УДК 621.867.212.7

© С. В. Репин, д-р техн. наук, профессор
© И. И. Воронцов, д-р техн. наук, профессор
© А. А. Баженов, канд. техн. наук
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: repinserge@mail.ru, vorontsov.52@mail.ru,
z4m62@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-162-166

© S. V. Repin, Dr. Sci. Tech., Professor
© I. I. Vorontsov, Dr. Sci. Tech., Professor
© A. A. Bazhenov, PhD in Sci. Tech.
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: repinserge@mail.ru, vorontsov.52@mail.ru,
z4m62@yandex.ru

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЫПУЧЕГО ГРУЗА НА РАБОЧЕМ ПОЛОТНЕ КРУТОНАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРА С ПЕРЕГОРОДКАМИ

CALCULATION OF STATIC STABILITY OF BULK CARGO ON THE WORKING CANVAS OF STEEPLY INCLINED CONVEYOR WITH PARTITIONS

Описаны расчет устойчивости сыпучего груза (песок, щебень) на рабочем полотне крутонаклонного конвейера (у которого угол наклона превышает угол естественного откоса сыпучего груза), факторы, влияющие на устойчивость груза. Результаты работы могут быть применены в строительстве, добывающей промышленности, в сфере высшего образования.

Ключевые слова: груз, конвейер, производительность, транспортировка.

The article describes the calculation of stability of bulk cargo (sand, gravel) on the working canvas of a steeply inclined conveyor (where the inclination angle exceeds the angle of natural slope of the bulk cargo), as well as the factors influencing stability of freight. The results of the study can be applied in construction, mining industry, as well as in the field of higher education.

Keywords: cargo, conveyor, performance, transportation.

Устойчивостью груза называется его способность сохранять исходное положение в подвижном составе под действием инерционных и других сил. Помимо силы трения устойчивость обеспечивается закреплением груза различными средствами крепления [1]. В данной статье предложено решение задачи устойчивости сыпучего груза на полотне крутонаклонного конвейера с перегородками. Предлагается методика нахождения объема груза и определения его «шапки» в зависимости от конкретных условий. Методика будет реализована в компьютерной программе, приведены результаты компьютерного эксперимента.

При транспортировке груза конвейером возникает проблема расчета устойчивости груза на полотне конвейера. На устойчивость груза в этом случае в первую очередь влияет такой фактор, как угол естественного откоса (рис. 1), зависящий от величины ускорения груза, уменьшаясь при увеличении ускорения, а также от состояния

груза (угол естественного откоса увеличивается при увеличении влажности груза из-за «слипания» его частиц друг с другом) и размера фракций груза. Также при ускорениях груза вершина его «шапки» становится не заостренной, а куполообразной [2].

Для простоты угол естественного откоса и угол внутреннего трения принимают равными. Это упрощает решение задач устойчивости при очень незначительных расхождениях результатов вычислений с реальностью.

В основе решения задач устойчивости лежит условие предельного состояния сыпучих и связанных сред. Оно имеет вид

$$\tau_n \leq \sigma_n \operatorname{tg} \rho + c, \quad (1)$$

где c — коэффициент сцепления; ρ — угол внутреннего трения; τ и σ — соответственно нормальное и касательное напряжения [3].

Также из-за «затенения» траектории падения груза расположенной выше перегородкой часть пространства может не иметь груза (рис. 2). Это

Рис. 1. Угол естественного откоса

Рис. 2. «Затенение» части полотна при падении груза на конвейер

снижает производительность. Бороться с этим можно, если приблизить угол установки перегородок к вертикали (что, однако, может снизить объем груза между перегородками) или подачи груза не вертикально, а под углом, таким образом, чтобы угол падения груза относительно полотна конвейера был близок к прямому. Это также позволяет нейтрализовать силы, которые при вертикальной загрузке стремятся затормозить движение конвейера (из-за массовых сил, направленных против направления движения конвейера). Недостатком этого способа является сложность загрузочного устройства и, отчасти, необходимость расчета его работы [4].

