

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО УГЛА НАКЛОНА ТРУБЧАТОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА**¹Кирия Р.В., ¹Жигула Т.И., ²Желязов Т.**¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ²Технический университет, София, Болгария**ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО КУТА НАХИЛУ ТРУБЧАТОГО СТРИЧКОВОГО КОНВЕЄРА****¹Кірія Р.В., ¹Жигула Т.І., ²Желязов Т.**¹Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²Технічний університет, Софія, Болгарія**DETERMINING LIMITING ANGLE OF INCLINATION OF TUBULAR BELT CONVEYOR****¹Kiriia R.V., ¹Zhigula T.I., ²Zhelyazov T.**¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine? ²Technical University, Sofia, Bulgaria

Аннотация. В настоящее время одним из перспективных видов конвейерного транспорта является трубчатый конвейер. Основными преимуществами трубчатого конвейера являются экологичность перемещения сыпучего груза и возможность транспортировать груз по криволинейным трассам без перегрузочных узлов. В то же время, широкое применение конвейеров с трубчатой лентой сдерживается недостаточным обоснованием параметров конвейера. В литературных источниках не существует аналитической зависимости предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера от радиуса трубчатой ленты, степени заполнения грузом ленты, а также физико-механических свойств сыпучего груза. В работе определен предельный угол наклона конвейера с трубчатой лентой в зависимости от свойств сыпучего груза и степени заполнения им ленты. Предполагалось, что лента представляет собой жесткий цилиндр, заполненный сыпучим грузом, находящимся в предельном равновесии. При этом на груз действуют силы трения со стороны ленты, направленные по движению ленты, а также составляющие силы тяжести груза, направленные против движения ленты конвейера. Кроме того, при движении ленты с грузом по роликам возникают силы, действующие на ролики, обусловленные распором груза. При этом на ролики действуют активные и пассивные силы давления со стороны сыпучего груза, связанные со сжатием и развалом ленты при ее прохождении через роlikоопоры конвейера. При увеличении количества груза в ленте трубчатого конвейера силы распора груза на ролики увеличиваются и, тем самым, увеличивают силы трения груза о ленту конвейера, что приводит к увеличению предельного угла наклона ленточного конвейера. В работе на основании теории предельного равновесного состояния сыпучего груза получены уравнения равновесия груза на ленте наклонного трубчатого конвейера. На основе полученного уравнения равновесия найдены аналитические зависимости предельного угла наклона ленточного конвейера с трубчатой лентой от степени заполнения сыпучим грузом ленты и свойств сыпучего груза (угла внутреннего трения и угла трения груза о ленту конвейера). Из анализа этих зависимостей следует, что предельный угол наклона трубчатого ленточного конвейера зависит от угла внутреннего трения транспортируемого груза, угла трения груза о ленту конвейера, степени заполнения ленты грузом и не зависит от радиуса ленты конвейера.

Ключевые слова: конвейер с лентой глубокой желобчатости, роlikоопоры, активные и пассивные давления сыпучего груза, предельный угол наклона конвейера.

В настоящее время широкое применение получили ленточные конвейеры с трубчатой лентой. Основным преимуществом трубчатого ленточного конвейера является отсутствие контакта груза с окружающей средой, а также возможность транспортирования груза по криволинейным трассам без перегрузочных узлов.

Кроме того, в отличие от ленточного конвейера с лентой глубокой желобчатости, транспортируемый груз на ленте трубчатого конвейера из-за ограниченного пространства более устойчив.

Вопросами устойчивости и предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера занимаются Ю. А. Пертен, В. Д. Черненко, В. И. Галкин, В. Г. Дмитриев.

В работе [1] решалась задача устойчивости сыпучих грузов наклонного трубчатого конвейера, при этом на груз при движении по трубчатой ленте конвейера действуют силы трения груза о ленту, направленные по ходу движения ленты, составляющие силы тяжести груза, направленные против движения ленты, и сила подпора сыпучего груза, направленная так же, как и сила трения, по движению ленты.

Однако такой режим равновесия сыпучего груза в трубчатом конвейере возможен при углах наклона конвейера гораздо выше допустимого.

