УДК 622.6

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-115-121

Динамика груженого скипа шахтной пневмоподъемной установки в период разгона

Леонтьев А. А.¹, Таугер В. М.^{1*}, Волков Е. Б.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

Реферат

Введение. Для расчета составляющих рабочего цикла скиповой пневмоподъемной установки необходимы соотношения, позволяющие вычислить ускорение и скорость груженого скипа в начале движения и являющиеся решением уравнения динамики сосуда, которое учитывает связь расхода, создаваемого нагнетательным агрегатом, с давлением воздушного потока.

Методика проведения исследования. Составлено уравнение динамики, включающее зависимость давления от расхода (аэродинамическую характеристику) в общем виде. В частном случае физической модели установки используется нагнетательный агрегат с линейной аэродинамической характеристикой.

Результаты исследования. Для частного случая получены уравнения, позволяющие теоретически описать кинематические параметры скипа в период неустановившегося движения. Установлено, что ускорение, скорость и перемещение сосуда являются асимптотическими функциями. Найденные выражения для кинематических параметров дают возможность теоретически установить продолжительность периода разгона и путь, который проходит скип за данный период. Предложена методика расчета динамики скипа в период разгона, содержащая вывод аппроксимирующей формулы для аэродинамической характеристики нагнетательного агрегата, подстановку ее в уравнение динамики и получение кинематических параметров скипа путем решения уравнения динамики.

Вывод. Полученные соотношения позволяют рассчитать динамику скипа в период разгона с учетом аэродинамической характеристики нагнетательного агрегата, что необходимо для определения времени рабочего цикла пневмоподъемной установки.

Ключевые слова: пневмоподъемная установка; скип; период разгона; рабочий цикл; уравнение динамики; кинематика; нагнетательная установка; расход воздуха; давление.

Введение. Авторы аналитических работ однозначно указывают на необходимость поиска прогрессивных способов и средств транспортировки ископаемого из шахты на поверхность [1, 2]. Одним из наиболее перспективных видов шахтного транспорта являются устройства, использующие энергию движущегося воздушного потока, т. е. скиповой пневмоподъем. В публикациях, посвященных теоретическому исследованию скиповых пневмоподъемных установок, изучены особенности динамики и кинематики подъема груженого и спуска порожнего скипов по трубопроводам, причем период разгона сосуда подробно не рассмотрен [3, 4]. Проектирование главного подъема включает определение времени рабочего цикла [5, 6]. Для расчета составляющих рабочего цикла скиповой пневмоподъемной установки (СППУ) необходимо получить соотношения, позволяющие вычислить ускорение и скорость груженого скипа в начале движения, т. е. выполнить динамический расчет сосуда в период разгона.

Методика проведения исследования. Процесс разгона скипа воздушным потоком, поступающим в трубопровод от нагнетательного агрегата (воздуходувки), обладает спецификой вследствие «мягкой» аэродинамической характеристики

(далее – характеристики) воздуходувки [7, 8]. Характеристикой турбомашин называется зависимость

$$p = f(Q) \quad (1)$$

где p – избыточное давление потока на выходе; Q – производительность турбомашин (расход в ее выходном патрубке).

Рис. 1. Расчетная схема:
1 – скип, 2 – трубопровод, 3 – воздуходувка; x, y – оси координат
Fig. 1. Calculation model:
1 – skip, 2 – pipeline, 3 – blower;
 x, y – axes of coordinates

Различают теоретическую и действительную характеристики. Характеристика может строиться как для полного, так и для статического давления. Интерес представляет действительная зависимость статического давления от расхода, поэтому в дальнейшем буквой p обозначено избыточное статическое давление.

Величина давления определяет приложенную к скипу активную силу, а производительность воздуходувки при ее нерегулируемом подключении к трубопроводу однозначно связана со скоростью движения скипа. Зависимостью давления от расхода обуславливается непостоянство ускорения скипа в период разгона.

На рис. 1 показана расчетная схема системы.

Примем следующие допущения:

- силы трения между скипом и стенкой трубопровода, а также силы аэродинамического сопротивления движению скипа отсутствуют;
- утечка воздуха между скипом и стенкой трубопровода отсутствует;
- температура воздуха в трубопроводе в течение периода разгона остается постоянной;
- время создания воздуходувкой давления под скипом бесконечно мало.