Для сухих грузов считается, что они представляют собой смесь твердых тел с более или

менее сопоставимыми размерами, промежутки между которыми заполнены воздухом. В случае влажного груза считается, что эти промежутки заполнены водой (полностью или частично). Касательное напряжение между частицами пропорционально нормальному напряжению и тангенсу угла внутреннего трения [5].

Также на поведение груза оказывают влияние коэффициенты бокового давления и подвижности груза [6].

Коэффициент подвижности — это некое минимальное значение коэффициента бокового давления, при котором происходит нарушение сцепления частиц.

Коэффициент бокового давления зависит от угла наклона полотна и от коэффициента подвижности k_n и равен

$$k_d = (\operatorname{tg}^2 \beta + k_n) / (1 + k_n \operatorname{tg}^2 \beta), \quad (2)$$

где β — угол наклона конвейера.

Если сцепление между частицами материала мало, то угол внутреннего трения равен углу естественного откоса: $\gamma = \alpha$.

Для порошкообразных веществ (они характеризуются относительно высоким сцеплением между частицами) средний угол естественного откоса несколько больше угла внутреннего трения. Он зависит от метода получения откоса — свободным падением груза (вертикально или наклонно) или обрушением [7].

При насыпке материала с некоторой высоты угол естественного откоса α_2 несколько меньше теоретического угла естественного откоса α_1 . Угол α_2 принято определять для высоты падения, условно равной 1 м. В таком случае на основании экспериментальных данных можно считать, что

$$\alpha_2 = 0,7\alpha_1. \quad (3)$$

Коэффициент внешнего трения сыпучих материалов также зависит от того, находится ли материал в покое или движении [8]. Коэффициенты внутреннего и внешнего трения для этих материалов находятся между собой в известной зависимости [9].

Среднее давление от груза на полотно конвейера равно

$$P = m / T, \quad (4)$$

где m — масса груза между перегородками; T — расстояние между перегородками.

Максимальное сконцентрированное давление на полотно пропорционально высоте столба

груза в точке заделки перегородки, где эта высота максимальна.

Считаем, что нагрузка на точку (рис. 3) пропорциональна вертикальной толщине груза DC .

Определим верхнюю часть этой величины (выше точки B).

Из

$$\sin \gamma = AB / AC$$

получаем

$$AB = AC \cdot \sin \gamma. \quad (5)$$

Из

$$\operatorname{tg} \beta = DB / AB$$

получаем

$$DB = AB \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (6)$$

Определим нижнюю часть этой величины (ниже точки B):

$$BC / AC = \cos \gamma;$$

$$BC = AC \cdot \cos \gamma. \quad (7)$$

Общая толщина материала

$$DC = BC + DB. \quad (8)$$

Считаем, что нагрузка на верх перегородки пропорциональна длине свободной поверхности груза.

Если свободная поверхность груза заканчивается на верхней перегородке (рис. 4), то ее длина из

$$\cos(\beta - \varphi) = AC / AB$$

равна

$$AC = AB \cdot \cos(\beta - \varphi). \quad (9)$$

Если он заканчивается на полотне (рис. 5), то его длина из

Рис. 3. Схема фрагмента конвейера в области перегородки

$$\sin(\beta - \varphi) = AD / AB$$

равна

$$AB = AD / \sin(\beta - \varphi). \quad (10)$$

Перегородка относительно редко бывает вертикальной. Обычно угол ее наклона относительно вертикали положителен. При этом давление будет больше, чем в случае вертикальной перегородки [10–13]. Таким образом, наклон перегородки ощутимо влияет на величину активного давления.

$$E = \frac{\gamma H^2}{2} \left(\operatorname{tg} \left(45 - \frac{\varphi - \beta}{2} \right) - \operatorname{tg} \beta \right) \cos \beta. \quad (11)$$

Коэффициент устойчивости откоса равен отношению момента сил, удерживающих откос от сдвига, $M_{уд}$ к моменту сил, стремящихся сдвинуть откос, $M_{сдв}$:

$$K_y = \frac{P_i \cos \Theta_i \operatorname{tg} \varphi + cL}{T_i R}, \quad (12)$$

где Θ_i — угол между направлением силы P_i и нормальной составляющей N_i ; T_i — касательные составляющие от веса отсеков; R — радиус круглоцилиндрической дуги скольжения.

