

Д. т. н. С. Я. Давыдов¹, д. т. н. Н. П. Косырев¹, д. т. н. Н. Г. Валиев¹,
к. т. н. Д. И. Симисинов¹, к. иск. В. А. Курочкин², А. Е. Замураев³

¹ ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

² Уральская государственная архитектурно-художественная академия,
г. Екатеринбург, Россия

³ ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 621.867.87

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗГРУЗКИ КОНТЕЙНЕРОВ КОНТЕЙНЕРНОГО ПНЕВМОТРАНСПОРТА СЕГОДНЯ И ПНЕВМОТРАНСПОРТ ЗАВТРАШНЕГО ДНЯ

На участках загрузки и разгрузки контейнеры принудительно и безостановочно передвигаются приводным устройством, состоящим из непрерывно вращающихся шин трения. Представлена схема для определения числа контейнеров в системе контейнерного пневмотранспорта. 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 контейнерного пневмотранспорта. Предложен трубопроводный вид транспорта для перевозки рабочих от карьера до завода — пневмотранспорт завтрашнего дня.

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

В работах [1–5] были приведены отличительные особенности новых разработок систем контейнерного пневмотранспорта (КПТ) сыпучих материалов, используемых в стройиндустрии (рис. 1).

Обводной трубопровод 6 для перепуска сжатого воздуха из тормозного участка контейнеров, загруженных транспортируемым материалом, в участок разгона порожних контейнеров транспортно-трубопровода позволяет использовать отработанный воздух грузовой ветви трубопровода для перемещения порожних контейнеров.

Анализ технической и научной литературы показал, что производительность систем КПТ зависит главным образом от участков загрузки и

разгрузки. Увеличение производительности может быть обеспечено непрерывностью движения контейнеров на этих участках. Безостановочная загрузка контейнеров решена конструктивно, подобно загрузке пластинчатых конвейеров или конвейерных поездов с перегородками. Вместе с тем разгрузка горной массы без остановки контейнеров путем их поворота вокруг осевой линии зависит от процесса высыпания насыпного груза. На участках загрузки и разгрузки контейнеры принудительно и безостановочно передвигаются приводным устройством (рис. 2), состоящим из непрерывно вращающихся шин трения. Размещение шин предусмотрено таким образом, чтобы они всегда контактировали с контейнерами.

Помимо массивных шин по ГОСТ 5883 возможно использование шин автомобильных и горных машин. После предварительных исследовательских работ в качестве приводных шин для пе-

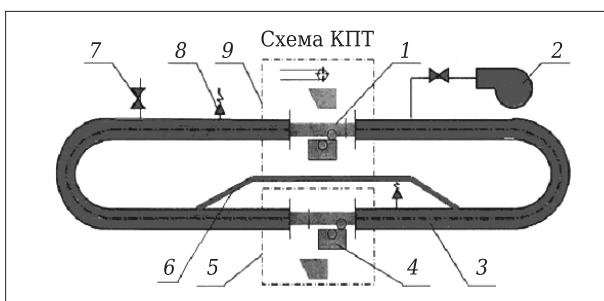


Рис. 1. Система контейнерного пневмотранспорта: 1 — контейнеры; 2 — нагнетательная станция; 3 — трубопровод; 4 — приводное устройство; 5 — участок разгрузки; 6 — обводной трубопровод; 7 — задвижка сброса воздуха; 8 — предохранительный клапан; 9 — участок загрузки

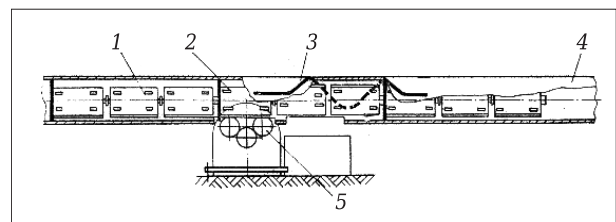


Рис. 2. Схема участка разгрузки контейнеров кольцевой системы КПТ: 1 — контейнеры; 2 — колесные опоры; 3 — винтообразная разгрузочная направляющая; 4 — трубопровод; 5 — приводное устройство

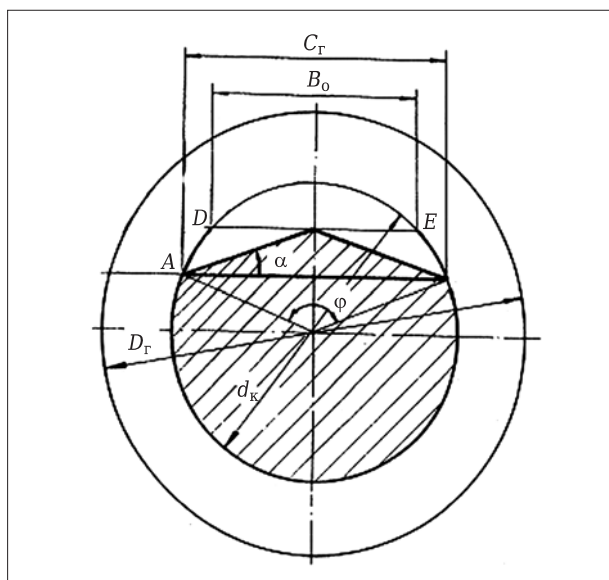


Рис. 3. Поперечное сечение груза в контейнере: d_k — диаметр контейнера; D_t — внутренний диаметр трубопровода; C_t — ширина, занимаемая грузом; B_o — ширина загрузочного отверстия; α — угол естественного откоса груза

редачи тягового усилия для контейнеров были использованы авиационные шины. Максимальные эксплуатационные параметры авиационных шин по ТУ 3800440–71 (паспорт на шины) приведены в табл. 1.