Первое и второе допущения означают, что КПД системы считается равным единице. Третье допущение позволяет не учитывать термодинамические процессы. Последнее допущение может быть представлено как работа воздуходувки на трубопровод, запертый неподвижным скипом, когда давление под скипом уже создано, однако скип принудительно удерживается в положении $y = 0$.

В исходный момент скип расположен в нижнем положении, воздуходувка развивает давление под скипом, однако скип неподвижен, поэтому производительность воздуходувки $Q = 0$.

Затем скип освобождается, начинается подъем. Уравнение динамики скипа в общем виде [9]:

$$m\ddot{y} = F_{dv} - G,$$

или

$$\ddot{y} = \frac{F_{dv}}{m} - g, \quad (2)$$

где $\ddot{y}$ – ускорение скипа; m – масса груженого скипа; F_{dv} – проекция движущей силы на ось y ; G – вес груженого скипа; g – ускорение свободного падения.

Выразим движущую силу как произведение давления на площадь сечения трубопровода:

$$F_{\text{дв}} = f(Q) \frac{\pi D^2}{4} = \phi(\dot{y}), \quad (3)$$

где D – внутренний диаметр трубопровода; $\dot{y}$ – скорость скипа.

Из выражений (2) и (3) получаем неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка вида [10]

$$\ddot{y} + \psi(\dot{y}) + g = 0, \quad (4)$$

решение которого зависит от вида функции $\psi(\dot{y})$.

Промышленные воздуходувки, как было указано ранее, имеют действительную характеристику в виде наклонной кривой. Функция (1) должна быть получена методом аппроксимации [11], после чего уравнение (4) может быть решено. Рассмотрим частный случай, когда функция $f(Q)$ близка к линейной. Подобные характеристики имеют воздуходувки небольших типоразмеров [12]. Характеристика (линия 1) и аппроксимирующая прямая (линия 2) показаны на рис. 2. Решение уравнения (4)

для данного случая актуально при физическом моделировании СППУ.

Аппроксимирующую функцию удобно представить уравнением

$$p = p_0 \left(1 - \frac{Q}{Q_0} \right),$$

или в виде

$$p = p_0 \left(1 - \frac{\dot{y}}{\dot{y}_0} \right), \quad (5)$$

где p_0 – давление при $Q = 0$; Q_0 – расход при $p = 0$; Q – текущее значение расхода; $\dot{y}_0$ – скорость, соответствующая расходу Q_0 :

$$\dot{y}_0 = \frac{4Q_0}{\pi D^2}. \quad (6)$$

После алгебраических преобразований с учетом выражений (3) и (5) уравнение (4) принимает такой вид:

$$\ddot{y} + a\dot{y} - b = 0, \quad (7)$$

где a, b – постоянные коэффициенты:

Рис. 2. Аппроксимация характеристики
Fig. 2. Characteristic approximation

$$a = \frac{\pi D^2 p_0}{4m\dot{y}_0}; \quad b = \frac{\pi D^2 p_0}{4m} - g. \quad (8)$$

Результаты исследования. Решение уравнения (7) с начальными условиями $(t = 0; p = p_0); (t = 0; Q = 0)$ позволяет найти зависимости перемещения, скорости и ускорения скипа от времени:

$$y = \frac{b}{a}t - \frac{b}{a^2}[1 - \exp(-at)]; \quad (9)$$

$$\dot{y} = \frac{b}{a}[1 - \exp(-at)]; \quad (10)$$

$$\ddot{y} = b \exp(-at). \quad (11)$$

Графиками функций (9)–(11) являются кривые, бесконечно приближающиеся к соответствующим асимптотам (рис. 3).

Ордината точки А соответствует максимальной величине ускорения скипа $\ddot{y}_{\max} = b$.

Ордината точки В

$$\dot{y}_B = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{y}(t) = \frac{b}{a}.$$

Уравнение асимптоты Y, к которой стремится график функции $y(t)$, получается при $t \rightarrow \infty$ в виде выражения

$$Y = \frac{b}{a}t - \frac{b}{a^2}, \quad (12)$$

а ордината точки С – из уравнения (12) при $t = 0$:

$$y_C = -\frac{b}{a^2}.$$

Для расчета продолжительности периода разгона решим уравнение (10) относительно времени:

$$t = -\frac{1}{a} \ln \left(1 - \frac{a\dot{y}}{b} \right) = -\frac{1}{a} \ln \left(1 - \frac{\dot{y}}{\dot{y}_A} \right). \quad (13)$$

