Записки Санкт-Петербургского горного института им.Г.В.Плеханова.
Т. 138. СПб, 1993

УДК 622.467.0025.001.2

Ю.Д.ТАРАСОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕГО ГРУЗА ПО КРИВОЛИНЕЙНЫМ ПОВЕРХНОСТЯМ С ПОСТОЯННЫМ РАДИУСОМ КРИВИЗНЫ

Необходимость решения подобных задач возникает, в частности, при проектировании перегрузочных и загрузочных желобов и воронок с заданными конечной скоростью движения сыпучего груза и направлением вектора этой скорости, а также при проектировании узлов разгрузки транспортируемого груза через концевые (головные) барабаны ленточных конвейеров.

Решение первой задачи применительно к загрузочному устройству ленточного конвейера позволит передавать на конвейерную ленту подлежащий транспортированию груз со скоростью, максимально приближенной по величине и направлению к скорости движения конвейерной ленты, что будет способствовать повышению долговечности как самой ленты, так и опорных устройств ее грузонесущей ветви за счет уменьшения их износа, особенно при транспортировании конвейером тяжелых, крупнокусковых и абразивных грузов.

Решение второй задачи обеспечит точный расчет траектории потока разгружаемого через концевой барабан транспортируемого груза и правильный выбор параметров разгрузочной воронки: размеров воронки и зоны футеровки, места установки рабочего органа пробоотборника и т.д.

В статье показано, что закономерности движения груза по неподвижному криволинейному желобу вогнутого профиля и по криволинейной (выпуклой) поверхности ленты в зоне огибания ею концевого барабана конвейера (во втором случае при соответствующих, оговоренных далее условиях) описываются одними и теми же уравнениями, и загрузочные и разгрузочные устройства ленточных конвейеров можно рассчитывать по практически одинаковым методикам.

На частицу груза, движущуюся по криволинейному желобу вогнутого профиля (рис.I), действуют сила тяжести G, центробежная сила P и сила трения F. Дифференциальное уравнение движения этой частицы

$$dv/dt = g(\sin\alpha - f\cos\alpha) - fv^2R^{-1},$$

где v и dv – соответственно мгновенная скорость движения груза на криволинейном участке желоба и ее приращение, м/с; dt – приращение координаты времени, с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; α – мгнове

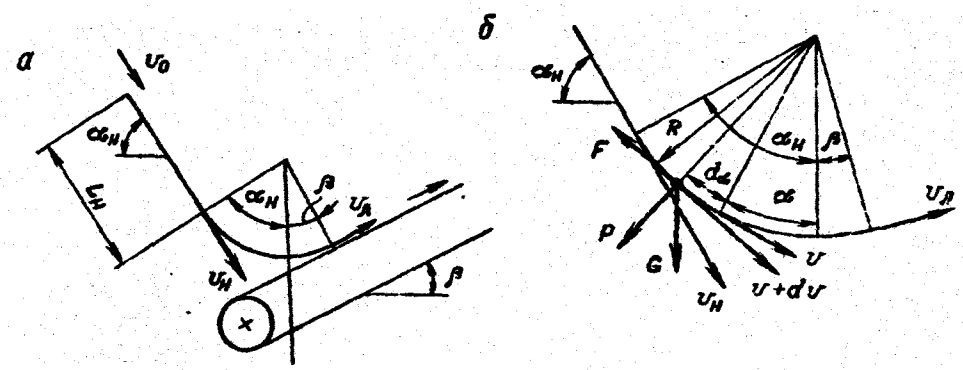


Рис.1. Схема загрузки ленточного конвейера с криволинейным участком желоба (а) и расчетная схема к выбору параметров криволинейного участка желоба (б)

ная угловая координата, определяющая положение груза на криволинейном участке желоба и измеренная от вертикали, проходящей через центр кривизны желоба, рад; f – коэффициент трения груза о днище криволинейного участка желоба; R – радиус кривизны этого участка, м.

Заменив независимую переменную t на α в соответствии с выражением $dt = R\,d\alpha/v$ (здесь $d\alpha$ – приращение мгновенной угловой координаты α, рад), представим уравнение (I) в виде

$$dv/d\alpha = gRv^{-1}(\sin\alpha - f\cos\alpha) - fv \qquad (2)$$

или после замены переменной

$$d\alpha/dv = v\left[gR(\sin\alpha - f\cos\alpha) - fv^2\right]^{-1}. \qquad (3)$$

На частицу груза, находящуюся на огибающей концевой барабан конвейерной ленте (в зоне разгрузки транспортируемого груза с конвейера), также действуют сила тяжести G и центробежная сила P (рис.2). Но движение (скольжение) частицы относительно выпуклой поверхности конвейерной ленты реализуется только в том случае, если выполняется условие

$$\arccos v_л^2(gR)^{-1} > \operatorname{arctg} f = \rho\,, \qquad (4)$$

где $v_л$ – скорость движения конвейерной ленты, м/с; R – удаление центра массы частицы груза от оси концевого барабана конвейера, т.е. приведенный радиус концевого барабана, м; f – коэффициент трения (в движении) груза о конвейерную ленту; ρ – угол трения, соответствующий коэффициенту трения f, рад.

