

## ЭЛЕМЕНТЫ РАСЧЕТА КОНТЕЙНЕРНОГО ПНЕВМОТРАНСПОРТА

С. Я. Давыдов, В. Я. Потапов, П. А. Костюк

Представлена схема для определения количества контейнеров в системе контейнерного пневмотранспорта (КПТ). Даны схемы движения частиц материала для определения угловой скорости контейнера. Дана формула определения конечной скорости состава контейнеров в трубопроводе при их безостановочном движении в системе КПТ.

**Ключевые слова:** контейнерный пневмотранспорт; длина участка разгрузки, угловая скорость; процесс высыпания; сыпучий материал.

При проектировании контейнерного пневмотранспорта (КПТ) важным моментом является установление взаимозависимости между скоростями движения контейнеров в системе пневмотранспорта в процессе торможения в трубопроводе и на открытом участке разгрузки. При этом конечная скорость торможения контейнеров в трубопроводе зависит функционально от геометрических и динамических параметров тормозного участка. Рассмотрим влияние этих параметров на примере расчета элементов конструкции системы КПТ [1–5].

Величина максимального диаметра  $d_k$  контейнера в зависимости от внутреннего диаметра  $D_T$  определяется из соотношения  $d_k \approx 0,7D_T$ .

Из рис. 1 находим площадь сечения груза  $F = 0,63 d_k^2$ .

С учетом соотношения  $d_k \approx 0,7D_T$  имеем

$$F = 0,31 D_T^2.$$

Длина цилиндрической части контейнера принимается равной

$$l_k = (2,5 \dots 3,5) d_k.$$

В зависимости от диаметра трубопровода длина контейнера

$$l_k \approx 2,15 D_T.$$

Средняя длина контейнера по сцепкам определяется из соотношения:

$$l_c = 2,35 D_T.$$

Длина поезда

$$l_{\Pi} = 2,35 D_T n_k,$$

где  $n_k$  – количество контейнеров в поезде,  $n_k = 4 \dots 15$ .

С учетом свободного перемещения по криволинейному трубопроводу его минимальный радиус кривизны будет равен

$$R_T = 0,5 l_0^2 / (D_B - d_k),$$

где  $l_0$  – база контейнера.

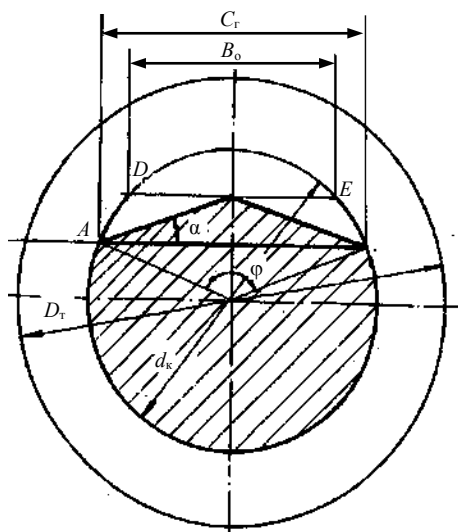


Рис. 1. Поперечное сечение груза в контейнере:

$d$  – диаметр контейнера;  $D_T$  – внутренний диаметр трубопровода;  $C_r$  – ширина, занимаемая грузом;  $B_0$  – ширина загрузочного окна;  $\rho_r$  – угол естественного откоса груза

Как известно, для КПТ наиболее выгодным сечением контейнера является круг.

Линейные размеры контейнеров для выбранного ряда диаметров трубопровода определяются по зависимости:

$$a_m = \lambda_k a_b,$$

где  $a_m$  – величина параметра варианта;  $\lambda_k$  – масштабный коэффициент;  $a_b$  – величина параметра базы.

В зависимости от диаметра трубопровода погонная масса контейнерного состава определяется по следующей зависимости:

$$q_{\Pi} = 259D^{1,608}.$$

Погонная масса груза в контейнерном составе с учетом коэффициента заполнения  $K_3 = 0,8$  составляет

$$q_r = 0,22D^2\rho_r,$$

где  $\rho_r$  – плотность транспортируемого груза, кг/м<sup>3</sup>.