Особенности транспортных систем КПТ: высокая пропускная способность и производительность труда, простота и надежность технологического оборудования, независимость от погодноклиматических условий, экономичность, экологическая нейтральность, малые отчуждаемые площади.

Таблица 1. Максимальные эксплуатационные параметры авиационных шин

Модель*	Нагрузка, кН	Скорость, м/с	Рабочее давление в шине, кПа	Разрушающее давление, кПа
6А (700 × 250)	20,0	66,67	600	3000
	22,4	69,4	650	3000
	15,7	45,8	300	3000
	15,5	55,5	400	3000
7А (1050 × 300)	64	66,67	650	3000
	72,5	66,67	750	3300
8А (900 × 300)	32,5	65,27	500	2800
	27	61,1	500	2800
	50	52,8	600	2800
	54	56,9	600	2800

* В скобках указаны размеры шин, мм.

Как известно, для КПТ наивыгоднейшим сечением контейнера является круг. Величина максимального диаметра d_k контейнера в зависимости от внутреннего диаметра D_t трубопровода определяется из соотношения $d_k \approx 0,7D_t$.

Из рис. 3 находим площадь сечения груза $F = 0,63 d_k^2$. С учетом соотношения $d_k \approx 0,7D_t$ имеем $F = 0,31D_t^2$.

(1)

Основные параметры контейнеров и сечений груза для принятого ряда диаметров труб (0,299–1,620 м) приведены в табл. 2.

Длина цилиндрической части контейнера принимается равной

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

В зависимости от диаметра трубопровода длина контейнера

$$l_k \approx 2,15D_t. \quad (3)$$

Средняя длина контейнера по сцепкам определяется из соотношения

$$l_c = 2,35D_t. \quad (4)$$

Длина поезда

$$l_{п} = 2,35D_t n_k, \quad (5)$$

где n_k — число контейнеров в поезде, $n_k = 4-15$.

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

$$R_t = 0,5l_6^2/(D_b - d_k), \quad (6)$$

где l_6 — база контейнера; D_b — внутренний диаметр трубопровода.

Линейные размеры контейнеров для выбранного ряда диаметров трубопровода определяются по зависимости

Таблица 2. Параметры сечений груза

Наружный диаметр трубопровода D , м	Диаметр контейнера d_k , м	Ширина поверхности груза C_t , м	Ширина загрузочного отверстия B_o , м	Площадь поперечного сечения материала F , м ²
0,299	0,196	0,182	0,139	0,028
0,426	0,291	0,271	0,207	0,056
0,630	0,470	0,437	0,334	0,123
0,820	0,618	0,482	0,368	0,208
1,020	0,706	0,657	0,501	0,222
1,220	0,806	0,750	0,572	0,461
1,420	1,004	0,934	0,713	0,625
1,620	1,104	1,027	0,784	0,814

$$a_M = \lambda_K a_6, \quad (7)$$

где a_M — величина параметра варианта; λ_K — масштабный коэффициент; a_6 — величина параметра базы.

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

$$q_{\Pi} = 259D^{1,608}. \quad (8)$$

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

$$q_{\Gamma} = 0,22 D^2 \rho_{\Gamma}, \quad (9)$$

где ρ_{Γ} — плотность транспортируемого груза, кг/м³.

Параметры контейнеров в зависимости от диаметра трубопровода приведены в табл. 3.

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_{Π} прохождения составами контейнеров среднего интервала L^1 (рис. 4):

$$t_{\Pi} = 0,5(t_3 + t_p) \text{ при } t_3 = t_p, t_3 = t_{\Pi}. \quad (10)$$

$$t_3 = l_K / v_3, \quad (11)$$

$$t_{\Pi} = L^1 / v_{\Pi}, \quad (12)$$

где v_3 и v_{Π} — скорость движения контейнеров на участках загрузки и в трубопроводе соответственно.

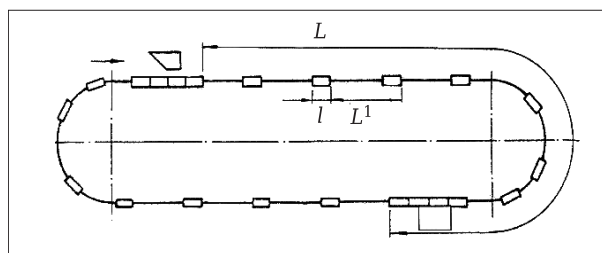


Рис. 4. Схема для определения числа контейнеров в системе КПП

При наличии n_{Π} поездов на линии произведение среднего интервала L^1 между одноименными точками поездов на n_{Π} дает расстояние транспортирования L без учета длины участков загрузки и разгрузки:

$$L^1 n_{\Pi} = L - n_3 l_K, \quad (13)$$

где n_3 — число поездов на участке загрузки или разгрузки.