При выполнении условия (4) на частицу груза после достижения ею совместно с движущейся конвейерной лентой угловой координаты ρ начнет дейст-

вовать, помимо сил G и P, также сила трения F, которая, будучи реактивной, возникнет с началом скольжения частицы груза по выпуклой поверхности ленты.

Дифференциальное уравнение движения частицы груза, начиная с этого момента и до момента ее отрыва от ленты, имеет вид

$$dv/dt = g(\sin\alpha - f\cos\alpha) + f(v_л + v)^2 R^{-1}, \qquad (5)$$

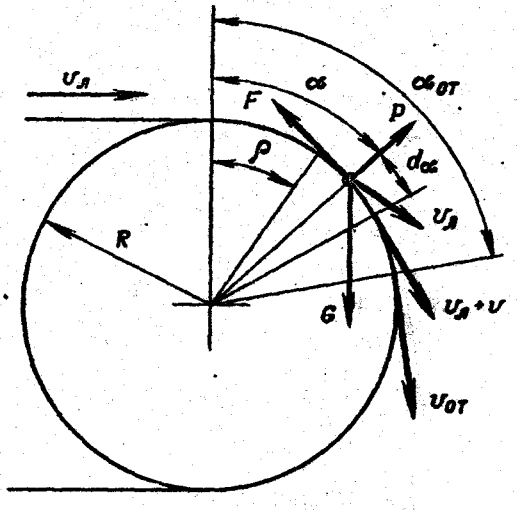


Рис.2. Расчетная схема к определению параметров разгрузки сыпучего груза через концевой барабан ленточного конвейера

где v – мгновенное значение относительной скорости движения частицы по конвейерной ленте, м/с; $v_л$ – окружная и одновременно переносная скорость движения ленты, м/с; $v_л + v$ – абсолютная скорость движения частицы груза в принятой неподвижной системе отсчета, м/с.

Принимая во внимание, что $dt = R\,d\alpha\,(v_л + v)^{-1}$, получим дифференциальное уравнение движения частицы груза относительно новой независимой переменной α – угловой координаты этой частицы, измеренной относительно вертикали, проходящей через центр концевого барабана конвейера, в радианах:

$$dv/d\alpha = gR(v_л + v)^{-1}(\sin\alpha - f\cos\alpha) + f(v_л + v). \qquad (6)$$

Уравнения (2) и (6) идентичны, так как это дифференциальные уравнения первого порядка с разделяемыми переменными. Уравнения могут быть разрешены с использованием одного и того же метода, например, как решение задачи Коши методом Эйлера по заданной производной: $dv/d\alpha$ для уравнений (2) и (6) или $d\alpha/dv$ для уравнения (3).

Используя полученные уравнения и известный метод их решения, нетрудно оптимизировать параметры загрузочного устройства и вычислить уточненную координату точки отрыва груза от ленты и скорость груза в момент отрыва с учетом предварительного относительного скольжения груза по ленте.

При заданных скорости движения конвейерной ленты $v_л$ и угле наклона конвейера β, радиусе кривизны криволинейного участка желоба R и угле наклона прямолинейного участка желоба $\alpha_н$ (см. рис.1) можно найти потребную скорость движения груза $v_н$ при его входе на криволинейный участок желоб

Для определения $v_н$ используются рекуррентные формулы, полученные из уравнения (2):

$$v_{i+1} = v_i - \Delta\alpha\left[gRv_i^{-1}(\sin\alpha_i - f\cos\alpha_i) - fv_i\right]; \qquad (7)$$
$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \Delta\alpha,$$

где v_i – i-е значение скорости движения груза по криволинейному участку желоба, начиная с точки разгрузки в сторону, противоположную направлению движения груза, м/с; α_i – i-е значение угловой координаты, соответствующее скорости v_i, рад; $\Delta\alpha$ – шаг вычислений, определяемый заданной точностью расчетов, рад.

При $i = 0$ $v_i = v_в$ и $\alpha_i = \beta$, причем знак при параметре β выбирают в зависимости от направления транспортирования груза конвейером: при транспортировании груза вверх принимают знак плюс, а при транспортировании вниз – минус. При горизонтальной установке конвейера (в зоне подачи на него груза) $\beta = 0$.