В работе [2] на основании теорий об анизотропных тонких оболочках и предельного равновесного состояния сыпучих сред решалась задача устойчивости сыпучего груза на наклонном и криволинейном участках трубчатого ленточного конвейера. При этом так же, как и в работе [1], предполагалось, что кроме сил трения груза о ленту и составляющей силы тяжести груза учитывалась и сила подпора груза, направленная по движению ленты конвейера. При этом сыпучий груз являлся мелкокусковым.

В работе [3] рассмотрены результаты экспериментальных исследований по определению допустимых углов наклона конвейеров с лентой глубокой желобчатости и гирляндными роlikоопорами. При этом установлено, что допустимый угол наклона конвейера зависит от степени заполнения грузом конвейерной ленты, угла внутреннего трения груза, гранулометрического состава и влажности груза и практически не зависит от скорости движения ленты конвейера.

Из анализа этих работ следует, что вопрос определения предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера, транспортирующего крупнокусковые сыпучие грузы, не достаточно изучен.

Целью данной статьи является: на основании теории предельного состояния сыпучего груза установить зависимость предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера от параметров конвейера, свойств ленты и груза.

В данной статье на основании теории предельного равновесного состояния сыпучего груза получена аналитическая зависимость предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера от параметров конвейера, свойств ленты и свойств груза.

При этом предполагается, что лента представляет собой жесткий цилиндр, заполненный сыпучим грузом и наклоненный к горизонту под углом α (рис. 1).

На груз действуют силы трения груза о ленту конвейера, направленные против движения ленты, и составляющая силы тяжести груза, направленная по ходу движения ленты конвейера.

Предположим, что коэффициент трения груза о ленту f_1 меньше коэффициента внутреннего трения сыпучего груза f ($f_1 < f$). Так как в противном случае, т.е. при $f_1 \geq f$, предельный угол наклона трубчатого конвейера $\alpha_n = \arctg f$.

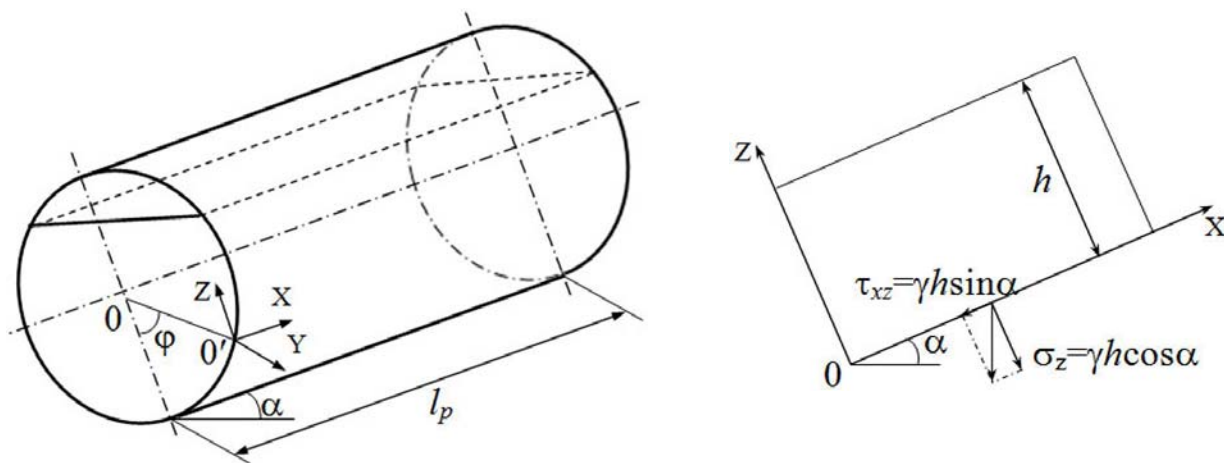


Рисунок 1 – Напряженно-деформированное состояние груза наклонного конвейера с трубчатой лентой

Составим уравнение равновесия сил, действующих на участок сыпучего груза между нормальными сечениями ленты в местах расположения роlikоопор, т.е. участок сыпучего груза между роlikоопорами.

В проекции на ось конвейера уравнение равновесия сил, действующих на этот участок сыпучего груза, примет вид:

$$F_T = F_g, \quad (1)$$

где F_T – сила трения выделенного участка груза о ленту конвейера, направленная по движению ленты конвейера, Н; F_g – составляющая силы веса выделенного участка груза, направленная против движения ленты конвейера, Н.