Теоретически процесс разгона бесконечен, поэтому целесообразно считать его завершенным, когда текущее значение скорости достигнет величины, мало отличающейся от $\dot{y}_A$. Будем считать период разгона законченным при $\dot{y} = 0,95\dot{y}_A$. Подстановка граничной величины скорости в формулу (13) дает длительность периода разгона:

$$t_p = -\frac{1}{a} \ln 0,05 = \frac{2,996}{a} \approx \frac{3}{a},$$

с учетом формулы (8) для коэффициента a :

$$t_p = \frac{12m\dot{y}_0}{\pi D^2 p_0}.$$

Подстановка величины t_p в формулу (9) позволяет получить перемещение скипа y_p в течение периода разгона:

$$y_p = 2,05 \frac{b}{a^2}.$$

Координаты t_p, y_p показаны на рис. 3.

Рис. 3. Графики функций (9)–(11)
Fig. 3. The graphs of functions (9)–(11)

В реальной СППУ будут возникать механическое и аэродинамическое сопротивления. Их величина в период разгона не остается постоянной, изменяясь достаточно сложным образом, и в настоящее время затруднительно предложить для их описания аналитические зависимости, которые можно было бы ввести в уравнение динамики скипа. Однако качественно оценить влияние нерасчетных сопротивлений вполне возможно: интенсивность изменения ускорения и скорости скипа понизится, зависимость данных параметров от времени утратит асимптотический характер, а наибольшие регистрируемые значения будут ниже теоретических.

Приблизительный расчет динамики скипа в период разгона выполняется в три этапа:

- вывод аппроксимирующей формулы для аэродинамической характеристики нагнетательного агрегата;
- подстановка аппроксимирующей формулы в уравнение динамики скипа;
- получение кинематических параметров разгона скипа путем решения уравнения динамики.

В частном случае, когда аппроксимирующая формула представляет собой линейную зависимость статического давления от производительности

нагнетательного агрегата, расчет динамики скипа рекомендуется выполнять по формулам (6)–(11).

Вывод. Полученные в результате исследования соотношения дают возможность рассчитать динамику скипа в период разгона с учетом аэродинамической характеристики нагнетательного агрегата, что необходимо для определения времени рабочего цикла пневмоподъемной установки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Outlook: Prospects for Recovery in the global Mining Industry. KPMG, 2010. URL: <https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2012/08/building-business-value-part-2.pdf> (дата обращения: 17.12.2018).
2. AAB AB – Mine Hoist Systems. URL: <http://www.mining-technology.com/contractors> (дата обращения: 18.08.2020).
3. 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.
4. Tauger V. M., Leontiev A. A. The calculation of heat exchange processes in the conveying pipe of a skip pneumatic winder // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal. 2019. No. 4. P. 106–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-106-112
5. Братченко Б. Ф., Нечушкин Г. М. Стационарные установки шахт. М.: Недра, 1977. 440 с.
6. Картавый Н. Г. Шахтные стационарные установки. М.: Недра, 1978. 263 с.
7. Industrial Siemens air blowers and turbo blowers. URL: <http://www.bibliotecar.ru> (дата обращения: 17.12.2018).
8. Siemens air blowers and compressors (HV-turbo). URL: [https://swedepump.by/blower%20and%20siemens%20\(hv-turbo\)%20compressor.html](https://swedepump.by/blower%20and%20siemens%20(hv-turbo)%20compressor.html) (дата обращения: 18.12.2018).
9. Степанов А. Г., Корняков М. В. Динамика машин: монография. Иркутск: Иркутский техн. ун-т, 2014. 432 с.
10. Корн Г. А., Корн Т. М. Справочник по высшей математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1978. 720 с.
11. Айвазян С. А. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Том 2. М.: Юнити-Дана, 2001. 432 с.
12. Вихревые воздуходувки – вакуумное оборудование и техника ERSTEVAK. URL: <https://erstvak.com/catalog/vozdukhoduvka/vikhrevaya/> (дата обращения: 23.08.2020).

