

УДК: 621.867.1

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ
КРУТОНАКЛОННОГО КОНВЕЙЕРАTHEORETICAL STUDY OF THE BOOT PROCESS STEEPLY
INCLINED CONVEYORРепин С.В.¹, Алейник В.И.¹, Баженов А.А.²
Repin S. V.¹, Aleinik V. I.¹, Bazhenov A. A.²¹ - Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Россия),
² - Санкт-Петербургский государственный горный университет (Санкт-Петербург, Россия).¹ - St. Petersburg state University of architecture and civil engineering (St. Petersburg, Russia),
² - St. Petersburg state mining University (St. Petersburg, Russia).

Аннотация. Конвейерный транспорт широко используется в различных отраслях хозяйства. Весьма распространённым являются конвейеры, предназначенные для перемещения сыпучих грузов при значительных углах транспортирования, так называемые крутонаклонные конвейеры. В то же время, теоретические аспекты их работы изучены относительно мало, что не позволяет опереться на ранее накопленные знания при проектировании новых конструкций крутонаклонных транспортирующих машин. Это приводит к тому, что характеристики конвейера при его проектировании подбираются весьма приблизительно, без тщательного теоретического обчёта. Это приводит к нерациональному использованию ресурсов, как при возведении новых конвейеров, так и при эксплуатации существующих. В данной статье приведён теоретический расчёт узла загрузки конвейера и поведения груза при загрузке конвейера. Получены формулы для расчёта скорости падения груза на полотно конвейера, а также скорости его скольжения по загрузочному устройству на различных участках в зависимости от его геометрических параметров. Проанализировано влияние геометрических параметров питателя на поведение груза. Приведена математическая модель поведения сыпучей среды.

Ключевые слова: конвейер, груз, транспортировка, логистика, перевозка

Дата принятия к публикации: 02.09.2019
Дата публикации: 25.12.2019

Сведения об авторах:

Репин Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические машины», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, »
e-mail: Repinserge@mail.ru.

Алейник Вадим Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Наземные

Annotation. Conveyor transport is widely used in various sectors of the economy. Very common are conveyors designed to move bulk cargo at significant angles of transportation, the so-called steeply inclined conveyors. At the same time, the theoretical aspects of the work have been studied relatively poorly, which does not allow to rely on previously accumulated knowledge in the design of new designs of steep-sided transporting machines. This leads to the fact that the characteristics of the conveyor in its design are selected very approximately, without careful theoretical calculation. This, in turn, leads to irrational use of resources, both in the construction of new conveyors and in the operation of existing ones. This article presents a theoretical calculation of the loading unit of the conveyor, in particular, the behavior of the load when loading the conveyor. As a result of the formula for calculating the speed of the load on the conveyor belt, as well as the speed of its sliding on the loading device in different areas depending on its geometric parameters. Programs were also compiled to calculate these speeds at its various geometric parameters. The influence of geometric parameters of the feeder on the behavior of the load is analyzed. The mathematical model of the granular medium behavior is given.

Keywords: conveyor, cargo, transportation, logistics, transportation.

Date of acceptance for publication: 02.09.2019
Date of publication: 25.12.2019

Authors' information:

Sergey V. Repin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Land Transport and Technological Machines, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
e-mail: Repinserge@mail.ru.

Vadim I. Aleinik – Ph.D. in Technology, Associate Professor of the Department of Land Transport and



транспортно-технологические машины», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
e-mail: Vadim.aleyunik@gmail.com.

Баженов Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические процессы и машины», Санкт-Петербургский государственный горный университет, *e-mail: z4m62@yandex.ru.*

Technological Machines, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
e-mail: Vadim.aleyunik@gmail.com.

Aleksandr A. Bazhenov – Ph.D. in Technology, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Processes and Machines, St. Petersburg State Mining University, *e-mail: z4m62@yandex.ru.*

1. Введение

Значительная часть энергии, потребляемой конвейерами на транспортирование сыпучих грузов, расходуется на разгон материала при его загрузке на конвейер. Особенно сильное влияние данный фактор оказывает на работу крутонаклонных конвейеров, транспортирующих груз под углом 30 и более градусов горизонту [1, 2].

2. Постановка задачи

Для снижения затрат энергии на разгон материала конвейерами используются специальные питатели, подающие материал под определённым углом к ленте конвейера. Наиболее целесообразно применение гравитационных питателей, которые для разгона материала используют силу тяжести материала, не привлекая дополнительных источников энергии. Данная статья посвящена исследованию работы питателя гравитационного типа с целью определения его оптимальных параметров при подаче материала на крутонаклонный конвейер [3].

