

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СОСУДА В СИСТЕМЕ РУДНИЧНОГО ПНЕВМОПОДЪЕМА

ТАУГЕР В. М., КАЗАКОВ Ю. М., ВОЛКОВ Е. Б., ЛЕОНТЬЕВ А. А.

В статье рассмотрено движение порожнего скипа в спускном трубопроводе пневмоподъемной установки. Проинтегрированы дифференциальные уравнения движения, на основе которых получены основные кинематические параметры порожнего скипа в период его спуска, необходимые для расчета длительности рабочего цикла и выбора комплектующих скиповой пневмоподъемной установки. Рассчитано асимптотическое значение скорости для установившегося движения скипа. Особенность работы такой установки состоит в спуске порожнего скипа под собственным весом. Для проектирования установок необходима математическая модель системы: «сосуд–вмещающая среда–трубопровод», отражающая кинематику скипа в спускном трубопроводе. При расчетах систем с газообразной транспортирующей средой возникают проблемы с определением влияния на параметры системы физических свойств среды, в частности ее сжимаемости. Особую сложность представляет математическое описание установок с напряженным режимом работы, когда цикл движения строго детерминируется. Системы рудничного пневмоподъема должны функционировать ритмично, с высокой энергетической нагрузкой, причем длина трубопроводов составляет сотни метров. В таких условиях учет физических эффектов, связанных со свойствами воздуха вмещающей и транспортирующей среды, в математической модели системы необходим.

Ключевые слова: подъемная установка; скип; пневмосистема; трубопровод; управление движением; дифференциальные уравнения движения; пневмотранспорт; рудничный пневмоподъем.

С увеличением глубины месторождений и повышением производительности проходческих и очистных комбайнов требуются все большие емкости скипов и скорости подъема. Возникает необходимость в создании более мощных и массивных подъемных машин, скипы превращаются в весьма громоздкие сооружения, увеличиваются количество и диаметр канатов, размеры загрузочных и разгрузочных бункеров, высота копра, диаметр шахтного ствола [1].

Указанные факторы приводят к необходимости поиска альтернативных способов шахтного подъема, обладающих более высокой удельной производительностью. Анализ различных видов транспорта, выполненный в [2], однозначно указывает на перспективность специфической разновидности контейнерного пневмотранспорта – скиповых пневмоподъемных установок (СППУ) [3, 4].

В состав СППУ входят подъемный и спускной трубопроводы, сосуды (скипы), воздухонагнетательная установка с системой управления, а также загрузочная и

Таугер Виталий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: tauger2016@yandex.ru

Казakov Юрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Волков Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: evgeniy.volkov.ursmu@yandex.ru

Леонтьев Александр Анатольевич – аспирант кафедры технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: zufh123@gmail.com

разгрузочной станции. Особенность работы СППУ состоит в спуске порожнего скипа под собственным весом. Для проектирования установок необходима математическая модель системы *сосуд–вмещающая среда–трубопровод*, отражающая кинематику скипа в спускном трубопроводе [5].

При расчетах систем с газообразной транспортирующей средой возникают проблемы с определением влияния на параметры системы физических свойств среды, в частности ее сжимаемости. Особую сложность представляет математическое описание установок с напряженным режимом работы, когда цикл движения строго детерминируется. Системы рудничного пневмоподъема должны функционировать ритмично, с высокой энергетической нагрузкой, причем длина трубопроводов составляет сотни метров. В таких условиях учет физических эффектов, связанных со свойствами воздуха как вмещающей, так и транспортирующей среды, в математической модели системы необходим.

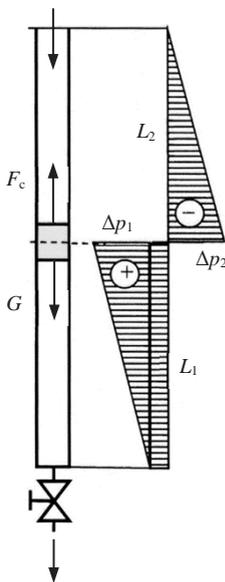


Рис. 1. Движение порожнего скипа

Избыточное давление на нижнем участке Δp_1 и разрежение на верхнем участке Δp_2 трубопровода:

$$\Delta p_1 = \lambda \frac{L_1}{d} \rho_0 \frac{v_c^2}{2} + \xi \rho_0 \frac{v_c^2}{2};$$

$$\Delta p_2 = \lambda \frac{L_2}{d} \rho_0 \frac{v_c^2}{2},$$

где λ – коэффициент Дарси [6]; ξ – коэффициент местного сопротивления; L_1, L_2 – длина нижнего и верхнего участка трубопровода соответственно; v_c – скорость скипа.