Из равенства (13) находим

$$L^1 = (L - n_3 l_K) / n_{\Pi}. \quad (14)$$

С учетом непрерывности загрузки

$$v_3 = Q / (3,6q) \quad (15)$$

и равенств (10)–(12) запишем:

$$\frac{3,6 l_K q}{Q} = \frac{L - n_3 l_K}{n_{\Pi} v_{\Pi}}, \quad (16)$$

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

Таблица 3. Параметры емкостей контейнерного пневмотранспорта в зависимости от диаметра трубопровода

Параметр	Диаметр трубопровода D_T , м							
	0,299	0,426	0,63	0,82	1,02	1,22	1,42	1,62
Диаметр колеса d_K , м	0,05	0,06	0,12	0,16	0,19	0,22	0,27	0,30
Колесная база l_6 , м	0,45	0,70	1,00	1,45	1,65	1,90	2,25	2,55
Диаметр уплотнения d_K , м	0,29	0,41	0,61	0,80	0,99	1,19	1,31	1,59
Длина контейнера l_K , м	0,60	0,90	1,30	1,90	2,20	2,50	3,00	3,40
Средняя длина контейнера l_c , м	0,70	1,13	1,48	1,93	2,40	2,87	3,34	3,80
Длина поезда, м:								
минимальная $l_{\Pi, \min}$	2,81	4,52	5,92	7,72	9,60	11,48	13,36	15,20
максимальная $l_{\Pi, \max}$	10,54	16,96	22,20	28,95	36,00	43,05	50,10	57,00
Масса, кг:								
контейнера G_{Π}	170	50	154	321	372	803	1424	1864
пневмовоза G_B	20	59	186	406	720	1055	1775	2400
Погонная масса контейнерного состава q_{Π} , кг/м	26	47	112	182	239	307	461	545
Минимальный радиус кривизны трубопровода R_T , м	1,2	2,1	2,8	4,5	4,7	5,2	6,2	7,0

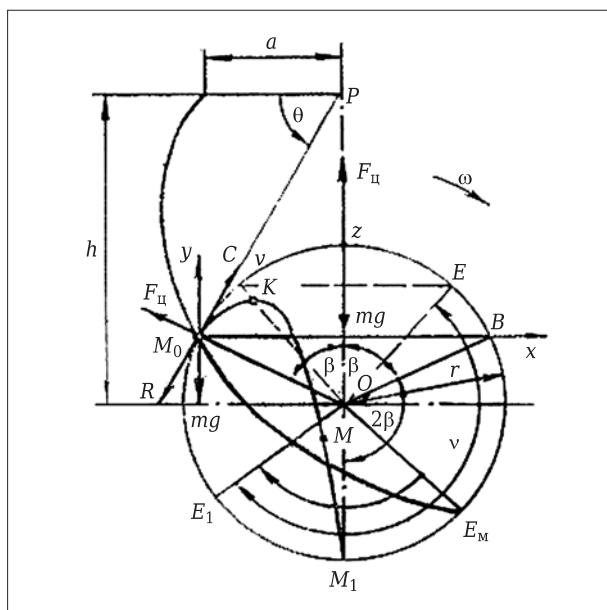


Рис. 5. Движение частиц материала в контейнере

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

$$n_{\text{л}} = \frac{Q(L - n_3 l_{\text{к}})}{3,6ql_{\text{к}}v_{\text{л}}} \quad (17)$$

Число поездов, необходимых для обеспечения перевозки заданного грузопотока,

$$n_0 = 2n_{\text{л}} + 2n_3 + n_{\text{рез}}, \quad (18)$$

где $n_{\text{рез}}$ — резервное число поездов, учитывающее их замену в период ремонта, $n_{\text{рез}}$ 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. 5) силы тяжести mg и центробежной силы $F_{\text{ц}}$ 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 от оси контейнера

$$h = g\omega^{-2}, \quad (19)$$

где ω — угловая скорость контейнера.

При повороте 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.

По 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

$$C = ae^{\theta \text{tg} \alpha}, \quad (20)$$

где C — расстояние от полюса P до точки спирали (см. рис. 5); a — база спирали; α — угол естественного откоса материала; θ — угол между лучом M_0P и базой a .

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 достигнув разгрузочной кромки. Движение частиц материала показано на рис. 5. Частицы, пришедшие в движение относительно контейнера, скользят по поверхности естественного откоса $M_0E_{\text{м}}$ вниз или отрываются от этой поверхности и двигаются далее по параболической траектории M_0KM_1 . Это зависит от угловой скорости ω 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. Иначе частицы материала, прижатые к внутренней стенке в верхнем положении Z , не смогут оторваться от нее (так как $F_{\text{ц}} > mg$) и не покинут пределов контейнера. Угловая скорость вращения контейнера, при которой $F_{\text{ц}} = mg$, называется критической:

$$\omega_{\text{кр}} = g^{0,5}r^{-0,5}, \quad (21)$$

где r — радиус контейнера.

Сравнив $r > g\omega^{-2}$ с формулой (19), имеем $h > r$.

