортируемого груза, Н/м<sup>3</sup>.

Подставляя (21) в (20), после преобразования получим зависимость предельной скорости ленты наклонного конвейера  $V_n$  от размера кусков груза  $l_k$ :

$$V_n = \sqrt{\frac{gl_k S_n (1 - f_1^{-1} \operatorname{tg} \alpha)}{ql_p + 0,44\gamma_u l_k^3}}. \quad (22)$$

Из последней формулы следует, что для заданного угла наклона ленточного конвейера  $\alpha$  предельная скорость ленты конвейера  $V_n$  с увеличением натяжения ленты  $S_n$  и коэффициента трения куска груза о ленту  $f_1$  увеличивается, а при увеличении погонной нагрузки  $q$  и угла наклона конвейера  $\alpha$  уменьшается.

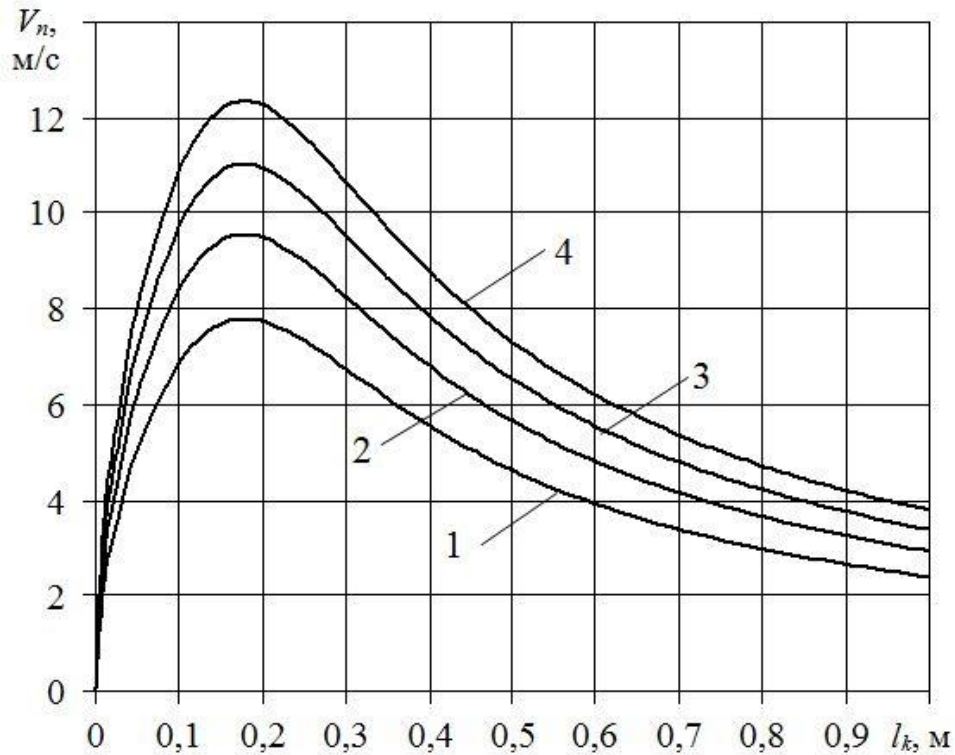
Кроме того, из (22) следует, что при угле наклона конвейера  $\alpha = \operatorname{arctg} f_1$  предельная скорость ленты наклонного конвейера  $V_n = 0$ .

На рисунках 3 и 4 показаны графики зависимости предельной скорости наклонного ленточного конвейера  $V_n$  от длины куска транспортируемого груза  $l_k$  при различных натяжениях ленты  $S_n = 20000$  Н; 30000 Н; 40000 Н; 50000 Н (соответственно кривые 1, 2, 3, 4, рис. 3) и  $\alpha = 16^\circ$  и различных углах наклона конвейера  $\alpha = 10^\circ$ ;  $16^\circ$ ;  $22^\circ$ ;  $30^\circ$  (соответственно кривые 1, 2, 3, 4, рис. 4) и  $S_n = 20000$  Н. При этом параметры конвейера и груза принимали следующие значения:  $q = 200$  Н/м;  $l_p = 1$  м;  $\gamma_u = 40000$  Н/м<sup>3</sup>;  $f_1 = 0,6$ ;  $0 \leq l_k \leq 1$  м.