Рис. 4. Схема конвейера между перегородками (для случая, при котором нет свободной поверхности ленты): β — угол наклона конвейера; φ — угол естественного откоса сыпучего груза

Рис. 5. Схема конвейера между перегородками в случае, при котором свободная поверхность груза заканчивается до верхней перегородки

Зависимость коэффициента бокового давления от угла наклона и коэффициента подвижности груза

$$k_d = (\operatorname{tg}^2 \beta + k_n) / (1 + k_n \operatorname{tg}^2 \beta), \quad (13)$$

где теоретически

$$k_n = 1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi - 2 \operatorname{tg} \varphi \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}.$$

Для сохранения устойчивости груза необходимо выполнить условия предельного равновесия [14, 15]

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (14)$$

где

$$\sigma = h \gamma \sin \beta; \tau = h \gamma \cos \beta.$$

Использование упомянутых и предложенных формул позволит повысить точность расчета устойчивости транспортируемого груза при работе крутонаклонных конвейеров. Это, в свою очередь, сократит издержки, повысит производительность, а следовательно, принесет определенный экономический эффект.

Библиографический список

1. Баженов А. А. Разработка методики расчета крутонаклонных конвейеров с перегородками: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 102 с.
2. Repin S., Evtjukov S. Theoretical Study on the Stressed State of the Disc-Shaped Cohesive Bulk Material // World Applied Sciences Journal. 2013. No. 23 (Problems of Architecture and Construction). Pp. 153–159.

3. Спиваковский А. О., Дьячков В. К. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1987. 503 с.
4. Черненко В. Д. Расчет средств непрерывного транспорта. СПб.: Политехника, 2008. 386 с.
5. Пертен Ю. А. Крутонаклонные конвейеры. Л.: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1977. 216 с.
6. Александров М. П. Подъемно-транспортные машины. М.: Машиностроение, 1974. 503 с.
7. Пат. 2307778 Российская Федерация, МПК B65G15/00, G01M17/00, B65G43/00. Стенд для исследования параметров вертикального ленточного конвейера / Ю. Д. Тарасов, М. А. Уварова; СПб гос. горный ин-т им. Г. В. Плеханова (технический ун-т). № 2006113200/11; заявл. 19.04.06; опубл. 10.10.07.
8. Котилевский А. В. Двухленточные крутонаклонные конвейеры // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2009. 9 окт. URL: <http://journal.org/articles/2009/mash3.html>
9. Черненко В. Д., Баженов А. А. Расчет по нелинейной теории конвейерных лент с поперечными перегородками // Современные проблемы техносферы и подготовки научных кадров: сб. тр. III Междунар. семинара в г. Табарка (Тунис). Донецк: ДонНТУ, 2011. С. 242–246.
10. Баженов А. А. Определение поля напряжений в сыпучем грузе на рабочем полотне ленточно-цепных конвейеров // Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. СЗТУ. 2008. Вып. 40. С. 186–189.
11. Баженов А. А. Исследование распределения напряжений в сыпучем грузе на рабочем участке скребковых конвейеров // Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. СЗТУ. 2008. Вып. 40. С. 190–192.
12. Баженов А. А. Расчет оптимальных геометрических параметров плоской ленты с перегородками // Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. СЗТУ. 2008. Вып. 40. С. 193–195.
13. Баженов А. А. Определение давления от сыпучего груза на перегородку и ленту крутонаклонного конвейера с перегородками // Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. СЗТУ. 2008. Вып. 40. С. 196–198.
14. Виноградова В. В. Расчет устойчивости сыпучего груза на полотне движущейся ленты // Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. СЗТУ. 2008. Вып. 39. С. 23–25.
15. Виноградова В. В. Расчет оптимального расстояния между роликотопорами конвейеров с прижимной лентой // Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. СЗТУ. 2008. Вып. 39. С. 26–27.