Согласно [4] на трубчатую ленту конвейера со стороны груза действуют активные и пассивные нормальные боковые давления $\sigma_{\bar{o}a}$ и $\sigma_{\bar{o}n}$, которые зависят от степени заполнения ленты θ и угловой координаты φ точек ленты конвейера (рис. 2).

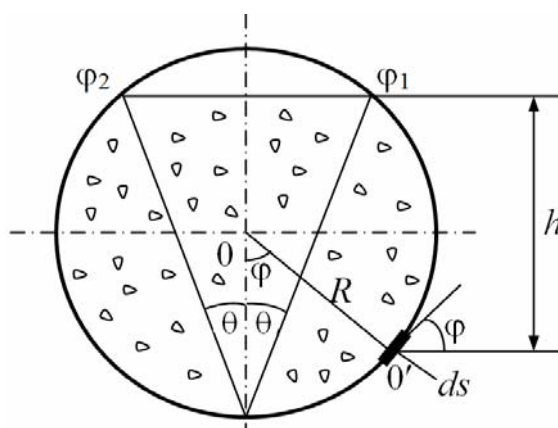


Рисунок 2 – Поперечное сечение трубчатой ленты конвейера с грузом

При этом до середины пролета между роlikоопорами на ленту со стороны груза действует активное боковое давление $\sigma_{\bar{o}a}$, а с середины пролета до его конца на борта ленты действует пассивное боковое давление $\sigma_{\bar{o}n}$.

Среднее нормальное давление, действующее на ленту трубчатого конвейера со стороны груза, определим по формуле:

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{\bar{o}a} + \sigma_{\bar{o}n}}{2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\bar{o}a}, \sigma_{\bar{o}n}$ – активное и пассивное боковые давления, действующие на трубчатую ленту конвейера, Н/м².

Средние касательные напряжения, действующие со стороны груза на ленту и направленные вдоль ленты, определим по формуле:

$$\tau_c = f_1 \sigma_c, \quad (3)$$

где f_1 – коэффициент трения груза о ленту конвейера.

Выделим малый элемент дуги ленты ds в точке ленты с угловой координатой φ (см. рис. 2).

Суммарную силу трения выделенного участка сыпучего груза о ленту конвейера определим по формуле:

$$F_T = l_p \int \tau_c ds, \quad (4)$$

где ds – элемент дуги нормального сечения ленты конвейера, равный $ds = R d\varphi$, м; R – радиус нормального сечения трубчатой ленты, м; l_p – расстояние между роlikоопорами, м; φ – угловая координата точек трубчатой ленты конвейера, рад.

Подставляя в правую часть под интегралом выражение τ_c , согласно формулам (3) и (2) получим

$$F_T = f_1 l_p \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{\sigma_{\bar{o}a} + \sigma_{\bar{o}n}}{2} R d\varphi, \quad (5)$$

где φ_1 и φ_2 – пределы интегрирования ($\varphi_1 = \pi - 2\theta$; $\varphi_2 = -\pi + 2\theta$); θ – угол незаполнения ленты, рад. (см. рис. 2).

Разбивая интеграл на левую и правую части, после интегрирования по φ получим

$$F_T = f_1 l_p R \int_0^{\varphi_1} (\sigma_{\bar{o}a} + \sigma_{\bar{o}n}) d\varphi. \quad (6)$$

Определим теперь нормальные активные и пассивные давления сыпучего груза, действующие на ленту конвейера.

Согласно работе [4] нормальные σ_z и касательные τ_{xz} напряжения, действующие на выделенный элемент ленты со стороны сыпучего груза, определяются по формулам (см. рис. 1):

$$\sigma_z = \gamma h \cos \alpha; \quad \tau_{xz} = \gamma h \sin \alpha. \quad (7)$$

где h – расстояние от поверхности сыпучего груза до выделенного элемента ленты, м; где γ – удельный вес груза, Н/м²; α – угол наклона конвейера, град.