Для КПП с непрерывным движением контейнеров на участках загрузки и разгрузки должно соблюдаться условие равенства времени загрузки  $t_3$  или разгрузки  $t_p$  и времени  $t_{\Pi}$  прохождения составами контейнеров среднего интервала  $L'$  (рис. 2).

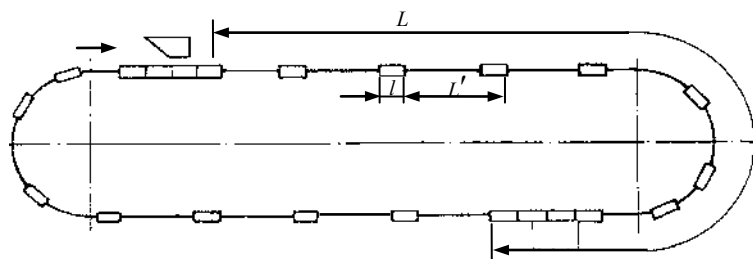


Рис. 2. Схема для определения количества контейнеров в системе КПП

Запишем

$$t_{\Pi} = 0,5(t_3 + t_p); \text{ при } t_3 = t_p \text{ } t_3 = t_{\Pi}. \quad (1)$$

$$t_3 = l/v_3, \quad (2)$$

$$t_{\Pi} = L'/v_{\Pi}, \quad (3)$$

где  $v_3$  – скорость движения контейнеров на участках загрузки;  $v_{\Pi}$  – скорость движения контейнеров в трубопроводе.

При наличии  $n_{\Pi}$  поездов на линии произведение среднего интервала  $L'$  между одноименными точками поездов на  $n_{\Pi}$  дает расстояние транспортирования  $L$  без учета длины участков загрузки и разгрузки

$$L'n_{\Pi} = L - n_3 l_k, \quad (4)$$

где  $n_3$  – количество поездов на участке загрузки или разгрузки.

Из равенства (4) находим

$$L' = (L - n_3 l_k)/n_{\Pi}.$$

С учетом непрерывности загрузки

$$v_3 = Q/(3,6q)$$

и равенств (1)–(3) можно записать:

$$\frac{3,6l_k q}{Q} = \frac{L - n_3 l_k}{n_{\Pi} v_{\Pi}},$$

где  $Q$  – производительность загрузочного агрегата;  $q$  – погонная масса транспортируемого груза.

В результате число поездов на линейной части трубопровода в грузовом или порожнем направлении составит

$$n_{\Pi} = \frac{Q(L - n_3 l_k)}{3,6q l_k v_{\Pi}}.$$

Количество поездов, необходимое для обеспечения перевозки заданного грузопотока

$$n_o = 2n_{\Pi} + 2n_3 + n_{\text{рез}},$$

где  $n_{рез}$  – резервное количество поездов, учитывающее их замену в период ремонта, принимается в размере 10 % от расчетного количества поездов.

Для контейнера, разгружаемого путем поворота вокруг оси трубопровода, рассмотрим основные теоретические положения по разгрузке ковшей элеваторов. Особенность состоит в том, что геометрическая ось вращения контейнеров совпадает с их осью и находится в плоскости сечения транспортируемого груза.

Равнодействующая  $R$  (рис. 3) силы тяжести  $mg$  и центробежной силы  $F_{ц}$  для любой из частиц, находящихся в контейнере, пересекает его вертикальный диаметр в одной и той же определенной для данного момента точке  $P$ , называемой полюсом, которая находится на расстоянии  $h$  от оси контейнера,

$$h = g\omega^{-2}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – угловая скорость контейнера.

В процессе переворота контейнера часть материала в каждый определенный момент остается неподвижной. Для анализа этого процесса особое значение имеет определение границы между подвижной и относительно неподвижной частями материала, т. е. поверхности скольжения или поверхности естественного откоса.