Выделим следующие аэродинамические эффекты, сказывающиеся на кинематике скипа:

- аэродинамическое сопротивление участка трубопровода перед скипом;
- аэродинамическое сопротивление участка трубопровода позади скипа;
- изменение плотности воздуха в трубопроводе в связи с аэродинамическими сопротивлениями.

Необходимо отметить, что учесть одновременное действие всех факторов пока не представляется возможным, так как уравнение динамики, описывающее их влияние, не имеет аналитического решения. В подобных случаях выделяют наиболее значимые факторы, а остальные во внимание не принимают.

С целью упрощения расчетов принято следующее допущение: плотность воздуха под скипом и над ним незначительно отличается от плотности атмосферного воздуха.

Расчетная схема системы показана на рис. 1. Под скипом возникает избыточное давление Δp_1 , т. е. абсолютное давление в произвольной точке больше атмосферного p_0 , соответственно и плотность воздуха выше плотности ρ_0 при нормальных условиях. Над скипом, наоборот, создается разрежение Δp_2 , абсолютное давление становится меньше атмосферного, и плотность воздуха ниже, чем ρ_0 . Однако попытка скорректировать расчетные формулы с учетом переменной плотности приводит к их неоправданному усложнению.

По сути, принятое допущение означает, что воздух рассматривается как несжимаемая среда.

Избыточное давление на нижнем участке Δp_1 и разрежение на верхнем участке Δp_2 трубопровода:

Местное аэродинамическое сопротивление создается аппаратом, входящим в систему управления, например шаровым краном.

Сила аэродинамического сопротивления

$$F_c = (\Delta p_1 + \Delta p_2) \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi d^2}{8} \rho_0 \left(\lambda \frac{H}{d} + \xi \right) v_c^2, \quad (1)$$

где $H = L_1 + L_2$ – длина трассы.

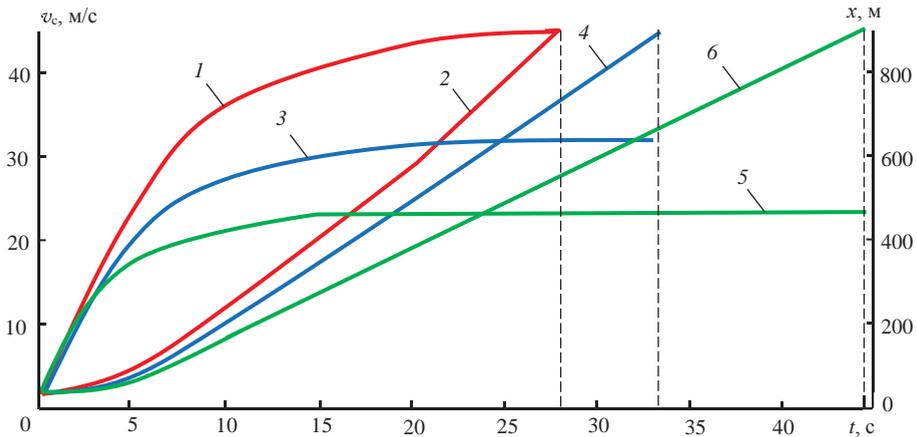


Рис. 2. Графики зависимостей скорости (1, 3, 5) и перемещения (2, 4, 6) скипа от времени при различных ξ

Сумма проекций сил на продольную ось трубопровода

$$(m_c + m_b)a = G - F_c, \quad (2)$$

где a – ускорение скипа; $G = m_c g$ – вес скипа; m_b – масса столба воздуха высотой H , равная по величине

$$m_b = \rho_0 \frac{\pi d^2}{4} H. \quad (3)$$

Подставив выражения (1), (3) в (2), учитывая, что $a = d^2x/dt^2$, получим дифференциальное уравнения движения скипа в пневмоподъемной установке

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\pi d^2 \rho_0 (\lambda (H/d) + \xi)}{8(m_c + m_b)} v_c^2 = \frac{m_c}{m_c + m_b} g \quad (4)$$

для интервала $0 \leq x \leq H$.