Из графиков (см. рис. 3 и 4) видно, что с увеличением натяжения лены  $S_n$  предельная скорость ленты конвейера  $V_n$  увеличивается, а с увеличением угла наклона конвейера  $\alpha$  предельная скорость ленты уменьшается. Кроме того, из рисунков 3 и 4 видно, что при малых значениях размеров кусков груза  $l_k < 0,18$  м с увеличением  $l_k$  предельная скорость ленты конвейера увеличивается, при значении  $l_k \approx 0,18$  м предельная скорость принимает максимальные значения и при дальнейшем увеличении  $l_k$  уменьшается. Это можно объяснить тем, что при малых  $l_k$  с увеличением  $l_k$  центробежная сила инерции, действующая на кусок груза при его прохождении через роликкоопору, уменьшается, и тем самым

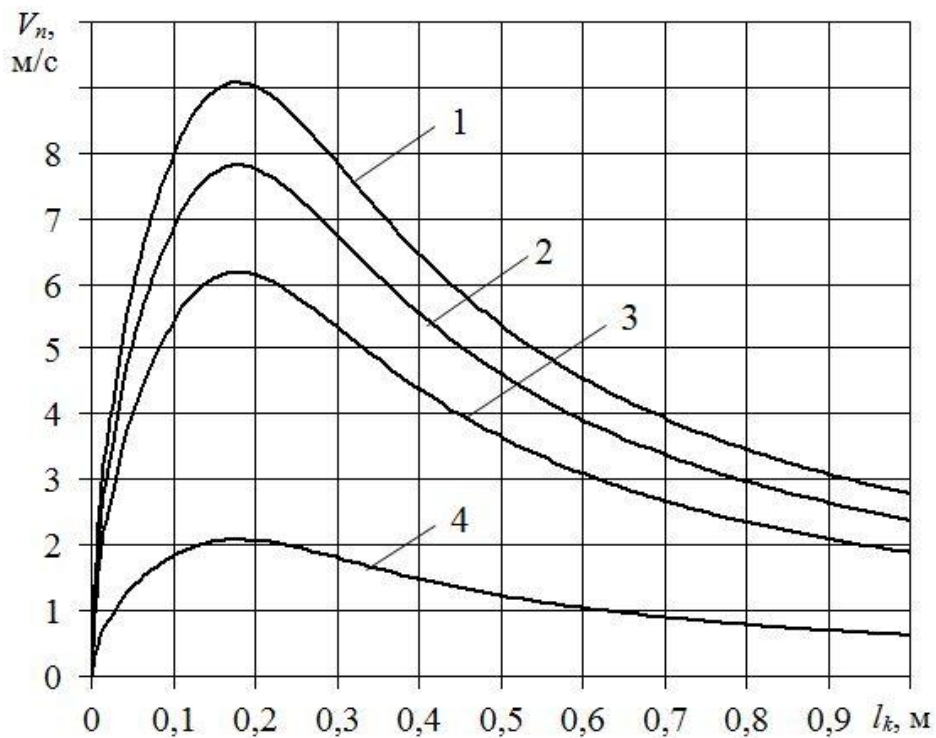


давление куска груза на роlikоопору увеличивается, что приводит к увеличению предельного угла наклона конвейера.



1 –  $S_n = 20000$  Н; 2 –  $S_n = 30000$  Н; 3 –  $S_n = 40000$  Н; 4 –  $S_n = 50000$  Н

Рисунок 3– Зависимости предельной скорости наклонного ленточного конвейера  $V_n$  от длины куска транспортируемого груза  $l_k$  при различных натяжениях ленты  $S_n$



1 –  $\alpha = 10^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 16^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 22^\circ$ ; 4 –  $\alpha = 30^\circ$

Рисунок 4– Зависимости предельной скорости наклонного ленточного конвейера  $V_n$  от длины куска транспортируемого груза  $l_k$  при различных углах наклона конвейера  $\alpha$

А при больших  $l_k$  с увеличением  $l_k$  из-за увеличения прогиба ленты центробежная сила инерции увеличивается и тем самым давление куска груза на роликкоопору уменьшается, что приводит к уменьшению предельного угла наклона конвейера.