Согласно теории разгрузки сыпучих материалов, граница неподвижного слоя относительно вращающейся емкости располагается по криволинейной поверхности, очерченной логарифмической спиралью, проходящей через разгрузочную кромку. Уравнение спирали в полярных координатах

$$C = a \exp(\theta \tan \alpha),$$

где  $C$  – расстояние от полюса  $P$  до точки спирали (рис. 3);  $a$  – база спирали;  $\alpha$  – угол естественного откоса материала;  $\theta$

– угол между лучом  $M_0P$  и базой  $a$ .

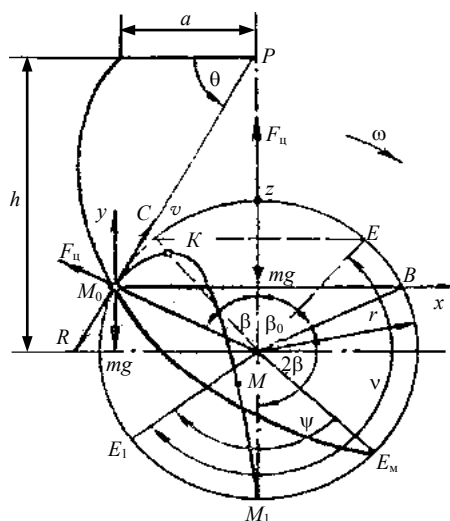


Рис.3. Движение частиц материала в контейнере

Логарифмическую спираль для данного случая называют кривой естественного откоса, а поверхность, образованную такой кривой, – поверхностью естественного откоса. Частицы материала, расположенные выше поверхности естественного откоса, проведенной через кромку высыпания груза, будут находиться в состоянии движения, а расположенные ниже этой поверхности – в состоянии покоя.

В процессе разгрузки большая масса частиц отрывается от нижележащих слоев материала, не дойдя до разгрузочной кромки. Движение частиц материала приведено на рис. 3. Частицы, пришедшие в движение относительно контейнера, или скользят по поверхности естественного откоса  $M_0E_m$  вниз, или отрываются от этой поверхности и двигаются далее по параболической траектории  $M_0KM_1$ . Это зависит от угловой скорости  $\omega$  контейнера, положения частиц в контейнере, его радиуса и свойств материала.

Для полной разгрузки угловая скорость контейнера должна быть такой, чтобы полюс  $P$  находился вне диаметра контейнера. В противном случае частицы материала, прижатые к внутренней стенке в верхнем положении  $Z$ , не смогут

оторваться от нее (так как  $F_{ц} > mg$ ) и не покинут пределов контейнера. Угловая скорость вращения контейнера, при которой  $F_{ц} = mg$ , называется критической:

$$\omega_{кр} = g^{0,5} r^{-0,5}, \quad (6)$$

где  $r$  – радиус контейнера.

Сравнив  $r > g\omega^{-2}$  с формулой (5), имеем  $h > r$ .

Угловая скорость контейнера, при которой происходит переход частиц груза с круговой траектории на параболическую при угле отрыва  $\beta$ , определяется по формуле

$$\omega = g^{0,5} r^{-0,5} \cos^{0,5} \beta. \quad (7)$$

С учетом выражения (6):

$$\omega = \omega g^{0,5} r^{-0,5} \cos^{0,5} \beta.$$

Координаты вершины параболы (точка  $K$  на рис. 3) и точки ее пересечения с окружностью контейнера (точка  $M_1$ ) определяются по уравнениям:

$$\begin{aligned} x_k &= r \sin \beta \cos^2 \beta; \quad y_k = 0,5 \sin^2 \beta \cos \beta; \\ x_{M_1} &= 4r \sin \beta \cos^2 \beta; \quad y_{M_1} = -4r \sin^2 \beta \cos \beta. \end{aligned}$$

Из этих уравнений имеем

$$x_k = 0,25x_{M_1}; \quad y_k = 0,125y_{M_1}.$$

Из рис. 3

$$\operatorname{tg} \angle BM_0 M_1 = y_{M_1} x_{M_1}^{-1} = -\operatorname{tg} \beta,$$

т. е. вписанный угол, опирающийся на дугу  $BM_1$ , по абсолютной величине равен  $\beta$ , сама дуга равна  $2\beta$ , а дуга  $M_0 BM_1$  равна  $4\beta$ .