Из рисунка 2 расстояние h определяется по формуле

$$h = R(\cos 2\theta + \cos \varphi). \quad (8)$$

Из круга Мора [5, 6] наименьшее и наибольшее нормальные напряжения в сыпучем грузе σ_x в точке контакта сыпучего груза с выделенным элементом ленты и перпендикулярные к плоскости ZY определяются из выражения:

$$\sigma_x = \sigma_z(1 + 2f^2) \mp 2\sqrt{(1 + f^2)(\sigma_z^2 f^2 - \tau_{xz}^2)}. \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9), после преобразования получим наименьшее σ_{xa} и наибольшее σ_{xn} напряжения σ_x :

$$\begin{aligned} \sigma_{xa} &= \gamma h \cos \alpha \left[1 + 2f^2 - 2\sqrt{(1 + f^2)(f^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)} \right]; \\ \sigma_{xn} &= \gamma h \cos \alpha \left[1 + 2f^2 + 2\sqrt{(1 + f^2)(f^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)} \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

При этом наибольшее и наименьшее нормальные напряжения сыпучего груза, действующие на выделенный элемент ленты, перпендикулярные плоскости XY, определяются по формулам [6]:

$$\sigma_{ya} = \frac{\sigma_{xa} + \sigma_z}{2} - r_1; \quad \sigma_{yn} = \frac{\sigma_{xn} + \sigma_z}{2} + r_2, \quad (11)$$

где $r_{1,2} = f \left(\sigma_z \sqrt{1 + f^2} \mp \sqrt{\sigma_z^2 f^2 - \tau_{xz}^2} \right)$.

Подставляя (10) в (11) с учетом (7), после преобразования получим:

$$\sigma_{ya} = \gamma h \cos \alpha \cdot n_1; \quad \sigma_{yn} = \gamma h \cos \alpha \cdot n_2. \quad (12)$$

Здесь n_1 и n_2 – наименьший и наибольший коэффициенты бокового распора, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} n_1 &= 1 + f^2 - \sqrt{(1 + f^2)(f^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)} - f \left(\sqrt{1 + f^2} - \sqrt{f^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha} \right); \\ n_2 &= 1 + f^2 + \sqrt{(1 + f^2)(f^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha)} + f \left(\sqrt{1 + f^2} + \sqrt{f^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя в формулах (13) $n_1 \alpha = 0$, получим

$$n_1 = 1 + 2f^2 - 2f\sqrt{1+f^2} = m; \quad n_2 = 1 + 2f^2 + 2f\sqrt{1+f^2} = \frac{1}{m}, \quad (14)$$

где m – коэффициент подвижности сыпучего груза [6].

Активные и пассивные боковые давления сыпучего груза, действующие на выделенный элемент ленты конвейера, определим по формулам:

$$\sigma_{\delta a} = \sigma_z \cos^2 \varphi + \sigma_{ya} \sin^2 \varphi; \quad (15)$$

$$\sigma_{\delta n} = \sigma_z \cos^2 \varphi + \sigma_{yn} \sin^2 \varphi. \quad (16)$$

Подставляя в (15) и (16) выражения (7) и (12), после преобразования получим:

$$\sigma_{\delta a} = \gamma h \cos \alpha (\cos^2 \varphi + n_1 \sin^2 \varphi); \quad (17)$$

$$\sigma_{\delta n} = \gamma h \cos \alpha (\cos^2 \varphi + n_2 \sin^2 \varphi). \quad (18)$$

Или, с учетом (8), имеем

$$\sigma_{\delta a} = \gamma R \cos \alpha (\cos 2\theta + \cos \varphi) (\cos^2 \varphi + n_1 \sin^2 \varphi); \quad (19)$$

$$\sigma_{\delta n} = \gamma R \cos \alpha (\cos 2\theta + \cos \varphi) (\cos^2 \varphi + n_2 \sin^2 \varphi). \quad (20)$$

Подставляя (19) и (20) в правую часть выражения (6), после преобразования получим:

$$F_T = 2\gamma f_1 l_p R^2 \cos \alpha \int_0^{\varphi_1} (\cos 2\theta + \cos \varphi) \left(\cos^2 \varphi + \frac{n_1 + n_2}{2} \sin^2 \varphi \right) d\varphi. \quad (21)$$

Составляющую силы тяжести выделенного участка груза между роlikоопорами трубчатого конвейера, наклоненного под углом α к горизонту, определим по формуле:

$$F_g = G \sin \alpha = \gamma S_m l_p \sin \alpha, \quad (22)$$

где G – сила тяжести выделенного участка груза между роlikоопорами, Н; S_m – площадь сечения трубчатой ленты, заполненной сыпучим грузом, м^2 .

