

Д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), Н. Г. Валиев, к. т. н. В. М. Таугер,  
к. т. н. Ю. М. Казаков, к. т. н. Е. Б. Волков

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

УДК 622.686:622.355.1

## ТРУБОПРОВОДНЫЙ ПНЕВМОТРАНСПОРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ КОНТЕЙНЕРОВ

Реализация сложной трассы трубопроводного пневмотранспорта становится возможной за счет применения контейнеров (капсул) шаровидной формы, которые позволяют использовать качение под уклон трассы для снижения энергозатрат компрессора. На вертикальных участках трассы целесообразно осуществлять спуск контейнера под собственным весом. Дано математическое описание качения шарового контейнера под уклон и спуска под собственным весом.

**Ключевые слова:** трубопроводный пневмотранспорт, шаровой контейнер, трасса.

**К**апсульный пневмотранспорт (КП) является разновидностью контейнерного пневмотранспорта [1–7]. Капсулы (контейнеры) различных конструкций позволяют перемещать материалы с различными физико-химическими свойствами. В качестве примера на рис. 1 показаны компоненты КП «Стрела» ЗАО «Уралавтоматикаинжиниринг».

Трассы, по которым осуществляется пересылка капсул, выполняются из стальных труб диаметром 76 мм или 100 мм, а также из пластиковых ПВХ труб с внутренним диаметром 95 мм.

Система КП обеспечивает визуальный и программный контроль прохождения капсул по трассе. Через каждые 10–50 м устанавливаются датчики прохождения капсулы. Крышка капсулы снабжена запорным устройством, исключающим

самопроизвольное открывание. Для перемещения капсул по трассе используются воздуходувки (компрессоры), тип и количество которых зависят от расчетной мощности системы. Трехфазные компрессоры SU роторного типа применяют для обеспечения высокой надежности высоконагруженных систем КП с большим количеством станций, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. Компрессоры SU состоят из трехфазного двигателя и ротора, заключенного в корпус. Корпус ротора имеет два выхода, в одном из которых при работе двигателя постоянно создается напор, в другом — разрежение. Оба выхода подключаются к магистральному трубопроводу с помощью устройств переключения воздушного потока. В качестве таких устройств используются механические заслонки с электроприводом (реверсивный



**Рис. 1.** КП «Стрела»: а, б — подвод трубопроводов; в — приемоотправительная станция, пульты управления и компрессоры

✉  
С. Я. Давыдов  
E-mail: davidovtrans@mail.ru

клапан) или маршрутная стрелка, которая в этом случае называется воздушной стрелкой.

Рекомендуемый диаметр трубопровода 110 мм. Радиус поворота трубопровода в зависимости от диаметра, мм: 550, 650, 750, 800, 1200.

Основные технические параметры систем КП приведены в таблице.

Приемо-передающие устройства (станции) ООО «Строительная компания «АЛП» связываются между собой трубопроводом (ПВХ/металл). Система пневмопочты производства Sumetzberger (Австрия) — с гибкой маршрутизацией — позволяет связать все станции между собой посредством многоадресных пультов. Магистраль, как правило, размещается под полом, вдоль стен, под землей, а также на металлоконструкциях. Магистраль может связать отдельные здания на значительной территории, проходя как по открытому пространству, так и под землей. Для прокладки магистрали вне помещений используется специальная изоляция, исключая влияние внешних факторов. Транспортировка происходит между передающей и приемной станциями в герметичных капсулах с возможностью принудительной или автоматической регулировки скорости. Компрессоры отличаются малыми габаритами (50 × 50 × 50 мм) и низким энергопотреблением. Капсулы автоматически загружаются, отправляются, принимаются и разгружаются, и затем пустые капсулы отправляются обратно в автоматическом режиме.

Применяемый трубопроводный пневмотранспорт (КП и контейнерный трубопроводный транспорт) имеют как капсулы, так и контейнеры цилиндрической формы. Для упрощения изготовления и обслуживания контейнера, его возможности вписываться в крутые повороты трассы и уменьшения энергозатрат на перемещение при снижении его весовых параметров предлагается КП с шаровыми контейнерами (рис. 2) [7].

Размещенный в трубопроводе 1 контейнер 2 содержит корпус 3 с загрузочным отверстием 4 и крышкой 5. Криволинейные направляющие 6 выполнены на внутренней стенке корпуса 3 со сферической поверхностью. Крышка 5 при открывании-закрывании контейнера скользит вдоль направляющих. Крышка, направляющие и корпус выполнены с одинаковой кривизной сферической поверхности. Упор 9 на краю загрузочного отверстия предназначен для ограничения движения крышки и выравнивания ее по сферической поверхности.