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

$$\omega = g^{0,5}r^{-0,5} \cos^{0,5} \beta. \quad (22)$$

С учетом выражения (21)

$$\omega = \omega_{\text{кр}} \cos^{0,5} \beta. \quad (23)$$

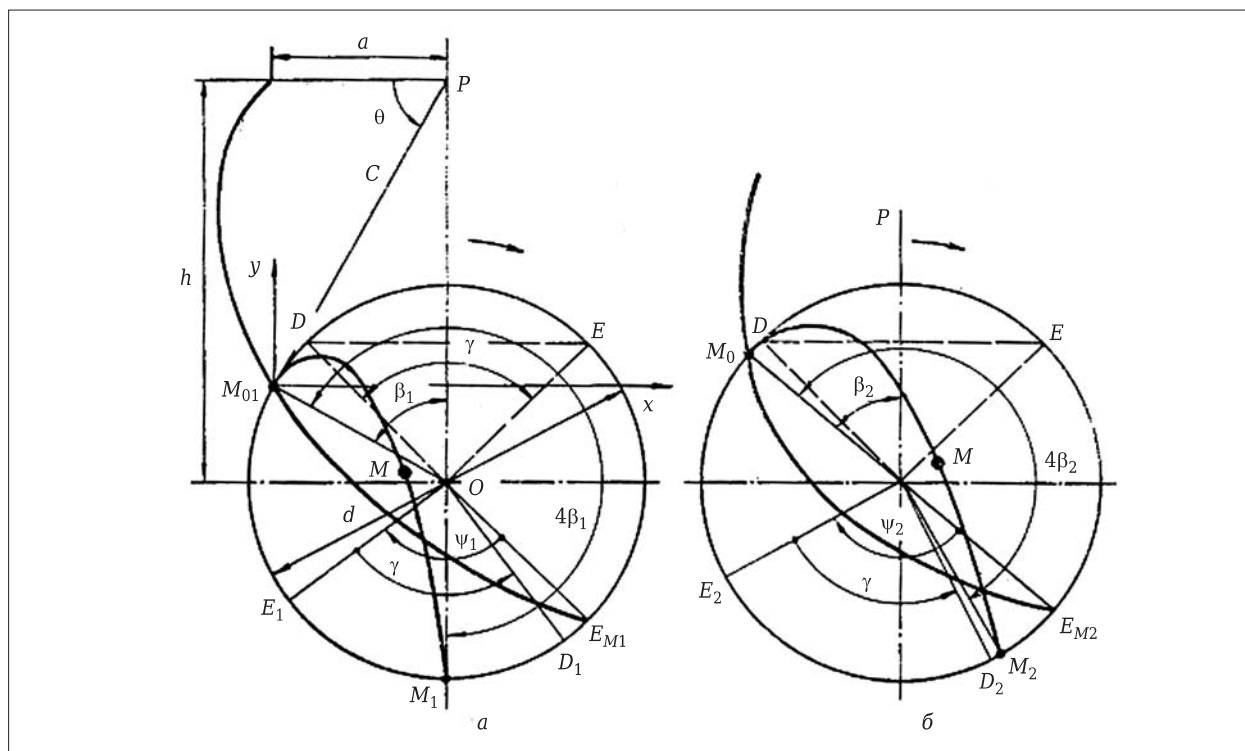


Рис. 6. Схема движения частицы M для определения угловой скорости контейнера: 6,9 (а) и 7,817 рад/с (б)

Координаты вершины параболы (см. рис. 5, точка K) и точки ее пересечения с окружностью контейнера (точка M_1) определяются по уравнениям:

$$x_K = r \sin \beta \cos^2 \beta, y_K = 0,5 \sin^2 \beta \cos \beta,$$

$$x_{M_1} = 4r \sin \beta \cos^2 \beta, y_{M_1} = -4r \sin^2 \beta \cos \beta.$$

Из этих уравнений имеем

$$x_K = 0,25x_{M_1}, y_K = 0,125y_{M_1}.$$

Из рис. 5

$$\operatorname{tg} \angle BM_0M_1 = y_{M_1}x_{M_1}^{-1} = -\operatorname{tg} \beta,$$

т. е. вписанный угол, опирающийся на дугу BM_1 , по абсолютной величине равен β , а сама дуга равна 2β , дуга M_0BM_1 равна 4β .

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

$$x = v t \cos \beta.$$

Отсюда время полета частицы по параболе

$$t = x / (v \cos \beta). \quad (24)$$

Угол поворота контейнера за это время

$$\psi = \omega t. \quad (25)$$

Из формулы (22) видна взаимосвязь угловой скорости и радиуса (диаметра) контейнера. В свою очередь, внутренний диаметр контейнера связан с диаметром трубопровода D_T соотношением

$$d_K = 0,7D_T. \quad (26)$$

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

$$\cos \beta = \omega_{\max}^2 \omega_{\text{кр}}^{-2}, \quad (27)$$

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

Значения полюсного расстояния $C = M_0P$ при конкретном транспортируемом материале находим по известной формуле (рис. 6)

$$C = [r^2 \sin^2 \beta + (h - r \cos \beta)^2]^{0,5}. \quad (28)$$

В случае расположения точки M_1 ниже точки D_1 (точка M_1 успеет вылететь из контейнера) нужно несколько уменьшить значение угла отрыва β_2 (рис. 6, б). Если точка окажется выше, то значение β_2 необходимо увеличить и найти положение точек M_2 и D_2 в той же последовательности, что и

Таблица 4. Результаты определения параметров разгрузки контейнера

Угол отрыва, град	Определяемые параметры								
	$\omega_{кр}$, рад/с	ω , рад/с	h , м	C , м	θ , град	a , м	t_M , с	ψ , град	S , см
60	9,76	6,90	0,206	1,178	61	0,092	0,251	99,4	6,2
50	9,76	7,82	1,160	0,124	49	0,072	0,252	112,8	-0,6