Согласно рисунку 2 площадь сечения трубчатой ленты, заполненной сыпучим грузом, определяется по формуле

$$S_m = R^2 \left[(\pi - 2\theta) + \frac{\sin 4\theta}{2} \right]. \quad (23)$$

Подставляя (21) и (22) в (1) с учетом (23), после интегрирования получим уравнение относительно предельного угла наклона трубчатого конвейера α_n :

$$d_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_n = a_1 + b_1 \left(1 + f^2 + f \sqrt{f^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha_n} \right), \quad (24)$$

$$\text{где } a_1 = f_1 \left[(\pi - 2\theta) \cos 2\theta - \frac{\sin 4\theta}{2} \cos 2\theta + 2 \sin 2\theta - \frac{2 \sin^3 2\theta}{3} \right];$$

$$b_1 = f_1 \left[(\pi - 2\theta) \cos 2\theta + \frac{\sin 4\theta}{2} \cos 2\theta + \frac{2 \sin^3 2\theta}{3} \right]; \quad d_1 = (\pi - 2\theta) + \frac{\sin 4\theta}{2}.$$

Подставляя в уравнение (24) $t = \operatorname{tg} \alpha_n$, получим уравнение относительно t :

$$t = \frac{a_1 + b_1 (1 + f^2 + f \sqrt{f^2 - t^2})}{d_1}. \quad (25)$$

Из правой части уравнения (25) следует, что $t \leq f$, т.е. $\alpha_n \leq \operatorname{arctg} f$.

После преобразования уравнение (25) можно представить в виде

$$d_1 t - a_1 - b_1 (1 + f^2) = b_1 f \sqrt{f^2 - t^2}. \quad (26)$$

Возведя в квадрат левую и правую части равенства (26), после преобразования получим квадратное уравнение относительно t в виде:

$$A_1 t^2 + B_1 t + C_1 = 0, \quad (27)$$

$$\text{где } A_1 = d_1^2 + b_1^2 f^2; \quad B_1 = -2d_1[a_1 + b_1(1 + f^2)]; \quad C_1 = [a_1 + b_1(1 + f^2)]^2 - b_1^2 f^4.$$

Решая квадратное уравнение (27) и беря больший корень, получим

$$t = \frac{-B_1 + \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{2A_1}. \quad (28)$$

Из (28) следует, что положительные корни уравнения (27) существуют, если выполняется условие $B_1^2 - 4A_1C_1 \geq 0$.

Окончательно предельный угол наклона трубчатого ленточного конвейера α_n определяется из равенства

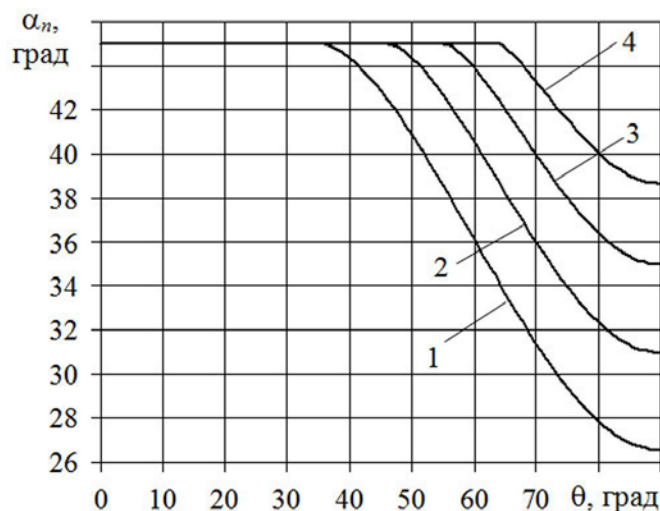
$$\alpha_n = \operatorname{arctg} t. \quad (29)$$

Исследования показали, что при $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$ (90°), т.е. при малом количестве сыпучего груза в трубчатой ленте конвейера предельный угол наклона конвейера $\alpha_n \rightarrow \operatorname{arctg} f_1$; при этом $\alpha_n \geq \operatorname{arctg} f_1$, т.е. угол незаполнения ленты стремится к углу трения груза о ленту конвейера.