### Выводы

1. На основании теоремы об изменении количества движения получены аналитические зависимости предельного угла наклона ленточного конвейера, транспортирующего крупнокусковые грузы, с различными типами роликкоопор (жестких, амортизированных и подвесных на канатном стае) от параметров конвейера, роликкоопор, размера кусков груза и коэффициента трения куска груза о ленту конвейера.

2. Установлено, что:

– наибольшее значение предельного угла наклона имеют ленточные конвейеры с амортизированными роликкооперами, а наименьшее значение – ленточные конвейеры с подвесными роликкооперами;

– с увеличением скорости ленты конвейера и веса куска транспортируемого груза предельный угол наклона конвейера уменьшается, а с увеличением натяжения ленты увеличивается;

– определена критическая скорость ленты конвейера, при которой для любого угла наклона конвейера кусок груза начинает скользить по ленте конвейера.

3. Определена предельная скорость ленты наклонного конвейера, при которой кусок груза при переходе через роликкоопоры начинает скользить по ленте конвейера.

4. Установлено, что:

– предельная скорость наклонного ленточного конвейера с увеличением натяжения ленты увеличивается, а с увеличением угла наклона конвейера уменьшается;

– предельная скорость ленты конвейера имеет максимальное значение и при малых значениях размеров кусков груза с увеличением размера куска увеличивается, а при больших значениях размеров куска груза с увеличением размеров куска – уменьшается.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров. – М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
2. Бэгнолд Р. Эксперименты со взвешенной суспензией больших твердых сфер в ньютоновской жидкости под действием сдвига // Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений: Сб. статей / Под ред. И. В. Ширко. М.: Мир, 1985. С. 44–63.
3. Кирия Р. В. Кинетический подход к выводу уравнений движения сыпучих сред // Вісник Дніпропетровського Державного Університету: Механика. Днепропетровск: ДГУ, 1999. Вып. 2. С. 143–150.
4. Монастырский В. Ф., Кайтанджан Э.Г. Определение предельного угла наклона ленточного конвейера для крупнокусковых грузов // Динамика и прочность горных пород. Киев: Наук. Думка, 1981. С. 15–24.
5. Демин Г.К., Шкарбун О.Е., Рыхальский Ю.А., Кайтанджан Э.Г. Влияние соударения груза с роликкооперами на максимальный угол наклона конвейера // Транспортные и горные машины: Сб. научн. тр. Киев: Наук. думка, 1983. С. 57–62.
6. Монастырский В.Ф., Кирия Р.В., Смирнов А.Н., Мищенко Т.Ф. Определение динамических усилий при взаимодействии грузопотока с роликкооперами ленточных конвейеров угольных шахт // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2012. Вып. 104. С. 146–159.
7. Биргер И. А., Мавлютов Р.Р. Сопrotивление материалов: Учебное пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с.

8. Новиков Е. Е., Смирнов В.К. Теория ленточных конвейеров для крупнокусковых горных пород. К.: Наук. думка, 1983. 184 с.