3. Полученные результаты

На рис. 1 представлен крутонаклонный конвейер 1 с перегородками 2, на который подается материал с помощью гравитационного питателя, включающего бункер 3 с материалом, задвижку 4, вертикальный участок 5 лотка подачи материала на конвейер, криволинейный участок 6 и прямолинейный участок 7, направляющий материал на конвейер под углом γ к горизонту.

В процессе движения материала от бункера 3 скорость меняется от $V_0=0$ в точке 0 до величины V_1 в конце вертикального уча-

стка 1. В конце криволинейного участка 2 скорость достигает величины V_2 , а в конце наклонного третьего участка V_3 . В точке 4 падающий на ленту материал контактирует с ее поверхностью, имея скорость V_4 с составляющей V_t по направлению вдоль ленты и V_n по нормали к ленте.

Задача расчета – получить значение составляющей V_t не меньше скорости ленты $V_{л}$. Тогда будет отсутствовать торможение ленты со стороны загружаемого материала. Скорость ленты конвейера с перегородками составляет 0,5...2 м/с [4-6].

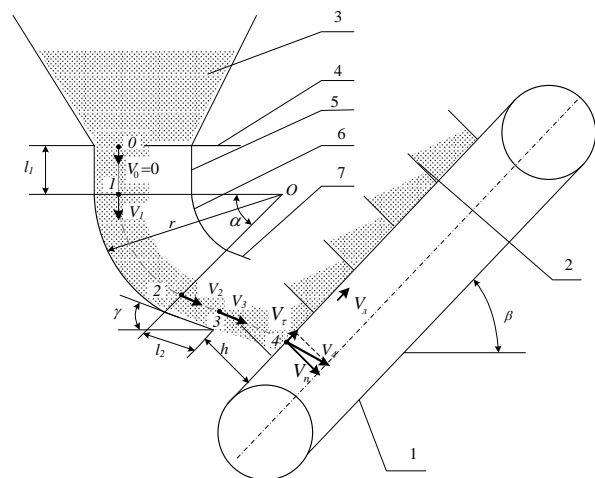


Рис. 1. Крутонаклонный конвейер с питателем

Исходными данными к расчету являются:
 l_1 – длина вертикального участка лотка;
 l_2 – длина наклонного участка лотка;
 f – коэффициент трения материала по поверхности лотка;
 r – радиус криволинейного участка лотка;
 γ – угол наклона прямолинейного участка, расположенного после криволинейного;
 β – угол наклона конвейера;
 h – расстояние от конца лотка до рабочей ветви конвейера.

Начальная скорость материала на входе в вертикальный участок равен нулю. Тогда на входе в криволинейный участок скорость зерен после разгона с ускорением силы тяжести g равна

$$V_1 = \sqrt{2gl_1}.$$

На криволинейном участка лотка движение происходит по дуге окружности.

Уравнение силового баланса для частицы материала в проекции на касательное направление к поверхности лотка

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = G \cos \alpha - f \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{r} - fG \sin \alpha,$$

где G – вес частицы материала; α – угловая координата частицы материала на криволинейной траектории; t – время.

В правой части данного уравнения содержится сумма трех сил:

- проекции веса на касательное направление;
- силы трения, вызванной центробежной силой;
- силы трения, вызванной нормальной проекцией веса.

Выразим скорость V через угловую скорость ω и радиус r , умножим обе части на слагаемое g/G и выразим производную по времени через производную по угловой координате

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\alpha \cdot d\omega}{dt \cdot d\alpha} = \omega \frac{d\omega}{d\alpha}.$$

Получившееся уравнение

$$\omega \frac{d\omega}{d\alpha} = \frac{g}{r} (\cos \alpha - f \cdot \sin \alpha) - f\omega^2$$

разделим на угловую скорость ω и обозначим $\phi(\alpha) = \frac{g}{r} (\cos \alpha - f \sin \alpha)$.

В результате получим уравнение

$$\omega' + f\omega = \phi(\alpha) \cdot \omega^{-1}.$$

Его решением является выражение

$$\frac{1}{2} \omega^2 \cdot e^{2f\alpha} + C = \int \Phi(\alpha) \cdot e^{2f\alpha} d\alpha.$$

После подстановки $\Phi(\alpha)$ правая часть интегрируется по частям

$$\int \frac{g}{r} \cdot \cos \alpha \cdot e^{2f\alpha} d\alpha - \int \frac{g}{r} f \sin \alpha \cdot e^{2f\alpha} d\alpha =$$

$$= \frac{g}{r} \cdot \frac{e^{2f\alpha}}{1+4f^2} [3f \cos \alpha + \sin \alpha (1-2f^2)] + C,$$

а в левой части сделаем подстановку $\omega = \frac{V}{r}$.