Время полета частицы по параболе определяется из уравнения движения частицы  $M$ :

$$x = vt \cos \beta.$$

Отсюда время полета частицы по параболе

$$t = x / (v \cos \beta).$$

Угол поворота контейнера за это время

$$\Psi = \omega t.$$

Из формулы (7) видна взаимосвязь угловой скорости и радиуса (диаметра) контейнера. В свою очередь, внутренний диаметр контейнера связан с диаметром трубопровода  $D$  соотношением

$$d = 0,7D.$$

Это дает возможность определить угловую скорость контейнера для любого диаметра трубопровода при известном значении угла  $\beta$  перехода частиц материала с круговой на параболическую траекторию их движения. Значения углов  $\beta$  определяются из соотношения

$$\cos \beta = \omega_{\max}^2 \omega_{кр}^{-2},$$

где  $\omega_{\max}$  – максимальная угловая скорость контейнера, при которой начинают оставаться частицы груза.

Значения полюсного расстояния  $C = M_{01}P$  при конкретном транспортируемом материале находим по известной формуле (рис. 4)

$$C = [r^2 \sin^2 \beta + (h - r \cos \beta)^2]^{0,5}.$$

В случае расположения частицы  $M$  в точке  $M_1$  ниже точки  $D_1$  (частица в точке  $M_1$  успеет вылететь из контейнера) нужно несколько уменьшить значение угла отрыва  $\beta_2$  (рис. 4, а). Если точка окажется выше, то значение  $\beta_2$  необходимо увеличить и найти положение точек  $M_2$  и  $D_2$  в той же последовательности, что и ранее

для точек  $M_1$  и  $D_1$ . При этом необходимо добиться такого значения угла  $\beta_2$ , при котором точка  $M_2$  будет находиться на дуге окружности несколько выше  $D_2$  (рис. 4, б);  
 Значение приращения угловой скорости

сти  $\Delta\omega$  находим интерполированием. Из соотношения (рис. 5)

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{S_1 + S_2} = \frac{\Delta\omega}{S_1}$$

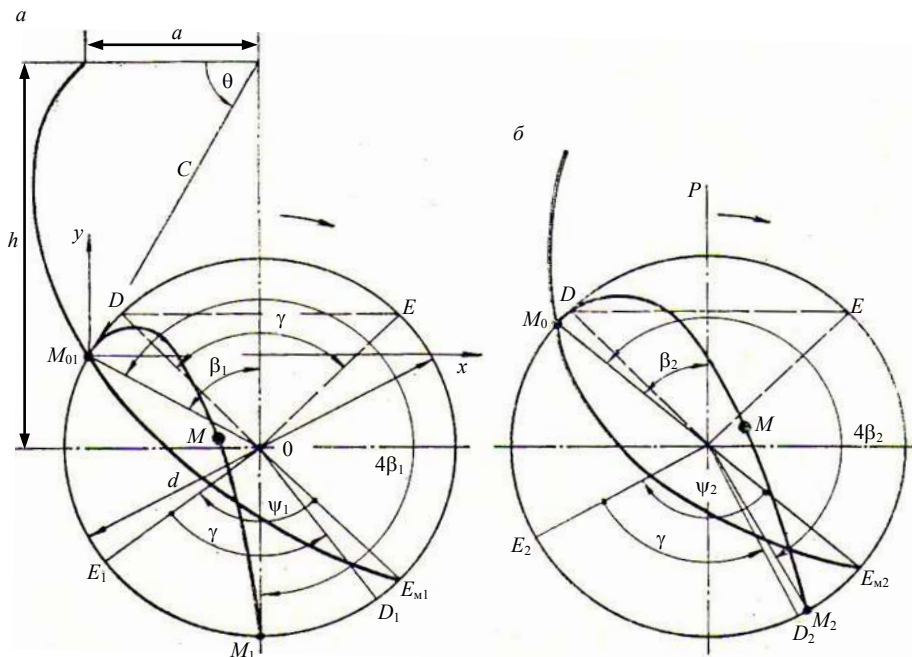


Рис. 4. Схемы движения частицы  $M$  для определения угловой скорости контейнера:  
 а – при  $\omega = 6,9$  рад/с; б – при  $\omega = 7,817$  рад/с