#### REFERENCES

1. Shakhmeyster, L.G. (1987), *Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov* [Theory and calculation of belt conveyers], Mashinostroenie, Moscow, SU.
2. Begnold, R. (1985), "Shear experiments with a suspended suspension of large hard spheres in a Newtonian fluid", in Shirko, I.V. (ed.), *Mekhanika granulirovannykh sred: Teoriya bystrykh dvizheniy. Sb. Statey* [The mechanics of granular media: The theory of fast movements: Sat. articles], Mir, Moscow, SU, pp. 44–63.
3. Kiriia, R.V. (1999), "Kinetic approach to the derivation of equations of motion of granular media", *Visnyk Dnipropetrovskogo universytetu. Mekhanika*, no.2, pp. 143–150.
4. Monastyrskiy, V.F. and Kaitandzhan, E.G. (1981), "Determination of the limiting angle of inclination of the conveyor belt for bulk load", in *Dinamika i prochnost gornykh porod* [Rock Dynamics and Strength], Naukova Dumka, Kiev, SU, pp. 15–24.
5. Demin, G.K., Shkarbun, O.E., Rykhalsky, Yu.A. and Kaitandzhan, E.G. (1983), "The effect of collision of load with roller supports on the limiting angle of inclination of the conveyor", in *Transportnyye i gornyye mashiny* [Transport and mining machines], Naukova Dumka, Kiev, SU, pp. 57–62.
6. Monastyrskiy, V.F., Kiriia, R.V., Smirnov, A.N. and Mishchenko, T.F. (2012), "Determination of dynamic forces in the interaction of load flow with roller supports of belt conveyors of coal mines", *Geo-Technical Mechanics*, no. 104, pp. 146–159.
7. Birger, I.A. and Mavlyutov, R.R. (1986), *Soprotivleniye materialov: Uchebnoe posobiie* [Resistance Materials: Study Guide], Nauka, Moscow, SU.
8. Novikov, E.E. and Smirnov, V.K. (1983), *Teoriya lentochnykh konveyerov dlya krupnokuskovykh gornykh porod* [Theory of conveyor belts for large rocks], Naukova Dumka, Kiev, SU.

#### Об авторах

**Кирия Руслан Виссарионович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела Геомеханических основ технологий открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [kiriya.igtm@gmail.com](mailto:kiriya.igtm@gmail.com)

**Монастырский Виталий Федорович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Геомеханических основ технологии открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [vfmonas@gmail.com](mailto:vfmonas@gmail.com)

**Смирнов Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела Геомеханических основ технологии открытой разработки месторождений, Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [sm.contur24@gmail.com](mailto:sm.contur24@gmail.com)

**Номеровский Денис Анатольевич**, кандидат технических наук, главный конструктор, фирма Руна-Тех, Днепр, Украина, [office.Runa@gmail.com](mailto:office.Runa@gmail.com)

#### About the authors

**Kiriia Ruslan Visarionovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Principal Researcher in the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, [kiriya.igtm@gmail.com](mailto:kiriya.igtm@gmail.com)

**Monastyrskiy Vitalii Fedorovich**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, [vfmonas@gmail.com](mailto:vfmonas@gmail.com)

**Smirnov Andrii Mykolaiovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in the Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, [sm.contur24@gmail.com](mailto:sm.contur24@gmail.com)

**Nomerovskiy Denys Anatoliiovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Chief Designer, Firm Runa-Tekh, Dnipro, Ukraine, [office.Runa@gmail.com](mailto:office.Runa@gmail.com)

**Анотація.** Одним із шляхів зниження капітальних витрат і зниження довжини трас конвеєрного транспорту є збільшення кута нахилу конвеєра. З досвіду відомо, що стрічкові конвеєри загального призначення, що транспортують сипучі вантажі, мають граничний кут нахилу  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$ . У той же час кут природного укусу руди і вугілля дорівнює  $40^{\circ}$  і  $35^{\circ}$  відповідно. Таку різницю між кутами укусу сипучого вантажу і граничним кутом нахилу стрічкового конвеєра, що транспортує сипучі вантажі, пояснюється впливом коливання стрічки на стан вантажу при його русі по роликоопорах стрічкового конвеєра. При впливі коливань стрічки твердо-пластичний стан сипучого середовища переходить у вільно-дисперсний стан, при якому інерційні сили частинок перевищують сили внутрішнього кулонового тертя між частинками. При цьому, як показали експериментальні дослідження, рух сипучого середовища відносно стрічки конвеєра виникає при кутах нахилу конвеєра  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$ , тобто граничний кут нахилу стрічкового конвеєра, що транспортує сипучі вантажі, не перевищує  $18^{\circ}$ – $22^{\circ}$ . У той же час граничний кут нахилу стрічкового конвеєра, що транспортує великошматкові вантажі, недостатньо вивчений. У статті визначено граничний кут нахилу стрічкового конвеєра, що транспортує великошматкові вантажі. При цьому розглядалися