Для приведения данного выражения к удобному для интегрирования виду введем следующие обозначения:

$$A = \frac{\pi d^2 \rho_0 (\lambda (H/d) + \xi)}{8(m_c + m_b)}; \quad B = \frac{m_c g}{m_c + m_b},$$

тогда (4) принимает вид

$$\frac{d\dot{v}_c}{dt} + A\dot{v}_c^2 = B.$$

После разделения переменных

$$\frac{d\dot{v}_c}{B - A\dot{v}_c^2} = dt; \quad \frac{d\dot{v}_c}{(B/A) - \dot{v}_c^2} = A dt \quad (5)$$

и интегрирования уравнения (5) получается следующее выражение:

$$\operatorname{arcth} \sqrt{\frac{A}{B}} \dot{v}_c = \sqrt{AB}t + C. \quad (6)$$

Из начальных условий ($t = 0$; $v = 0$) константа $C = 0$.
Корень уравнения (6)

$$\dot{v}_c = \sqrt{\frac{B}{A}} \operatorname{th}(\sqrt{AB}t). \quad (7)$$

Из (7) следует, что при $t \rightarrow \infty$ скорость скипа $\dot{v}_c \rightarrow \sqrt{B/A}$, следовательно, скорость асимптотически приближается к значению для установившегося движения $v_{c,y}$:

$$\dot{v}_{c,y} = \sqrt{\frac{B}{A}} = \sqrt{\frac{8m_c g}{\pi d^2 \rho_0 (\lambda(H/d) + \xi)}}.$$

Поскольку $v_c = dx/dt$, то (7) представляет собой дифференциальное уравнение, которое после разделения переменных выглядит так:

$$dx = \sqrt{\frac{B}{A}} \operatorname{th}(\sqrt{AB}t) dt. \quad (8)$$

В результате интегрирования (8) получается зависимость перемещения скипа от времени:

$$x = \frac{1}{A} \ln \left| \operatorname{ch}(\sqrt{AB}t) \right| + C_1. \quad (9)$$

В соответствии с начальными условиями ($t = 0$; $x = 0$) константа $C_1 = 0$.
После подстановок и преобразований формулы (7) и (9) принимают вид

$$\dot{v}_c = \frac{1,6}{d} \sqrt{\frac{m_c g}{\rho_0 (\lambda(H/d) + \xi)}} \operatorname{th} \left[\frac{0,627}{m_c + m_b} \sqrt{\rho_0 m_c g \left(\lambda \frac{H}{d} + \xi \right)} t \right];$$

$$x = \frac{2,55(m_c + m_b)}{d^2 \rho_0 (\lambda(H/d) + \xi)} \ln \left| \operatorname{ch} \left[\frac{0,627}{m_c + m_b} \sqrt{\rho_0 m_c g \left(\lambda \frac{H}{d} + \xi \right)} t \right] \right|.$$

На рис. 2 приведены графики зависимостей $v_c(t)$, $x(t)$ при различных значениях коэффициента ξ и следующих исходных данных: $m_c = 1500$ кг; $d = 1,13$ м (площадь живого сечения трубопровода 1 м^2); $\rho_0 = 1,21$ кг/м³; $H = 1000$ м. Кривые 1, 2 построены для $\xi = 0$; кривые 3, 4 для $\xi = 10$; кривые 5, 6 для $\xi = 30$.

С точки зрения практической реализации СППУ наиболее благоприятно выглядит вариант с коэффициентом $\xi = 30$ (кривые 5 и 6). Приблизительно после 15 с движения устанавливается скорость $v_{c,y} = 24,6$ м/с, время спуска составляет $t_c = 44$ с, средняя скорость скипа равна $22,7$ м/с.