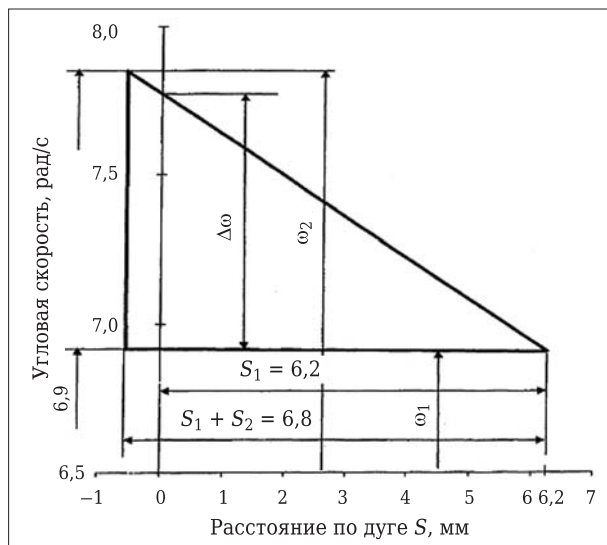
Рис. 7. Иллюстрация к определению приращения угловой скорости $\Delta\omega$ контейнера при его полной разгрузке

Таблица 5. Параметры отрезков логарифмических спиралей

Угол поворота, град	Расстояние C , м, при диаметре трубы, м				
	0,325	0,630	0,820	1,020	1,420
90	0,195	0,443	0,582	0,667	0,953
100	0,217	0,494	0,649	0,744	1,063
105	0,229	0,522	0,685	0,768	1,122
110	0,247	0,562	0,737	0,846	1,208

ранее для точек M_1 и D_1 . При этом необходимо добиться такого значения угла β_2 , при котором точка M_2 будет находиться на дуге окружности несколько выше D_2 (см. рис. 6, б).

Значение приращения угловой скорости $\Delta\omega$ находим интерполированием. Из соотношения (рис. 7)

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

находим

$$\Delta\omega = \frac{\omega_2 - \omega_1}{S_1 + S_2} S_1, \quad (29)$$

где S_1 — дуга M_1D_1 (см. рис. 6, а); S_2 — дуга M_2D_2 (см. рис. 6, б).

Максимальная угловая скорость контейнера при условии полной разгрузки груза составит

$$\omega_{\max} = 6,9 + \Delta\omega. \quad (30)$$

В качестве примера определяли угловую скорость контейнера с внутренним диаметром 200 мм и разгрузочным окном в поперечном сечении, образующим центральный угол $\gamma = 90^\circ$ (табл. 4). Угол естественного откоса груза $\alpha = 31^\circ 30'$.

После определения по зависимости (29) $\Delta\omega = 0,836$ рад/с находили $\omega_{\max} = 7,736$ рад/с.

Величины угла поворота $\nu_{тр}$ контейнера в момент вылета из него последней частицы для различных угловых скоростей приведены ниже:

ω , рад/с	7,736	6,900	3,950	2,090	1,045
$\nu_{тр}$, град	200,0	188,0	170,0	166,5	166,5

Значения полюсных расстояний C представлены в табл. 5.

По вышеприведенным формулам определяли параметры процесса высыпания груза из контейнеров (табл. 6) в зависимости от диаметра трубопровода.

Результаты построения на рис. 8 по данным табл. 5 и 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 .

Таким образом, при максимальном значении угловой скорости контейнеров всех диаметров угол β остается постоянным. Отсюда следует, что максимальный угол поворота контейнера $\nu_{\max}$ в момент вылета последней частицы для контейнеров всех диаметров при неизменной максимальной угловой скорости остается неизменным:

$$\nu_{\max} = 3\beta + 0,5\gamma = 198,3 \text{ град}, \quad (31)$$

где γ — центральный угол разгрузочного окна DOE (см. рис. 6).

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. Следовательно, ограничивающим параметром пропускной способности

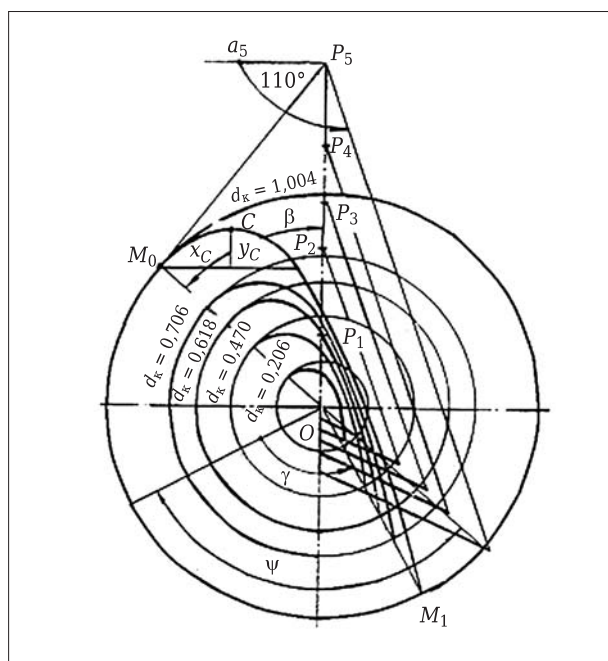


Рис. 8. Влияние изменения диаметра d_k контейнера на угол β перехода частиц материала с круговой на параболическую траекторию движения

системы КПТ является скорость движения контейнеров на участке разгрузки, зависящая от угловой скорости.