References

1. Bazhenov A. A. *Razrabotka metodiki rascheta krutonaklonnykh konveyerov s peregorodkami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of a method of calculation of steeply inclined conveyors with partitions. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2012, 102 p.
2. Repin S., Evtukov S. Theoretical Study on the Stressed State of the Disc-Shaped Cohesive Bulk Material. *World Applied Sciences Journal*, 2013, no. 23 (Problems of Architecture and Construction), pp. 153–159.
3. Spivakovskiy A. O., D'yachkov V. K. *Transportiruyushchie mashiny* [Transporting machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 503 p.
4. Chernenko V. D. *Raschet sredstv nepreryvnogo transporta* [Calculation of means of continuous transport]. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2008, 386 p.
5. Perten Yu. A. *Krutonaklonnye konveyery* [Steeply inclined conveyors]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1977, 216 p.
6. Aleksandrov M. P. *Pod'emno-transportnye mashiny* [Hoisting-and-transport machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 503 p.
7. Tarasov Yu. D., Uvarova M. A. *Stend dlya issledovaniya parametrov vertikal'nogo lentchnogo konveyera* [Stand for research of parameters of the vertical tape conveyor]. Patent RF, no. 2307778, 2007.
8. Kotilevskiy A. V. *Dvukhlentchnye krutonaklonnye konveyery* [Two-belt steeply inclined conveyors]. *Zhurnal nauchnykh publikatsiy aspirantov i doktorantov – Journal of scientific publications of graduate students and doctoral candidates*, 2009, October, 9. Available at: <http://jurnal.org/articles/2009/mash3.html>.
9. Chernenko V. D., Bazhenov A. A. *Raschet po nelineynoy teorii konveyernykh lent s poperechnymi peregorodkami* [Calculation for the nonlinear theory of conveyor belts with cross partitions]. *Trudy III Mezhdunar. seminara «Sovremennye problemy tekhnosfery i podgotovki nauchnykh kadrov» v Tabarka (Tunis)* [Proc. of the III Int. workshop "Modern problems of a technosphere and preparation scientific staff", Tabarka (Tunis).] Donetsk, DonNTU Publ., 2011, pp. 242–246.
10. Bazhenov A. A. *Opredelenie polya napryazheniy v sypuchem gruze na rabochem polotne lentchno-tsepykh konveyerov* [Definition of the field of tension in bulk cargo on working cloth of tape and chain conveyors]. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya* [Problems of engineering science and mechanical engineering]. SZTU Publ., 2008, iss. 40, pp. 186–189.
11. Bazhenov A. A. *Issledovanie raspredeleniya napryazheniy v sypuchem gruze na rabochem uchastke skrebkovykh konveyerov* [Research of distribution of tension in bulk cargo on the working site of scraper conveyors]. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya* [Problems of engineering science and mechanical engineering]. SZTU Publ., 2008, iss. 40, pp. 190–192.
12. Bazhenov A. A. *Raschet optimal'nykh geometricheskikh parametrov ploskoy lenty s peregorodkami* [Calculation of optimum geometrical parameters of flat tape with partitions]. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya* [Problems of engineering science and mechanical engineering]. SZTU Publ., 2008, iss. 40, pp. 193–195.
13. Bazhenov A. A. *Opredelenie davleniya ot sypuchego gruzha na peregorodku i lentu krutonaklonnogo konveyera s peregorodkami* [Determination of pressure from bulk cargo upon the partitions and the belt of the steeply inclined conveyor with partitions]. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya* [Problems of engineering science and mechanical engineering]. SZTU Publ., 2008, iss. 40, pp. 196–198.
14. Vinogradova V. V. *Raschet ustoychivosti sypuchego gruzha na polotne dvizhushchey lenty* [Calculation of stability of bulk cargo on the cloth of the moving belt]. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya* [Problems of engineering science and mechanical engineering]. SZTU Publ., 2008, iss. 39, pp. 23–25.
15. Vinogradova V. V. *Raschet optimal'nogo rasstoyaniya mezhdu rolkooporami konveyerov s prizhimnoy lentoy* [Calculation of optimum distance between the rolling support of conveyors with the clamping tape]. [Problems of engineering science and mechanical engineering]. SZTU Publ., 2008, iss. 39, pp. 26–27.