Полученные зависимости позволяют определить на стадии проектирования основные кинематические параметры порожнего скипа в период спуска, необходимые для расчета длительности рабочего цикла и выбора комплектующих СППУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахтный подъем: науч.-произв. изд. / В. Р. Бежок [и др.] Донецк: Юго-Восток Лтд, 2007. 624 с.
2. Спиваковский Л. О., Гончаревич И. Ф. Специальные транспортирующие устройства в горнодобывающей промышленности. М.: Недра, 1985. 128 с.
3. Таугер В. М., Волков Е. Б., Холодников Ю. В. Скиповая пневмоподъемная установка повышенной энергоэффективности // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 2. С. 77–83.
4. Таугер В. М., Волков Е. Б., Кожевников А. О. Разработка скиповой трубопроводной пневмоподъемной установки // Уральская горная школа – регионам: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: УГГУ, 2017. С. 275–276.
5. Таугер В. М., Казаков Ю. М., Волков Е. Б., Кожевников А. О. Кинематика скипа в спускном трубопроводе пневмоподъемной установки // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 96–101.
6. Энциклопедия физики и техники. URL: http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0913.html (дата обращения 15.01.2018)

Поступила в редакцию 5 февраля 2018 года

A METHOD OF CONTROLLING MOTION OF A VESSEL IN THE SYSTEM OF A MINING PNEUMATIC WINDING PLANT

Tauger V. M., Kazakov Yu. M., Volkov E. B., Leont'ev A. A. – The Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation. E-mail: tauger2016@yandex.ru

The article deals with the motion of an empty skip in the descending pipeline of a pneumatic winding plant. The differential equations of motion are integrated, on the basis of which the basic kinematic parameters of the empty skip were obtained during its descent, which are necessary for calculating the duration of the working cycle and the selection of the components of the skip pneumatic winding plant. The asymptotic value of the velocity for steady skip motion is calculated. The peculiarity of the operation of such an installation is the descent of the empty skip under its own weight. For the design of installations, a mathematical model of the system is necessary: a vessel – a host environment – a pipeline that reflects the kinematics of the skip in the descending pipeline. When calculating systems with a gaseous transport medium, problems arise with determining the effect of the system of the physical properties of the medium on the parameters, in particular, the influence of its compressibility. A difficulty is represented by the mathematical description of installations with a strained operating mode, when the cycle of motion is strictly determined. Mine pneumatic winding systems should function rhythmically with high energy loads, and the length of the pipelines is hundreds of meters. Under such conditions, the physical effects associated with the properties of air of a host and transporting medium must be considered in the mathematical model of the system.

Key words: winding plant; skip; pneumatic system; pipeline; motion control; differential equations of motion; pneumotransport, mine pneumatic winding plant.

REFERENCES

1. Bezhok V. R., and others. *Shakhtnyi pod'em: nauchno-proizvodstvennoe izdanie* [Research and production issue "Shaft lift"]. Donetsk, Iugo-Vostok Ltd Publ., 2007. 624 p.
2. Spivakovskii L. O., Goncharevich I. F. *Spetsial'nye transportiruiushchie ustroistva v gornodobyvaiushchei promyshlennosti* [Special transporters at mining industry]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 128 p.
3. Tauger V. M., Volkov E. B., Kholodnikov Yu. V. [Skip pneumowinding plant with advances energy efficiency]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 2, pp. 77–83.

4. Tauger V. M., Volkov E. B., Kozhevnikov A. O. [Development of skip pipeline pneumatic winding plant]. *Ural'skaia gornaia shkola – regionam: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Proceedings of the International Research-to-Practice Conference “From the Urals mining school – to the regions”]. Ekaterinburg: UrSMU Publ., 2017, pp. 275–276.
 5. Tauger V. M., Kazakov Iu. M., Volkov E. B., Kozhevnikov A. O. [Kinematics of skip in the descending pepiline of a pneumatic winding plant]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2017, no. 7. pp. 96–101. (In Russ.)
 6. Encyclopedia of physics and engineering. Available at: http://www.femto.com.ua/articles/part_1/0913.html (Access date 15.01.2018)
-