Результаты теоретических исследований были подтверждены экспериментальными исследованиями [5] с использованием осциллографа НО43. Типовые осциллограммы записи времени разгона привода показали, что время t_p пуска (разгона) установки почти в 2 раза меньше времени от начала ее вращения до начала высыпания груза (рис. 9). С учетом того, что разгон установки завершается до момента наступления процес-

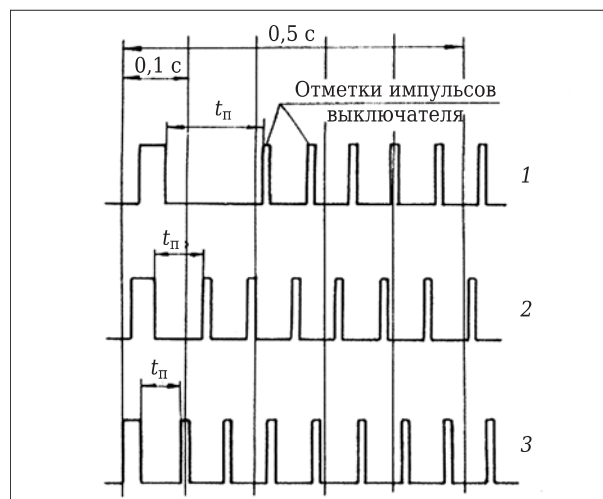


Рис. 9. Типовые осциллограммы записи времени разгона привода при $\omega_{тр}$, равной 3,98 (1), 1,99 (2) и 0,99 рад/с

са высыпания груза, угловая скорость контейнера в процессе разгрузки принималась постоянной.

Схема движения контейнеров на участке разгрузки показана на рис. 10.

После преобразования формулы определения длины разгрузочного участка [5, с. 13, (7)]

$$l_p = v_k(v/\omega_{тр} + 57,3t_p)/180, \quad (32)$$

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; $\omega_{тр}$ — угловая скорость контейнера при разгрузке, рад/с; t_p — время разгрузки контейнера, получим скорость движения контейнеров при разгрузке по винтовой линии

$$v_k = 180l_p/[\pi(v/\omega_{тр} + 57,3t_p)]. \quad (33)$$

Таблица 6. Параметры процесса разгрузки контейнеров*

Параметр	Диаметр трубопровода, м				
	0,325	0,630	0,820	1,020	1,420
Диаметр контейнера, м	0,206	0,470	0,618	0,706	1,004
Угловая скорость, рад/с:					
критическая	9,760	6,460	5,630	5,270	4,420
максимальная	7,740	5,120	4,460	4,180	3,500
Полусное расстояние OP , м	0,164	0,374	0,490	0,561	0,801
Расстояние PM_0 , м	0,128	0,290	0,381	0,436	0,623
Время полета частицы t_m , с	0,250	0,380	0,440	0,470	0,560
Скорость полета частицы, м/с	0,797	1,203	1,380	1,475	1,759
Координата точки, м:					
x_c	0,0316	0,072	0,095	0,108	0,154
y_c	0,020	0,045	0,059	0,067	0,095

* Угол поворота контейнера за время t_m 112 град, угол 4β падения частицы 204,4 град.

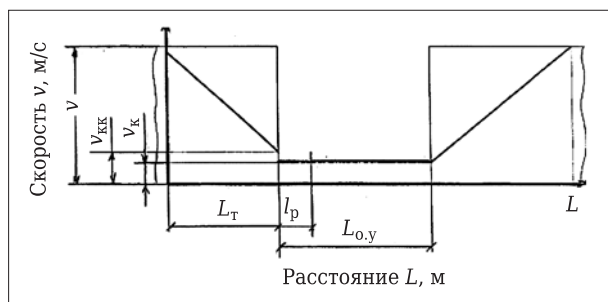


Рис. 10. Схема движения контейнеров на участке разгрузки: v — скорость движения контейнеров в транспортном трубопроводе, м/с; $v_{кк}$ — конечная скорость торможения, м/с; v_k — скорость движения при разгрузке по винтовой линии, м/с; l_p — длина участка разгрузки, м; L_T — путь торможения, м; $L_{o,y}$ — длина открытого участка, м

Из формулы [4, с. 18, (13)] определения пути торможения состава контейнеров в пневмобуфере при негерметичности уплотнений

$$L_T = \frac{0,5m(v^2 - v_{кк}^2)}{\Delta PS + F_{тр} + ma} \times \left[1 + \frac{(\Delta PS + F_{тр} + ma)\pi l R T \Delta V_{ут}}{4 \operatorname{Re} v^5 D^5 \rho + (\Delta PS + F_{тр} + ma)\pi l R T \Delta V_{ут}} \right] - \frac{4 \operatorname{Re} v^{10} D^6 \rho^3}{(\Delta PS + F_{тр} + ma) R \theta \pi^2 t^2 \lambda k \delta l} \quad (34)$$

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

$$v_{кк} = \sqrt{v^2 - \frac{(\Delta PS + F_{тр} + ma) \left[L_T + \frac{4 \operatorname{Re} v^{10} D^6 \rho^3}{(\Delta PS + F_{тр} + ma) R \theta \pi^2 t^2 \lambda k \delta l} \right]}{0,5m \left(1 + \frac{(\Delta PS + F_{тр} + ma)\pi l R T \Delta V_{ут}}{4 \operatorname{Re} v^5 D^5 \rho + (\Delta PS + F_{тр} + ma)\pi l R T \Delta V_{ут}} \right)}}, \quad (35)$$