В получившемся уравнении

$$\begin{aligned} \frac{V^2}{2gr} e^{2f\alpha} + C = \\ = \frac{e^{2f\alpha}}{1+4f^2} [3f \cos \alpha + \sin \alpha (1-2f^2)] \end{aligned}$$

содержится константа интегрирования C , которая вычисляется из граничного условия

$$\begin{cases} \alpha = 0 \\ V = V_1 \end{cases}.$$

В результате применения этого условия

$$C = \frac{3f}{1+4f^2} - \frac{V_1^2}{2gr}.$$

После подстановки $\alpha = \frac{\pi}{2} - \gamma$ оконча-

тельно скорость частиц материала на выходе из криволинейного участка лотка составит

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gr}{1+4f^2} [3f \sin \gamma + \cos \gamma (1-2f^2)] - \left(\frac{3f}{1+4f^2} - \frac{V_1^2}{2gr} \right) \frac{2gr}{e^{2f\alpha}}}$$

Уравнение силового баланса для частицы материала в проекции на направление вектора скорости ее движения по наклонному участку лотка

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = G \sin \gamma - f \cdot G \cos \gamma.$$

Умножив обе части на дробь $\frac{g}{G}$, получаем величину ускорения частицы

$$\frac{dV}{dt} = g(\sin \gamma - f \cos \gamma) dt = \text{const}.$$

Изменение скорости при равноускоренном движении с ускорением a составит

$$\Delta V = \sqrt{2l_2 a}.$$

Тогда с учетом возможности наличия отрицательного ускорения скорость частицы в конце лотка

$$V_3 = V_2 + \text{sign}(a) \sqrt{2l_2 |a|},$$

где величина ускорения

$$a = g(\sin \gamma - f \cos \gamma).$$

Для расчета последнего участка траекто-

рии – свободного падения между концом лотка и конвейером – надо определить положение точки пересечения траектории падения с линией движения конвейера. Начало координат следует расположить в конце лотка. Ось Y направлена вниз, а ось X – вправо. Уравнение траектории падения частицы материала можно получить, если исключить переменную t (время) из двух уравнений движения – в проекции на горизонтальное и на вертикальное направления

$$\begin{cases} x = V_3 \cos \gamma \cdot t \\ y = V_3 \sin \gamma \cdot t + \frac{gt^2}{2} \end{cases} \Rightarrow y = x \cdot tg \gamma +$$
 (1)

$$+ \frac{g}{2V_3^2 \cos^2 \gamma} x^2.$$

Уравнение линии движения конвейера

$$y = b_0 + b_1 x,$$

где

$$b_0 = \frac{h}{\cos \gamma}; \quad b_1 = -tg \gamma.$$

После подстановки

$$y = \frac{h}{\cos \gamma} - tg \gamma \cdot x. \quad (2)$$

В результате решения системы уравнений (1) и (2) горизонтальная координата точки падения частиц материала на конвейер определится соотношением

$$x_m = \frac{-2tg \gamma + \sqrt{4tg^2 \gamma + 4 \frac{g}{2V_3^2 \cos^2 \gamma} \cdot \frac{h}{\cos \gamma}}}{2 \frac{g}{2V_3^2 \cos^2 \gamma}}.$$

В точке падения горизонтальная проекция вектора скорости

$$V_x = V_3 \cos \gamma,$$

время падения

$$t = \frac{x_m}{V_x} = \frac{x_m}{V_3 \cos \gamma},$$

вертикальная проекция вектора скорости

$$V_y = V_3 \sin \gamma + gt = V_3 \sin \gamma + \frac{gx_m}{V_3 \cos \gamma}.$$

Модуль вектора скорости в точке падения

$$V_4 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2},$$

касательная проекция на траекторию кон-

вейера скорости в точке падения

$$V_\tau = V_x \cos \beta - V_y \sin \beta,$$

нормальная проекция на траекторию конвейера скорости в точке падения

$$V_n = V_x \sin \beta + V_y \cos \beta.$$

4. Результаты и их анализ

Пример расчета по приведенным формулам выполнен в среде Excel для угла наклона конвейера $\beta = 45^\circ$. Результаты расчета проиллюстрированы графиками, представленными на рис. 2-6.