Контейнер катится внутри наклонного трубопровода 10. При наличии горизонтального или подъемного участков за счет накопленной при качении по наклонному участку кинетической энергии и под воздействием потока 8 сжатого воздуха, протекающего в зазоре 7 над сферической поверхностью, контейнер продолжает катиться к участку разгрузки.

Возможность скольжения крышки в направляющих, расположенных на внутренней стенке корпуса контейнера, позволяет автоматизировать открытие и закрытие загрузочного отверстия. Выполнение крышки с направляющими и корпуса контейнера с одинаковым радиусом кривизны обеспечивает качение контейнера по трубопроводу без скольжения.

Наличие наклонного участка 10 транспортного трубопровода в сочетании с выполнением корпуса со сферической поверхностью диаметром меньше внутреннего диаметра трубопровода позволяет сократить расход сжатого воздуха для его качения вокруг своей оси как на первоначальном наклонном участке, так и в транспортном трубопроводе. В итоге энергозатраты уменьшаются за счет уменьшения весовых параметров контейнера.

Отходы различных видов, образующиеся как в процессе производства, так и на различных стадиях их переработки, загрязняют окружающую среду и вместе с тем представляют собой ценное минеральное сырье, которое может быть использовано, в частности, для изготовления строительных материалов. Процесс утилизации отходов связан с их перемещением различными транспортными системами, и в их числе — системами контейнерного пневмотранспорта. Как известно, жидкие агрессивные отходы часто сливаются в открытые водоемы, так как их радиоактивность считается безопасной для окружающей среды. Из всех видов агрессивных отходов жидкие наиболее распространены,

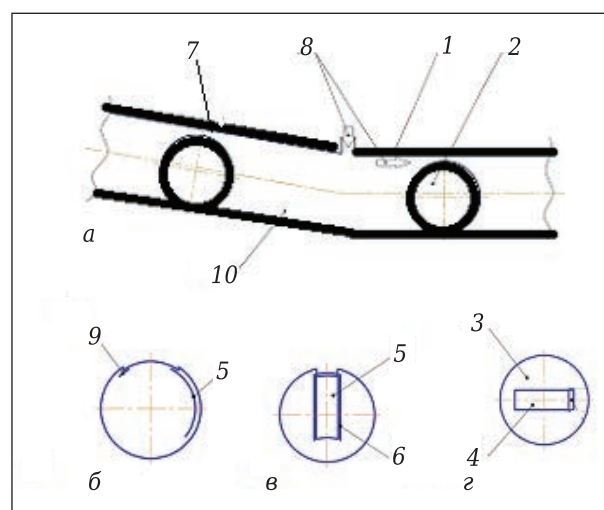


Рис. 2. Шаровой контейнер для трубопроводного транспорта: а — схема трассы; б — общий вид контейнера в разрезе; в — вид сбоку в разрезе; г — вид сверху

#### Технические параметры КП

Система	Длина, км	Диаметр труб, м	Материал труб	Скорость, м/с	Вес груза, кг	Производительность, м³/мин	Мощность, кВт
Стрела	—	63–110	—	—	2,5	4,6	—
Sumetzberger	1,5	63–160	ПВХ/металл	12	5	—	2,2–12,0
Hanter	1,0	63–220	ПВХ/поликарбонат	5–8	10	—	—

поскольку в растворы переводят как конструкционные материалы (нержавеющие стали, циркониевые оболочки твэлов и т. п.), так и технологические элементы (соли щелочных материалов и т. д.). Предлагаемый трубопроводный транспорт можно использовать для доставки и закладки в складские выработки агрессивных отходов с последующим их извлечением и использованием для конкретных целей. Для подземных складских выработок спуск шарового контейнера можно осуществить без энергозатрат с использованием наклонного желоба.

Для данного случая можно найти линейное ускорение  $a$  центра массы контейнера шаровидной формы, скатывающегося без скольжения по наклонному под углом  $\alpha$  участку трассы длиной  $l$  с перепадом высот  $h$  при начальной скорости  $v_0 = 0$ . Качение шара приводит к переходу его потенциальной энергии в кинетическую [9], т. е.

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (1)$$

где  $m$  и  $J$  — масса и момент инерции контейнера с грузом;  $v$  — скорость центра массы;  $\omega$  — угловая скорость.

Перепад высот равен

$$h = l \sin \alpha, \quad (2)$$

$a$  угловая скорость

$$\omega = \frac{v}{R}, \quad (3)$$

где  $R$  — радиус шара.