Следовательно, предельный угол наклона трубчатого конвейера в случае $f > f_1$ не зависит от радиуса ленты конвейера, больше либо равен углу трения груза о ленту и меньше либо равен углу внутреннего трения сыпучего груза, т.е. изменяется в пределах

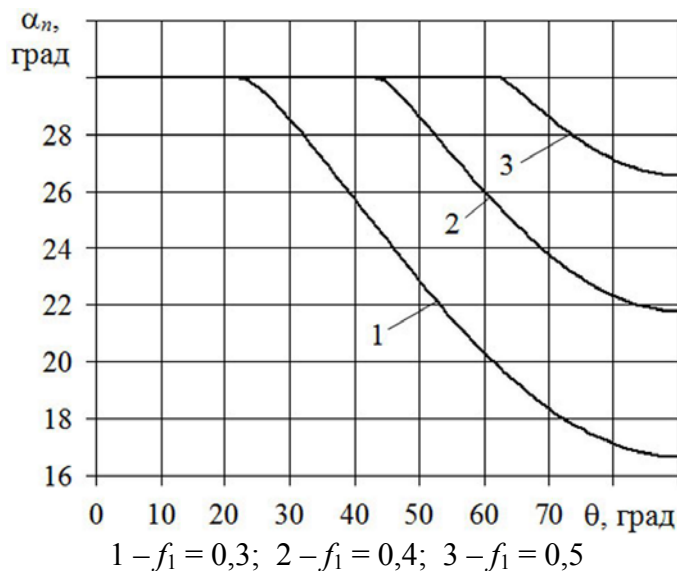
$$\operatorname{arctg} f_1 \leq \alpha_n \leq \operatorname{arctg} f. \quad (30)$$

На рис. 3, 4 показаны графики зависимости предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера от угла незаполнения ленты конвейера θ при различных значениях коэффициента трения груза о ленту f_1 . При этом значения коэффициента внутреннего трения и коэффициентов трения груза о ленту для руды принимали значения: $f = 1$; $f_1 = 0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$ (см. рис. 3), а для угля $f = 0,58$; $f_1 = 0,3$; $0,4$; $0,5$ (см. рис. 4).



1 – $f_1 = 0,5$; 2 – $f_1 = 0,6$; 3 – $f_1 = 0,7$; 4 – $f_1 = 0,8$

Рисунок 3 – График зависимости предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера α_n от угла незаполнения ленты конвейера θ при различных значениях коэффициента трения груза о ленту f_1 в случае транспортирования руды



1 – $f_1 = 0,3$; 2 – $f_1 = 0,4$; 3 – $f_1 = 0,5$

Рисунок 4 – График зависимости предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера α_n от угла незаполнения ленты конвейера θ при различных значениях коэффициента трения груза о ленту f_1 в случае транспортирования угля

Из рисунков 3, 4 видно, что с увеличением угла незаполнения ленты θ от 0 до минимального значения θ_m ($0 \leq \theta \leq \theta_m$) предельный угол наклона ленточного трубчатого конвейера принимает максимальное значение, равное углу внутреннего трения груза, т.е. $\alpha_n = \arctg f$. А при значениях $\theta > \theta_m$ с увеличением

θ предельный угол наклона ленточного трубчатого конвейера уменьшается и при $\theta = \pi/2$ (90°) принимает значение, равное углу трения груза о ленту конвейера, т.е. $\alpha_n = \arctg f_1$.

При этом для руды предельный угол наклона трубчатого конвейера при тех же самых значениях угла незаполнения θ больше, чем для угля, а максимальные предельные углы наклона трубчатого ленточного конвейера для руды и для угля равны соответственно $0,79$ (45°) и $0,52$ (30°).

Кроме того, из рисунков 3 и 4 имеем, что для руды при $f_1 = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ минимальный угол заполнения ленты грузом θ_m соответственно равен: $\theta_m = 0,63$ (36°); $0,82$ (47°); $0,96$ (55°); $1,12$ (64°), а для угля при $f_1 = 0,3; 0,4; 0,5$ соответственно $\theta_m = 0,40$ (23°); $0,77$ (44°); $1,1$ (63°).