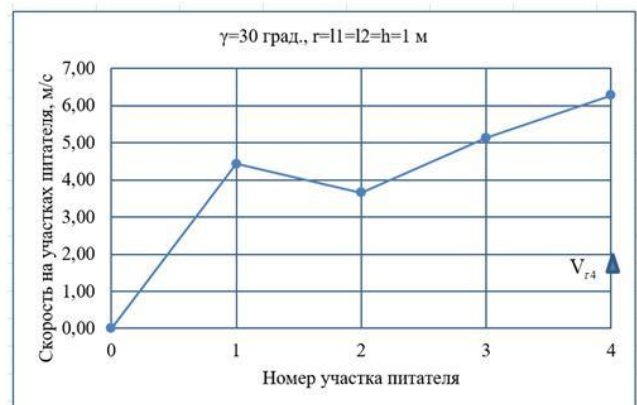


Рис. 2. Диаграмма скорости сыпучего материала (песок) на участках питателя ($V_{\tau 4}$ – касательная составляющая скорости в точке 4)

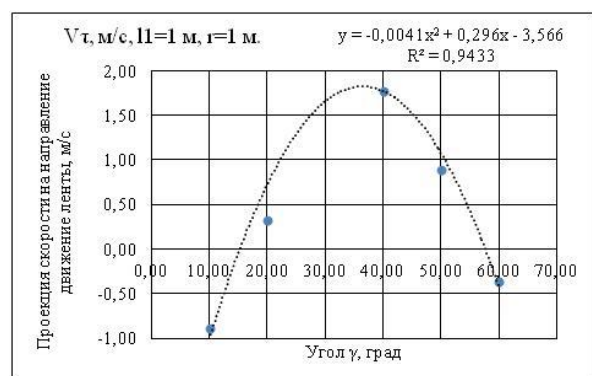


Рис. 3. Зависимость касательной составляющей скорости в точке 4 от угла наклона γ третьего участка питателя к горизонту

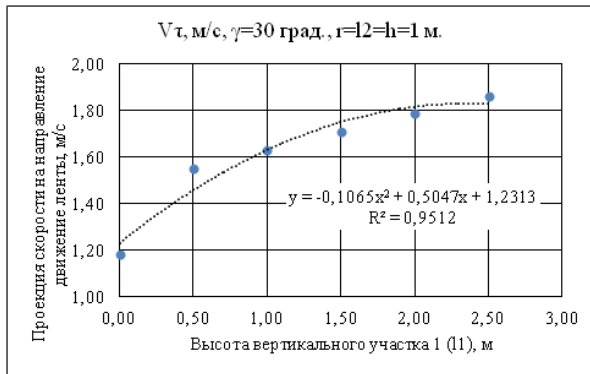


Рис. 4. Зависимость касательной составляющей скорости в точке 4 от высоты вертикального участка 1 питателя

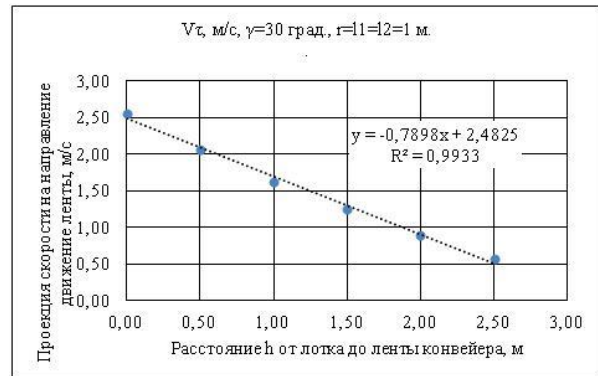


Рис. 6. Зависимость касательной составляющей скорости в точке 4 от расстояния h между питателем и лентой конвейера

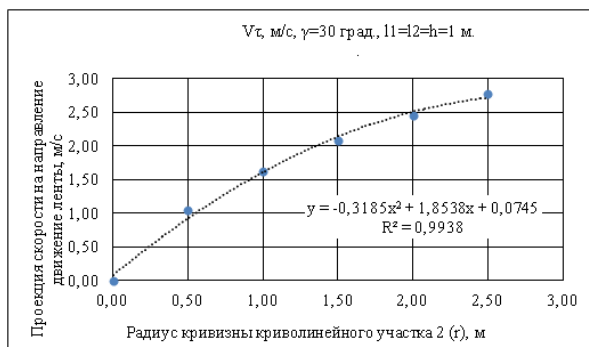


Рис. 5. Зависимость касательной составляющей скорости в точке 4 от радиуса кривизны второго участка питателя

5. Заключение

1. Получена математическая модель скорости движения сыпучего груза по участкам гравитационного питателя и выполнен пример расчета касательной составляющей скорости материала в точке контакта с лентой.