Вычисления по формулам (7) последовательно выполняют до совпадения с заданной точностью величин α_{i+1} и $\alpha_н$. Последнему значению α_{i+1} соответствует потребная скорость $v_н$ движения груза при его входе на криволинейный участок желоба. По найденному значению скорости $v_н$ по известной формуле может быть подсчитана длина прямолинейного участка желоба, необходимая для разгона груза до скорости $v_н$:

$$L_п = (v_н^2 - v_0^2)\left[(2g(\sin\alpha_н - f\cos\alpha_н)\right]^{-1},$$

где v_0 – начальная скорость движения груза, т.е. скорость при его входе на прямолинейный участок желоба, м/с.

Если задана скорость движения груза $v_н$ при его входе на криволинейный участок желоба, то угол наклона прямолинейного участка желоба $\alpha_н$ находят по рекуррентным формулам, полученным из уравнения (3):

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i - \Delta v\, v_i\left[gR(\sin\alpha_i - f\cos\alpha_i) - fv_i^2\right]^{-1}; \qquad (8)$$
$$v_{i+1} = v_i + \Delta v.$$

Вычисления по формулам (8) последовательно выполняют до совпадения с заданной точностью величин v_{i+1} и $v_н$. Последнему значению v_{i+1} соответствует потребний угол наклона прямолинейного участка желоба $\alpha_н$.

Анализ изменения скорости движения груза по длине желоба при различных соотношениях угла наклона его прямолинейной части и угла трения (рис.3) показывает, что при углах наклона, бóльших угла трения, скорость монотонно уменьшается, причем замедление резко возрастает на криволинейной части желоба. При углах наклона, бóльших угла трения, скорость движения груза имеет максимум в точке с угловой координатой $\alpha = \alpha_н - \rho$ (см. рис.I,б). Скорость v_{max} $(v_{max} > v_н)$ определяют по рекуррентным формулам (7) до совпадения с заданной точностью величины α_{i+1} со значени-

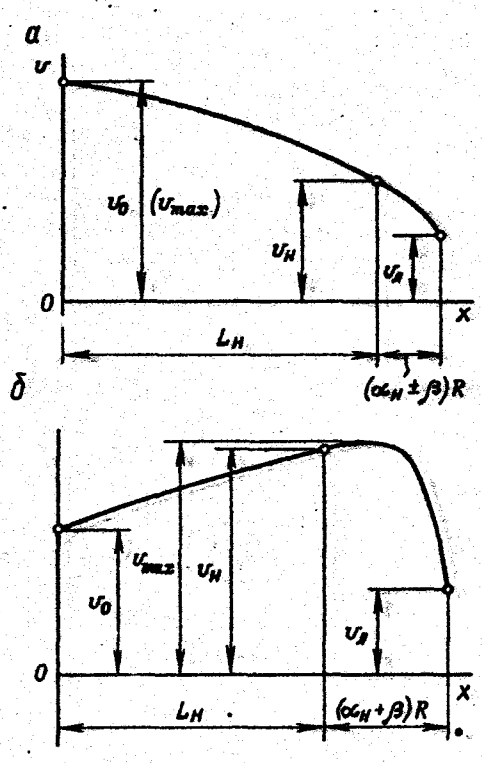


Рис.3. Изменение скорости движения груза по длине загрузочного желоба при $\alpha_н < \rho$ (а) и $\alpha_н > \rho$ (б)

ем угловой координаты $\alpha = \alpha_н - \rho$. Этому значению α_{i+1} и будет соответствовать скорость движения груза $v_{i+1} \cong v_{max}$. На графике функции $v(x)$ (см. рис.3) максимальное значение скорости v_{max} движения груза соответствует линейной координате $x = L + (\alpha_н - \rho)R$.

При дальнейшем движении груза по криволинейному участку желоба скорость v резко снижается до значения $v_л$ на срезе желоба.

Параметры разгрузки груза через концевой барабан ленточного конвейера вычисляют по рекуррентным формулам, полученным из уравнения (6):

$$\begin{aligned} v_{i+1} &= v_i + \Delta\alpha \left[(v_л + v_i) f + \right. \\ &\left. + gR(\sin\alpha_i - f\cos\alpha_i) \times \right. \\ &\left. \times (v_л - v_i)^{-1} \right]; \\ \alpha_{i+1} &= \alpha_i + \Delta\alpha, \end{aligned} \qquad (9)$$

где v_i – i-е приближение относительной скорости v к скорости $v_{от} - v_л$, м/с; $v_{от}$ – скорость движения частицы груза в момент ее отрыва от ленты, м/с; α_i – i-е приближение $\alpha_{от}$, рад; $\alpha_{от}$ – угловая координата точки отрыва груза от ленты, рад.

При $i = 0$ $v_i = 0$, $\alpha_i = \rho$.