Выводы

1. На основании теории предельного равновесного состояния сыпучей среды получена аналитическая зависимость предельного угла наклона трубчатого ленточного конвейера от степени заполнения ленты грузом и свойств сыпучего груза.

2. Исследования показали, что предельный угол наклона трубчатого ленточного конвейера зависит от угла внутреннего трения транспортируемого груза, угла трения груза о ленту конвейера, угла незаполнения ленты грузом и не зависит от радиуса ленты конвейера.

3. При этом установлено, что с увеличением угла незаполнения ленты грузом от 0 до минимального значения θ_m предельный угол наклона ленточного трубчатого конвейера принимает максимальное значение, равное углу внутреннего трения груза. А при $\theta > \theta_m$ с увеличением θ предельный угол наклона ленточного трубчатого конвейера уменьшается и при $\theta = 90^\circ$ принимает значение, равное углу трения груза о ленту конвейера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пертен Ю. А. Крутонаклонные конвейеры. Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1977. 216 с.
2. Черненко В. Д. Теория и расчет крутонаклонных конвейеров. Ленинград: изд.-во Ленинградского университета, 1985. 292 с.
3. Галкин В.И., Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П. и др. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. М.: Из-во МГГУ, 2005. 543 с.
4. Кирия Р. В., Ларионов Н.Г. Определение предельного угла наклона конвейера с лентой глубокой желобчатости // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН України. Днепропетровск, 2015. Вып. 120. С. 276–286.
5. Voloshyn O., Riabtsev O. Some important aspects of rock mechanics and geomechanics. *E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice*, 109 (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900114>.
6. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов М.: Машиностроение, 1984. – 251 с.

REFERENCES

1. Perten Yu. A. (1977), *Krutonaklonnye konveyery* [Steeplly inclined conveyors], Mashinosrtoenie, Leningrad, SU.
2. Chernenko V. D. (1985), *Teoriya i raschet krutonaklonnykh konveyerov* [Theory and calculation of steeply inclined conveyors], Izdatelstvo Leningrad university, Leningrad, SU.
3. Galkin V. I., Dmitriev V. G. and Dyachenko V. P. (2005), *Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornyykh predpriyatiy* [Modern theory of belt conveyers of mining enterprises], Iz-vo MGGU, Moscow, RU.
4. Kiriya R. V. and Larionov M. G. (2015), "Determination critical inclination of conveyor with deeply-sagging belt", *Geo-Technical Mechanics*, no. 120, pp. 276–286.
5. Voloshyn O. and Riabtsev O (2019), "Some important aspects of rock mechanics and geomechanics", *E3S Web of Conferences, International Conference Essays of Mining Science and Practice*, no. 109 (2019). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900114>.
6. Zenkov R. L. (1984), *Mekhanika nasypanykh грузов* [Soil mechanics], Mashinosrtoenie, Moscow, SU.

Об авторах

Кирия Руслан Виссарионович, 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, kiriya.igtm@gmail.com.

Жигула Татьяна Ильинична, кандидат 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, zhigulat@gmail.com.

Желязов Тодор, доцент отделения механики факультет транспорта Технического университета, София, Болгария, elovar@yahoo.com, todor.zhelyazov@tu-sofia.bg

About the authors

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. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnepr, Ukraine, kiriya.igtm@gmail.com.

Zhyhula Tetiana Illivna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnepr, Ukraine, zhigulat@gmail.com.

Zhelyazov Todor, Associate professor Department of Mechanics of Faculty of Transport Technical University, Sofia, Bulgaria, elovar@yahoo.com, todor.zhelyazov@tu-sofia.bg