різні типи роликоопор: з жорстким ставом, амортизовані та підвісні з канатним ставом. На підставі теореми про зміну кількості руху, застосованої до великого шматка вантажу при його русі через роликоопору, визначено граничний кут нахилу стрічкового конвеєра. При цьому передбачалося, що шматок вантажу при переході через роликоопору починає ковзати по стрічці конвеєра. В результаті отримано аналітичні залежності граничного кута нахилу стрічкового конвеєра від параметрів конвеєра (натягу, швидкості стрічки), параметрів роликоопор (відстані між роликооперами), довжини шматків вантажу і коефіцієнта тертя шматка зі стрічкою конвеєра. Дослідження отриманих залежностей показали, що найбільше значення граничного кута нахилу мають стрічкові конвеєри з амортизованими роликооперами, а найменше значення - стрічкові конвеєри з підвісними роликооперами. Крім того встановлено, що зі збільшенням швидкості стрічки конвеєра і ваги шматків вантажу, що транспортується, граничний кут нахилу конвеєра зменшується, а зі збільшенням натягу стрічки збільшується. Визначено критичну швидкість стрічки конвеєра, при якій для будь-якого кута нахилу конвеєра шматок вантажу починає ковзати по стрічці конвеєра.

**Ключові слова.** Стрічкові конвеєри, великошматковий вантаж, граничний кут нахилу.

**Annotation.** One of the ways to reduce capital costs and shorten length of conveyor transport routes is to increase angle of the conveyor inclination. As practice shows, limit inclination angle of general-purpose belt conveyors transporting bulk loads is  $18^\circ$ -  $22^\circ$ , while angle of natural slope of ore and coal is  $40^\circ$  and  $35^\circ$ , respectively. Such a difference between the angles of bulk load slope and limit inclination angle of the belt conveyor transporting the bulk loads is explained by the belt vibration impacting on the state of the transported load during its moving along the belt conveyor idlers. When exposed to vibrations, the solid-yielding state of the granular medium passes into a free-dispersed state at which inertial forces of the particles exceed the forces of internal coulomb friction between the particles. Moreover, as experimental studies have shown, granular medium moves relative to the conveyor belt at angles of conveyor inclination of  $18^\circ$ - $22^\circ$ , i.e. limit angle of inclination of the conveyor belt transporting bulk load does not exceed  $18^\circ$ - $22^\circ$ . Today, limit angle of inclination of the conveyor belt transporting bulk loads is not studied well. In this research, the authors tried to determine limit angle of inclination of the conveyor belt transporting bulk loads by considering different types of the idlers: with rigid line, damping idlers and suspension idler with rope line. Limit angle of the conveyor belt inclination was determined on the basis of the change in momentum theorem applied to the lump during its moving over the idler and with the assumption that a lump, while passing over the idler, began sliding along the conveyor belt. As a result, analytical dependences of limit angle of the conveyor belt inclination on the conveyor parameters (belt tension and speed), parameters of idlers (distance between them), length of the bulk load and coefficient of friction of the lump against the conveyor belt were obtained. The studies of the obtained dependences showed that belt conveyors with damping idlers featured the widest limit angle of inclination, and inclination angel of the belt conveyors with suspension idlers had the least value. In addition, it was found that with increase of the conveyor belt speed and weight of the transported lumps limit angle of the conveyor inclination decreased and increased with increase of the belt tension. Further, critical speed of the conveyor belt was determined at which piece of load began sliding along the conveyor belt at any angle of the conveyor inclination.

**Keywords.** Belt conveyors, lumpy load, limit angle of inclination.

*Стаття надійшла до редакції 29.05. 2020*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук М.С.Четвериком*