Вычисления по формулам (9) последовательно выполняют до совпадения с заданной точностью величин $v_{i+1} + v_л$ и $v_{от}$, которая последовательно подсчитывается по формуле

$$v_{от} = \left| \sqrt{gR\cos\alpha_{от}} \right|,$$

т.е. вычисления производят до совпадения величин $v_{i+1} + v_л$ и $\left| \sqrt{gR\cos\alpha_{i+1}} \right|$ с шагом итерации $\Delta\alpha$.

Найденные значения $v_{от}$ и $\alpha_{от}$ являются искомыми.

Графики зависимости скорости движения груза в момент его отрыва от ленты и угловой координаты точки отрыва от коэффициента трения груза о

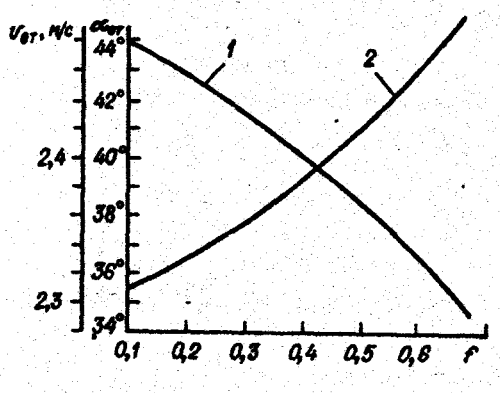


Рис.4. Зависимость скорости отрыва груза на концевом барабане (1) и угловой координаты точки отрыва (2) от коэффициента трения груза о конвейерную ленту при R = 0,75 м и $v_л$ = 2 м/с

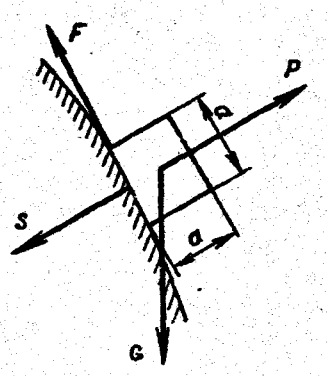


Рис.5. Расчетная схема к определению параметров движения груза при транспортировании липких грузов

конвейерную ленту (рис.4) показывают, что с увеличением коэффициента трения скорость отрыва уменьшается, а угловая координата точки отрыва увеличивается.

Установленные закономерности характерны для грузов, не склонных к прилипанию, поэтому их адгезией к рабочим поверхностям загрузочного желоба и конвейерной ленты можно пренебречь. При транспортировании связных грузов с заметными адгезионными и когезионными свойствами исходные уравнения для выбора параметров загрузочных и разгрузочных устройств должны быть скорректированы. В соответствии с расчетной схемой (рис.5) на частицу груза, движущуюся по криволинейной траектории (вогнутой или выпуклой), помимо силы веса частицы G, сил центробежной P и трения F действует сила S, которая в зависимости от соотношения значений адгезионной $\sigma_А$ (к ленте) или когезионной $\sigma_К$ (между частицами груза) прочности прилипания будет иметь соответствующую природу. При $\sigma_А > \sigma_К$ сила $S = \alpha^2 \sigma_А$, а при $\sigma_А < \sigma_К$ $S = \alpha^2 \sigma_К$, где α – расчетный размер частиц транспортируемого груза, м; $\sigma_А$ и $\sigma_К$ – адгезионная и когезионная прочность, Па; S – сила прилипания частицы к ленте или к другой частице, Н.

Для рассматриваемого случая исходные уравнения, описывающие соответственно движение груза по криволинейному желобу и ленте на концевом барабане конвейера, имеют вид

$$dv/d\alpha = gRv^{-1}\left[\sin\alpha - f\cos\alpha - \sigma f(\alpha g\gamma)^{-1}\right] - fv;$$

$$dv/d\alpha = gR(v_л + v)^{-1}\left[\sin\alpha - f\cos\alpha - \sigma f(\alpha g\gamma)^{-1}\right] + f(v_л + v), \qquad (10)$$

где α и γ – соответственно расчетный размер частицы груза и ее плотность, м и кг/м^3; f – приведенный коэффициент трения груза по рабочей поверхности с учетом влияния адгезионных (когезионных) связей частиц;

σ – адгезионная ($\sigma = \sigma_A$) или когезионная ($\sigma = \sigma_K$) прочность прилипания частиц груза, Па.

В первом случае при разгрузке груза через концевой барабан ленточного конвейера частицы груза будут отрываться непосредственно от поверхности ленты, а во втором разделение произойдет по толще самого груза и часть транспортируемого груза останется на поверхности ленты конвейера, формируя загрязняющий ленту слой. Из уравнений (10) следует, что поведение налипающих грузов при их транспортировании соответствует поведению грузов с увеличенными значениями коэффициентов трения. Кроме того, подтверждается тот известный факт, что при одинаковых физических свойствах более мелкие частицы груза более склонны к налипанию, чем крупные.