2. Установлены зависимости касательной составляющей скорости материала в точке контакта с лентой от геометрических параметров участков питателя.

3. Наиболее значимым фактором, влияющим на величину касательной составляющей скорости материала в точке контакта с лентой, является угол наклона γ третьего участка питателя к горизонту.

Список литературы

1. Баженов А.А. Разработка методики расчета крутонаклонных конвейеров с перегородками: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.05.04 / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург, 2012. 102 с.

2. Репин С.В. Методология совершенствования системы технической эксплуатации строительных машин: дисс. ... доктора техн. наук: 05.05.04 / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. - Санкт-Петербург, 2008. 450 с.

3. Конвейеры; виды конвейеров [Электронный ресурс]. Режим доступа:

References

1. Bazhenov A.A. *Razrabotka metodiki rascheta krutonaklonnykh konvejerov s peregorodkami* [Development of methodology for calculation of steeply inclined conveyors with baffles]. Diss. Cand. Sci. (Engineering). St. Petersburg, 2012. 102 p. (In Russian).

2. Repin S.V. *Metodologiya sovershenstvovaniya sistemy tekhnicheskoy ekspluatatsii stroitelnykh mashin* [Methodology of improving the system of technical operation of construction machinery]. Diss. Doc. Sci. (Engineering). St. Petersburg, 2008. 450 p. (In Russian).

3. Conveyors; types of conveyors [site]. Available at: <http://www.metaprom.ru/articles>

- <http://www.metaprom.ru/articles/a1653-konveier/> (дата обращения 28.07.2019).
4. Применение транспортирующих машин непрерывного действия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://works.doklad.ru/view/U-2xB1pXTDc.html> (дата обращения 25.07.2019).
5. Область применения ленточных конвейеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://stroy-technics.ru/article/oblast-primeneniya-lentochnykh-konveierov> (дата обращения 25.07.2019).
6. Касаткин А.А. Сравнительная оценка крутонаклонных ленточных конвейеров для горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. №9. С. 103-108. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-9-0-81-89>
7. Касаткин, А.А. Выбор основных параметров линейной части крутонаклонного конвейера с прижимной лентой для горных предприятий: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.05.06. М., 2009. 136 с.
8. Черненко В. Д. Расчет средств непрерывного транспорта. СПб.: Политехника, 2008. 386 с.
9. Черненко В.Д., Баженов А.А. Расчёт 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. 60-62.
10. Спиваковский А.О., Дьячков, В.К. Транспортирующие машины. М.: Машиностроение, 1987. 503 с.
- † /a1653-konveier/) (In Russian)
- † 4. Application of continuous transport machines-Summary [site]. Available at: <http://works.doklad.ru/view/U-2xB1pXTDc.html> (In Russian)
- † 5. Application area of belt conveyors [site]. Available at: <http://stroy-technics.ru/article/oblast-primeneniya-lentochnykh-konveierov> (In Russian)
- † 6. Kasatkin A.A. Comparative evaluation of steeply inclined belt conveyors for the mining industry. *Gornyy informatsionno-analiticheskiiy byulleten*, 2007, No.9, pp. 103-108. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-9-0-81-89> (In Russian).
- † 7. Kasatkin, A.A. Selection of the main parameters of the linear part of the steeply inclined conveyor with a clamping belt for mining enterprises. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow, 2009. 136 p. (In Russian).
- † 8. Chernenko V. D. Raschet sredstv nepre-rivnogo transporta [Calculation of means of continuous transport]. - SPb.: Politekhnik, 2008. 386 p. (In Russian).
- † 9. Chernenko V.D., Bazhenov A.A. Calculation on nonlinear theory of conveyor belts with transverse partitions. *Sovremennye problemy tekhnosfery i podgotovki nauchnikh kadrov [Modern problems of technosphere and scientific personnel training]. Proceedings of the III Int. seminar in Tabarka (Tunisia)*. Donetsk. 2011. pp. 60 - 62. (In Russian)
- † 10. Spivakovsky A.O., Dyachkov V.K. *Transportiruyushchie mashiny* [Transporting machines]. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 503 p. (In Russian).