находим

$$\Delta\omega = \frac{\omega_2 - \omega_1}{S_1 + S_2} S_1, \quad (8)$$

контейнера при условии полной разгрузки груза составит

$$\omega_{\max} = 6,9 + \Delta\omega.$$

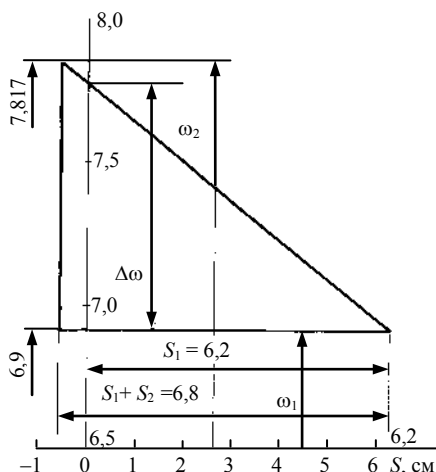


Рис. 5. Иллюстрация к определению приращения угловой скорости  $\Delta\omega$  контейнера при его полной разгрузке

где  $S_1 - M_1 \sim D_1$  (см. рис. 4, а);  $S_2 - M_2 \sim D_2$  (см. рис. 4, б). Максимальная угловая скорость

После определения по зависимости (8)  $\Delta\omega = 0,836$  рад/с находим  $\omega_{\max} = 7,736$  рад/с.

В качестве примера определялась угловая скорость контейнера с внутренним диаметром 200 мм и разгрузочным окном в поперечном сечении, образующим центральный угол  $\gamma = 90^\circ$ . Угол естественного откоса груза  $\alpha = 31^\circ 30'$ .

По приведенным формулам определялись параметры процесса высыпания груза из контейнеров в зависимости от диаметра трубопровода.

Результаты построения на рис. 6 указывают на то, что частицы разгружаемого насыпного груза у всех рассматриваемых

диаметров контейнеров попадают на противоположную кромку их разгрузочных отверстий, общей линией которых является  $OM_1$ .

Следовательно, при максимальном значении угловой скорости всех типоразмеров угол  $\beta$  остается постоянным. Отсюда следует, что максимальный угол поворота контейнера  $v_{\max}$  в момент вылета последней частицы для всех ее диаметров при неизменной максимальной угловой скорости остается неизменным и равным, град:

$$v_{\max} = 3\beta + 0,5\gamma = 198,3,$$

где  $\gamma$  – центральный угол разгрузочного окна  $DOE$  (рис. 4).

Установлено, что частицы насыпного груза, пришедшие в движение относительно контейнера, скользят по поверхности естественного откоса вниз и двигаются по параболической траектории как частицы, брошенные со скоростью под некоторым углом к горизонту.

Таким образом, ограничивающим параметром пропускной способности системы КПТ является скорость движения контейнеров на участке разгрузки, зависящая от угловой скорости.

После преобразования формулы определения длины разгрузочного участка [5]

$$l_p = \pi v_k (v/\omega_{\text{тр}} + 57,3t_p)/180,$$

где  $v_k$  – скорость движения контейнера на участке разгрузки по винтовой линии, м/с;  $v$  – угол поворота контейнера в момент вылета из него последней частицы материала, град;  $\omega_{\text{тр}}$  – угловая скорость контейнера при разгрузке, рад/с;  $t_p$  – время разгрузки контейнера.