Подставляя (2) и (3) в (1), получим

$$mgl \sin \alpha = \frac{1}{2} v^2 \left( m + \frac{J}{R^2} \right). \quad (4)$$

Так как движение равноускоренное, то

$$l = \frac{at^2}{2}. \quad (5)$$

Решая (4) и (5) совместно, получим

$$a = \frac{mgs \sin \alpha}{m + \frac{J}{R^2}}. \quad (6)$$

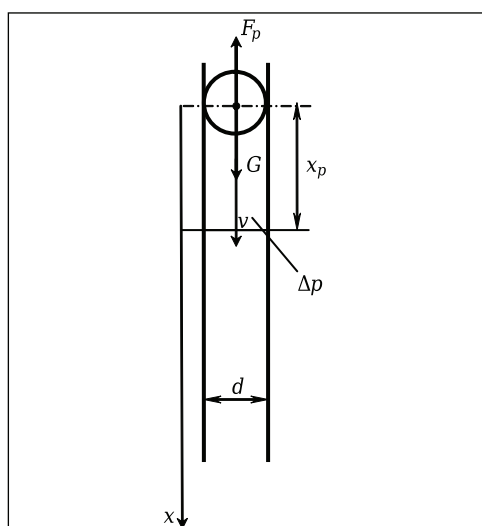


Рис. 3. Схема падения контейнера в трубе

Выполнение корпуса контейнера сферической формы позволяет сократить расход сжатого воздуха за счет его качения на наклонных участках трассы.

Спуск контейнера по вертикальному участку трассы может быть осуществлен также под собственным весом. Для расчета производительности КП необходимо решить задачу об изменении скорости контейнера в период «падения» внутри трубопровода (рис. 3). Примем допущения:

1) аэродинамическое сопротивление в системе, механическое сопротивление движению контейнера, зазоры между контейнером и внутренней поверхностью трубы отсутствуют;

2) плотность воздуха изменяется несущественно.

В исходный момент времени скорость контейнера  $v_0 = 0$ . Контейнер начинает спуск под действием силы тяжести

$$G = mg. \quad (7)$$

Контейнер приобретает ненулевую скорость, и под ним образуется зона  $x_p$  (см. рис. 3) повышенного на величину  $\Delta p$  давления. Аналогичная задача рассмотрена в [8]. В соответствии с ее решением

$$\Delta p = \rho v c, \quad (8)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха;  $c$  — скорость звука в воздухе.

На контейнер начинает действовать сила, направленная вертикально вверх,

$$F_p = \Delta p \frac{\pi d^2}{4} = \rho v c \frac{\pi d^2}{4}, \quad (9)$$

где  $d$  — внутренний диаметр трубы.

Ускорение контейнера  $a$ , полученное из условия

$$G - F_p = ma, \quad (10)$$

становится меньше  $g$ :

$$a = \frac{G - F_p}{m} = g - \frac{\pi d^2 \rho v c}{4m}. \quad (11)$$

Ускорение контейнера  $a = dv/dt$ , поэтому уравнение (11) преобразуется в дифференциальное

$$\frac{dv}{dt} + \frac{\rho S c}{m} v - g = 0, \quad (12)$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения трубы по внутреннему диаметру,  $S = \pi d^2/4$ .

Решением дифференциального уравнения (12) является зависимость скорости контейнера от времени:

$$v = \frac{mg}{\rho S c} \left( 1 - e^{-\frac{\rho S c t}{m}} \right). \quad (13)$$

При  $t \rightarrow \infty$  скорость асимптотически стремится к своему предельному значению

$$v_{\max} = \frac{mg}{\rho S c}. \quad (14)$$

Так как  $v = dx/dt$ , то (13) является одновременно и дифференциальным уравнением, решение которого дает зависимость перемещения контейнера от времени:

$$x = \frac{mg}{\rho Sc} \left( t - \frac{1 - e^{-\frac{\rho Sc}{m} t}}{\frac{\rho Sc}{m}} m \right). \quad (15)$$

Асимптотой в данном случае является прямая с уравнением

$$x_{ac} = \frac{mg}{\rho Sc} \left( t - \frac{m}{\rho Sc} \right). \quad (16)$$

На рис. 4 показаны графики, поясняющие зависимость ускорения  $a(t)$ , скорости  $v(t)$  и перемещения контейнера  $x(t)$  от времени  $t$ , а также приведен график асимптоты в виде прямой  $x_{ac}(t)$ .

Прямая  $x_{ac}(t)$  пересекает ось  $t$  в точке с координатами  $(m/\rho Sc; 0)$ .

С другой стороны,  $a = dv/dt$ , что позволяет найти зависимость  $a(t)$  дифференцированием уравнения (15):

$$a = g e^{-\frac{\rho Sc}{m} t}. \quad (17)$$

Кривая  $a(t)$  (см. рис. 4) асимптотически приближается к оси  $t$ . С некоторого момента  $t_c$  изменения ускорения и скорости становятся настолько малыми, что движение контейнера можно считать равномерным.