где v — скорость движения контейнеров в транспортном трубопроводе, м/с; m — масса контейнеров, кг; ΔP — перепад давления на уплотнениях контейнеров, Па; S — площадь сечения трубопровода, м²; $F_{тр}$ — сила трения, Н; a — замедление контейнера, м/с²; l — длина контейнеров, м; R — газовая постоянная, $R = 287$ Дж/(кг·К); T — начальная абсолютная температура воздуха в трубопроводе, К; $\Delta V_{ут}$ — утечки воздуха, м³/с; Re — критерий Рейнольдса; D — диаметр манжеты, м; ρ — плотность воздуха, кг/м³; t — начальная температура воздуха в трубопроводе, К; λ — теплопровод-

ность трубы, Вт/(м·К); k — коэффициент теплопередачи (теплообмена) для трубы, Вт/(м²·К); δ — толщина стенки трубы, м.

Результаты расчетов параметров тормозного участка контейнеров при конечной скорости в пневмобуфере, превышающей скорость движения впереди идущих контейнеров на участке разгрузки, сведены в табл. 7.

Так как должно выполняться условие (см. рис. 9)

$$v_{кк} > v_k,$$

то с учетом зависимостей (33) и (35) имеем

$$\sqrt{v^2 - \frac{P_{стр} \left[L_T + \frac{4 \operatorname{Re} v^{10} D^6 \rho^3}{P_{стр} R T \pi^2 t^2 \lambda k \delta l} \right]}{0,5m \left(1 + \frac{P_{стр} \pi l R T \Delta V_{ут}}{4 \operatorname{Re} v^5 D^5 \rho + P_{стр} \pi l R T \Delta V_{ут}} \right)}}} > \frac{180 l_p}{\pi \left(\frac{v_{тр}}{\omega_{тр}} + 57,3 t_p \right)}, \quad (36)$$

где $P_{стр}$ — сопротивление движению контейнеров в трубопроводе, $P_{стр} = (\Delta PS + F_{тр} + am)$.

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. Все вышеописанное относилось к КПТ промышленных грузов.

С учетом многочисленных проектов по использованию КПТ и небольшого опыта по кураторству ТЭО, изыскательских и проектных работ и освоения лимитов строительства Свердловского метрополитена 1975–1976 гг. предлагается следующее.

В случае использования в системе контейнерного пневмотранспорта (см. рис. 1) открытого участка меньше длины состава контейнеров этот вид транспорта предлагается использовать для перевозки рабочих от карьера до завода на территориях с суровым климатом, например в Норильске. В этом случае КПТ будет называться пассажирский пневмотранспорт (ППТ) — пневмотранспорт завтрашнего дня (рис. 11–13).

Таблица 7. Параметры тормозного и разгрузочного участков

Параметры	Диаметр трубопровода, м							
	0,299	0,426	0,630	0,830	1,020	1,220	1,420	1,620
Скорость на участке разгрузки, м/с	0,82	0,94	1,10	1,25	1,45	1,63	1,69	1,84
Конечная скорость в пневмобуфере, м/с	0,88	1,03	1,21	1,38	1,60	1,79	1,89	2,02

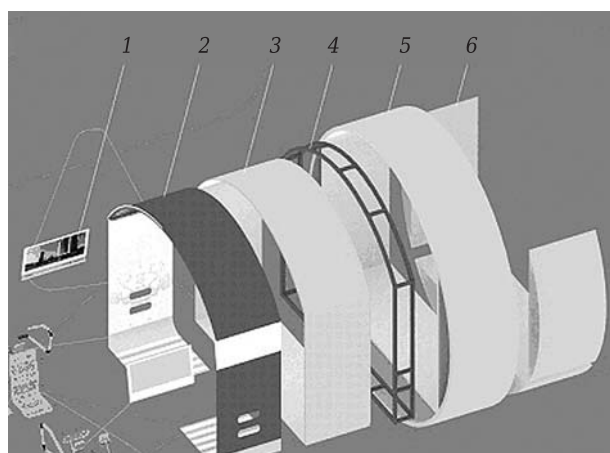


Рис. 11. Пассажирский пневмотранспорт: 1 — дисплей и строка прогресса пути; 2 — внутренняя отделка модуля; 3 — внутренний корпус модуля; 4 — каркас модуля; 5 — внешний корпус вагона; 6 — оборудование для технического обеспечения вагона

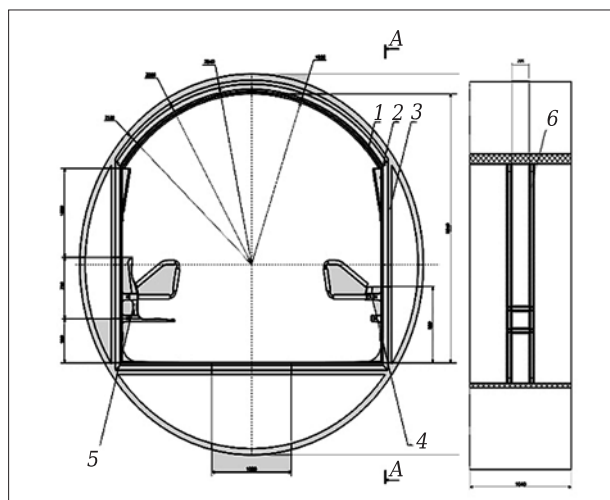


Рис. 12. Модуль вагона пневмопоезда ППТ: 1 — светодиодный экран; 2 — настенный дисплей; 3 — внешний корпус; 4 — вспомогательная плоскость; 5 — навесное сидение; 6 — каркас

В данном случае приемные станции подобны станциям метрополитена меньшего сечения. Новшеством станционных участков является непрерывное движение поезда с открытыми дверями со скоростью перемещения движущихся тротуаров. Закрытие этих дверей происходит при проходе в транспортный трубопровод.