Получим скорость движения контейнеров при разгрузке по винтовой линии

$$v_k = 180l_p / [\pi (v/\omega_{\text{тр}} + 57,3t_p)].$$

Из формулы определения пути торможения состава контейнеров в пневмобуфере при негерметичности уплотнений [4]

$$L_t = \frac{0,5m(v^2 - v_{\text{к.к}}^2)}{\Delta PS + F_{\text{тр}} + ma} \left[ 1 + \frac{(\Delta PS + F_{\text{тр}} + ma)\pi l RT \Delta V_{\text{ут}}}{4\text{Re}v^5 D^5 \rho + (\Delta PS + F_{\text{тр}} + ma)\pi l RT \Delta V_{\text{ут}}} \right] - \frac{4\text{Re}v^{10} D^6 \rho^3}{(\Delta PS + F_{\text{тр}} + ma) RT \pi^2 t^2 \lambda k \delta l}$$

имеем конечную скорость состава контейнеров в пневмобуфере при их безостановочном движении в системе контейнерного пневмотранспорта

$$v_{\text{к.к}} = \sqrt{v^2 - \frac{(\Delta PS + F_{\text{тр}} + ma) \left[ L_t + \frac{4\text{Re}v^{10} D^6 \rho^3}{(\Delta PS + F_{\text{тр}} + ma) RT \pi^2 t^2 \lambda k \delta l} \right]}{0,5m \left( 1 + \frac{(\Delta PS + F_{\text{тр}} + ma)\pi l RT \Delta V_{\text{ут}}}{4\text{Re}v^5 D^5 \rho + (\Delta PS + F_{\text{тр}} + ma)\pi l RT \Delta V_{\text{ут}}} \right)}}$$

где  $v$  – скорость движения контейнеров в транспортном трубопроводе, м/с;  $m$  – масса контейнеров, кг;  $\Delta P$  – перепад давления на уплотнениях контейнеров, Па;  $S$  – площадь сечения трубопровода, м<sup>2</sup>;  $F_{\text{тр}}$  – сила трения, Н;  $a$  – замедление контейнера, м/с<sup>2</sup>;  $l$  – длина контейнеров, м;  $R$  – газовая постоянная,  $R = 287$  Дж/(кг × К);  $T$  – начальная абсолютная температура воздуха в трубопроводе, К;  $\Delta V_{\text{ут}}$  – утечка воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса;  $D$  – диаметр манжеты, м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – начальная температура воздуха в трубопроводе, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности трубы, Вт/(м × К);  $k$  – коэффициент теплопередачи (теплообмена) для трубы, Вт/(м<sup>2</sup> × К);  $\delta$  – толщина стенки трубы, м.

Установлено, что частицы насыпного груза, пришедшие в движение относительно контейнера, скользят по поверхности естественного откоса вниз и двигаются по параболической траектории, как частицы, брошенные со скоростью под некоторым углом к горизонту.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Давыдов С.Я., Мальцев А.М. Контейнерный пневмотранспорт и его использование для перемещения насыпных грузов. М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1981. 48 с.
2. Давыдов С. Я. Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: Исследование, разработка, производство. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2007. 317 с.
3. Контейнерный пневмотранспорт с повышенной пропускной способностью / С. Я. Давыдов [и др.] // Новые огнеупоры. 2005. № 7. С. 17–21.
4. Конструкторская доработка поточной системы контейнерного пневмотранспорта/ С. Я. Давыдов [и др.] // Новые огнеупоры. 2010. № 5. С. 15–20.
5. Давыдов С.Я., Кожушко Г.Г., Сычев С.Н. Экспериментальные исследования процесса разгрузки сыпучего материала из вращающегося контейнера контейнерного пневмотранспорта // Новые огнеупоры. 2011. № 2. С. 9–14.

Поступила в редакцию 3 июня 2103 г.

**Давыдов Станислав Яковлевич** – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: davidovtrans@mail.ru

**Потапов Валентин Яковлевич** – доктор технических наук, доцент кафедры горной механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail:

**Костюк Петр Андреевич** – студент 3 курса. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: kostyukpetr@bk.ru