Практический интерес представляет определение значения  $t_c$ . Для конкретизации расчета целесообразно задать величину скорости контейнера достаточно близкой к  $v_{max}$ .

Пусть  $v = 0,95v_{max}$ . Тогда уравнение (13) принимает вид

$$0,95 = 1 - e^{-\frac{\rho Sc}{m} t_c}, \quad (18)$$

откуда

$$t_c = -\frac{m \ln 0,05}{\rho Sc} \approx 3 \frac{m}{\rho Sc}. \quad (19)$$

Подстановка  $t_c$ , полученного по (19), в (15) позволит найти расстояние, на которое опустится контейнер до того момента, с которого можно считать его скорость постоянной.

Уравнение асимптоты (16) позволяет просто и с достаточной степенью точности найти момент  $t_n$  прохождения контейнером произвольно взятого пути  $x_n > x_c$  (см. рис. 3) и среднюю скорость контейнера  $v_{cp}$  на участке длиной  $x_n$ :

$$x_n = \frac{mg}{\rho Sc} \left( t_n - \frac{m}{\rho Sc} \right); \quad (20)$$

$$t_n = \frac{\rho Sc}{mg} x_n + \frac{m}{\rho Sc}; \quad (21)$$

$$v_{cp} = \frac{x_n}{t_n}. \quad (22)$$

Как аэродинамическое, так и механическое сопротивление в системе приводят к интенсификации процесса снижения ускорения, уменьшению  $v_{max}$  и  $t_c$  и увеличению крутизны графика  $x(t)$  (см. рис. 4).

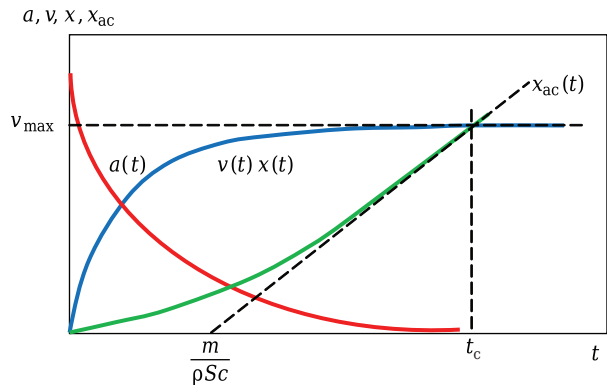


Рис. 4. Вид графиков  $a(t)$ ,  $v(t)$ ,  $x(t)$  и  $x_{ac}(t)$

Зазоры между контейнером и трубой, наоборот, делают график  $a(t)$  более пологим и увеличивают  $v_{max}$  и  $t_c$ . Величина зазоров зависит от конструктивного исполнения КП. Оценочные расчеты показывают, что плотность воздуха под контейнером изменяется незначительно.

Зависимости (10), (15), (17), (20)–(22) представляют собой основу определения кинематических параметров контейнеров на вертикальном участке трассы. Они позволяют получить ориентировочное значение длительности периода спуска контейнера, знание которой необходимо для проектирования КП.

#### Библиографический список

1. Давыдов, С. Я. Контейнерный пневмотранспорт с повышенной пропускной способностью / С. Я. Давыдов, И. Д. Кашеев, А. Е. Замураев, О. Н. Миногина // Новые огнеупоры. — 2005. — № 7. — С. 17–21.
2. Калинушкин, М. П. Пневмотранспортное оборудование : справочник / М. П. Калинушкин [и др.]. — Л. : Машиностроение, 1986. — 286 с.
3. Александров, А. М. Контейнерный трубопроводный пневмотранспорт / А. М. Александров [и др.]. — М. : Машиностроение, 1979. — 263 с.
4. Давыдов, С. Я. Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
5. Давыдов, С. Я. Капсульный пневмотранспорт / С. Я. Давыдов, И. Д. Кашеев, С. Н. Сычев, А. Г. Устинова // Новые огнеупоры. — 2008. — № 5. — С. 22–24.
6. Давыдов, С. Я. Энергосберегающее оборудование пневматического транспорта: вчера, сегодня, завтра: теория, расчет, исследования, производство / С. Я. Давыдов, А. Н. Сёмин. — М. : Изд. фонд «Кадровый резерв», 2016. — 472 с.
7. Пат. 150690 РФ. Контейнер для трубопроводного транспорта / Давыдов С. Я., Файзуллин Р. Т. — № 2014122598 ; заявл. 03.06.14 ; опубл. 20.02.15, Бюл. № 5.
8. Распространение возмущений давления и плотности. <http://www.astronet.ru/db/msg/1173645/lect3-4.html>.
9. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10867>. ■

Получено 06.06.2017

© С. Я. Давыдов, Н. Г. Валиев, В. М. Таугер, Ю. М. Казаков, Е. Б. Волков, 2018 г.