Пневмопоезд обладает рядом отличительных особенностей. Одна из них — высокая скорость передвижения (150–200 км/ч). При этом поезд движется настолько плавно, что пассажир, стоящий посреди салона и не имеющий опоры, не рискует упасть ни во время движения, ни во время торможения или разгона состава. Трубая магистраль, по которой курсирует состав, может быть



Рис. 13. Салоны поездов ППТ

проложена под землей, под рекой, над рекой, на эстакаде. ППТ обладает независимостью от погодных условий. Транспорт экологически чистый и не загрязняет окружающую среду. Благодаря возможности прокладки трубопроводов в горных условиях, болотистой местности и в труднодоступных районах системы ППТ можно применять там, где использование транспорта других видов связано с большими техническими трудностями и материальными затратами. Число обслуживающего персонала минимально, что создает благоприятные условия для внедрения систем ППТ в отдаленных районах с ограниченными трудовыми ресурсами. Перемещение пассажиров осуществляется в комфортных условиях, в эргономически проработанных креслах. Интерьер с оборудованием решен в современном ключе с учетом дизайнерских тенденций.

Расчеты ППТ, выполненные применительно к трассе платформа Малино — г. Зеленоград протяженностью 6 км, показали, что этот вид транспорта по капитальным затратам и эксплуатационным расходам приблизительно в 2 раза дешевле метрополитена и лишь несколько уступает последнему по пропускной способности [6].

Автором диссертации [7] найдена компоновочная схема и определены число необходимых трасс, целесообразная скорость движения пневмопоездов в городском режиме (72 км/ч с ритмичностью 10–12 с) и за городом (120 км/ч с ритмичностью 3 мин). Новая транспортная трасса на 2/3 части прозрачна и имеет 2 м в диаметре, не мешает сложившемуся контуру города со строениями и проезжей частью улиц, перевозка осуществляется на высоте 10–12 м, не закрывает зону освещения, при острейшем дефиците строительных площадей опоры занимают всего 4 м². Все вышеперечисленные разработки и предложения выполнены в свете транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. [8].

Библиографический список

1. **Давыдов, С. Я.** Контейнерный пневмотранспорт и его использование для перемещения насыпных грузов / С. Я. Давыдов, А. М. Мальцев. — М.: ЦНИИцветмет экономики и информации, 1981. — 48 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2007. — 317 с.
3. **Давыдов, С. Я.** Контейнерный пневмотранспорт с повышенной пропускной способностью / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, А. Е. Замураев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2005. — № 7. — С. 17–21.
4. **Давыдов, С. Я.** Конструкторская доработка поточной системы контейнерного пневмотранспорта / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, С. Н. Сычев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2010. — № 5. — С. 15–20.
5. **Давыдов, С. Я.** Экспериментальные исследования процесса разгрузки сыпучего материала из вращающегося контейнера контейнерного пневмотранспорта / С. Я. Давыдов, Г. Г. Кожушко, С. Н. Сычев // Новые огнеупоры. — 2011. — № 2. — С. 9–14.
6. **Александров, А. М.** Контейнерный трубопроводный пневмотранспорт / А. М. Александров, В. Е. Аглицкий, П. В. Кованов [и др.]. — М.: Машиностроение, 1979. — 263 с.
7. **Закураев А. Ф.** Теория проектирования надземной универсальной трубопроводной пассажирской транспортной артерии в мегаполисе: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Нальчик, 2003.
8. http://mindortrans.tatarstan.ru/rus/file/pub/pub_19753.pdf. ■

Получено 21.01.13

© С. Я. Давыдов, Н. П. Косырев, Н. Г. Валиев,
Д. И. Симисинов, В. А. Курочкин,
А. Е. Замураев, 2013 г.

ПРЕДСТАВИТЕЛЬСТВО PROMAT GMBH
ДЕПАРТАМЕНТ «ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ИЗОЛЯЦИЯ»
РОССИЯ, 115477, МОСКВА, УЛ. КАНТЕМИРОВА, 58
ТЕЛЕФОН: + 7 495 231 2798, ФАКС: + 7 495 231 7977
ИНТЕРНЕТ: WWW.PROMAT.RU, E-MAIL: HPI@PROMAT.RU

Promat
High Performance Insulation

ПROMALIGHT® НАНОПОРИСТЫЕ ПЛИТЫ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СТАЛЕРАЗЛИВочНЫХ КОВШЕЙ



- Снижение температуры оболочки на 45 °С
- Снижение температуры поступающего расплава на 13 °С
- Снижение скорости остывания с 0,71 до 0,63 °С/мин
- Увеличение стойкости арматурного слоя
- Уменьшение времени на ремонты
- Увеличение объема сталковша на 5 %

РЕКЛАМА