Анотація. В даний час одним з перспективних видів конвеєрного транспорту є трубчастий конвеєр. Основними перевагами трубчастого конвеєра є екологічність переміщення сипкого вантажу та здатність транспортувати вантаж по криволінійних трасах без перевантажувальних вузлів. В той же час, широке застосування конвеєрів з трубчастою стрічкою стримується недостатнім обґрунтуванням параметрів конвеєра. В літературних джерелах не існує аналітичної залежності граничного кута нахилу трубчастого стрічкового конвеєра від радіусу трубчастої стрічки, ступеня заповнення вантажем стрічки, а також фізико-механічних властивостей сипкого вантажу. В роботі визначено граничний кут нахилу конвеєра з трубчастою стрічкою залежно від властивостей сипкого вантажу та ступеня заповнення ним стрічки. Припускалося, що стрічка є жорстким циліндром, заповненим сипким вантажем, що знаходиться в граничній рівновазі. При цьому на вантаж діють сили тертя з боку стрічки, направлені за рухом стрічки, а також складові сили тяжкості вантажу, направлені проти руху стрічки конвеєра. Крім того, при русі стрічки з вантажем по роликах виникають сили, що діють на ролики, обумовлені розпором вантажу. При цьому на ролики діють активні і пасивні сили тиску з боку сипкого вантажу, пов'язані із стисненням і розвалом стрічки при її проходженні через роликоопори конвеєра. При збільшенні кількості вантажу в стрічці трубчастого конвеєра сили розпору вантажу на ролики збільшуються і, тим самим, збільшують сили тертя вантажу об стрічку конвеєра, що призводить до збільшення граничного кута нахилу стрічкового конвеєра. В роботі на підставі теорії граничного рівноважного стану сипкого вантажу отримано рівняння рівноваги вантажу на стрічці похилого трубчастого конвеєра. На основі отриманого рівняння рівноваги знайдено аналітичну залежність граничного кута нахилу стрічкового конвеєра з трубчастою стрічкою від ступеня заповнення сипким вантажем стрічки і властивостей сипкого вантажу (кута внутрішнього тертя і кута тертя вантажу об стрічку конвеєра). З аналізу цієї залежності виходить, що граничний кут нахилу трубчастого стрічкового конвеєра залежить від кута внутрішнього тертя вантажу, що транспортується, кута тертя вантажу об стрічку конвеєра, ступеню заповнення стрічки вантажем і не залежить від радіусу стрічки конвеєра.

Ключові слова: конвеєр із стрічкою глибокої жолобчатості, роликоопори, активний і пасивний тиск сипкого вантажу, граничний кут нахилу конвеєра.

Annotation. Currently, one of the promising types of conveyor transport is a tubular conveyor. The main advantages of the tubular conveyor are the environmental friendliness of moving bulk load and ability to transport load along curved tracks without reloading nodes. At the same time, the widespread use of tubular belt conveyors is constrained by insufficient justification of the conveyor parameters. In literary sources, there is no analytical dependence of the limiting angle of inclination of the tubular belt conveyor relatively to the radius of the tubular belt, degree of the belt filling with weight, and physical and mechanical properties of the bulk load. In this work, limiting angle of inclination of the conveyor with a tubular belt is determined depending on the properties of the bulk load and degree of the belt filling with it. It was assumed that the belt was a rigid cylinder filled with bulk material in limit equilibrium. In this case, friction forces act on the load from the belt and are directed along the movement of the belt, as well as components of the gravity of the load directed against the movement of the conveyor belt. In addition, when the belt moves with the load on the rollers, forces appear, which act on the rollers due to the spread of the load. At the same time, active and passive pressure forces from the bulk load act on the rollers and are associated with the belt compression and collapse during its passing

through the roller bearings of the conveyor. With increase in the amount of the load in the belt of the tubular conveyor, the forces of the load spread acting on the rollers increase and, thereby, forces the load friction against the conveyor belt also increase, hence leading to an increase in the limiting angle of inclination of the belt conveyor. In the work, on the basis of the theory of the limiting equilibrium state of bulk load, equations were obtained for the load equilibrium on the belt of inclined tubular conveyor. Based on the obtained equilibrium equation, analytical dependences of the limiting angle of inclination of the belt conveyor with a tubular belt on the degree of the belt filling with the bulk load and properties of the bulk load (angle of internal friction and angle of the load friction against the conveyor belt) were determined. From the analysis of these dependencies it follows that maximum angle of inclination of the tubular belt conveyor depends on the angle of internal friction of the transported load, angle of the load friction against the conveyor belt and degree of the belt filling with load, and does not depend on the radius of the conveyor belt.

Keywords: conveyor with deeply sagging belt, roller bearings, active and passive bulk load pressures, limit angle of inclination of the conveyor.

Стаття надійшла до редакції 15.11. 2019

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Монастирським В.Ф.