Поступила в редакцию 2 сентября 2020 года

Сведения об авторах:

Леонтьев Александр Анатольевич – аспирант кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: zufh123@gmail.com

Таугер Виталий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: tauger2016@yandex.ru

Волков Евгений Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: evgeniy.volkov.ursmu@yandex.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-115-121

The dynamics of a laden skip of the shaft pneumatic winding plant during acceleration

Aleksandr A. Leontiev¹, Vitalii M. Tauger¹, Evgenii B. Volkov¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. Ratios for calculating the laden skip acceleration and speed at the motion start are required to calculate skip pneumatic winding plant cycle components. The ratios are the solution to the skip dynamics equation which takes into account the relationship between the flow generated by a power unit and air pressure.

Research methodology. The dynamics equation including the dependence of the pressure on the flow rate (aerodynamic characteristic) in a general form is compiled. In a special case of the unit's physical model, a discharge unit with a linear aerodynamic characteristic is used.

Research result. For a particular case, equations are obtained that allow to theoretically describe the kinematic parameters of a skip in the period of unsteady motion. It is established that the skip acceleration, velocity and displacement are asymptotic functions. The obtained expressions for kinematic parameters make it possible to theoretically determine the duration of the acceleration period and the path that the

skip takes during this period. A method for calculating skip dynamics during acceleration is proposed, which contains approximating formula conclusion for the power unit aerodynamic characteristics, its substitution into the dynamics equation, and obtaining skip kinematic parameters by solving the dynamics equation.

Conclusion. The obtained relations allow to calculate skip dynamics during acceleration taking into account power unit aerodynamic characteristics, which is necessary to determine the working cycle time of the pneumatic winding plant.

Key words: pneumatic winding plant; skip; acceleration period; duty cycle; dynamics equation; kinematics; power unit; air flow; pressure.

REFERENCES

1. Outlook: Prospects for Recovery in the global Mining Industry. KPMG, 2010. Available from: <https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2012/08/building-business-value-part-2.pdf> [Accessed 17 December 2018].
2. AAB AB – Mine Hoist Systems. Available from: <http://www.mining-technology.com/contractors> [Accessed 18 August 2020].
3. Tauger V. M., Kazakov Iu. M., Volkov E. B., Kozhevnikov A. O. Kinematics of skip in the descending pipeline of a pneumatic winding plant. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 7: 96–101. (In Russ.)
4. Tauger V. M., Leontiev A. A. The calculation of heat exchange processes in the conveying pipe of a skip pneumatic winder. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 4: 106–112. Available from: DOI: 10.21440/0536-1028-2019-4-106-112.
5. Bratchenko B. F., Nechushkin G. M. *Permanent installations in shafts*. Moscow: Nedra Publishing; 1977. (In Russ.)
6. Kartavyi N. G. *Permanent installations in shafts*. Moscow: Nedra Publishing; 1978. (In Russ.)
7. Industrial Siemens air blowers and turbo blowers. Available from: <http://www.bibliotecar.ru> [Accessed 17 December 2018].
8. Siemens air blowers and compressors (HV-turbo). Available from: [https://swedepump.by/blower%20and%20siemens%20\(hv-turbo\)%20compressor.html](https://swedepump.by/blower%20and%20siemens%20(hv-turbo)%20compressor.html) [Accessed 18 December 2018].
9. Stepanov A. G., Korniaikov M. V. Dynamics of machinery: monograph. Irkutsk: Irkutskii tekhn. un-t Publishing; 2014. (In Russ.)
10. Korn G. A., Korn T. M. *Advanced mathematics reference for researchers and engineers*. Moscow: Nauka Publishing; 1978. (In Russ.)
11. Aivazian S. A. *Applied statistics. The fundamentals of econometrics. Vol. 2*. Moscow: Iuniti-Dana Publishing; 2001. (In Russ.)
12. ERSTEVAK. *Vortex blowers – ERSTEVAK vacuum equipment and engineering*. Available from: <https://erstvak.com/catalog/vozdukhoduvka/vikhrevaya> [Accessed 23 August 2020]. (In Russ.)

Received 2 September 2020

Information about authors:

Aleksandr A. Leontiev – PhD student of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: zufh123@gmail.com

Vitalii M. Tauger – PhD (Engineering), Associate professor, the Head of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: tauger2016@yandex.ru

Evgenii B. Volkov – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: evgeniy.volkov.ursmu@yandex.ru

Для цитирования: Леонтьев А. А., Таугер В. М., Волков Е. Б. Динамика груженого скипа шахтной пневмоподъемной установки в период разгона // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 115–121. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-115-121

For citation: Leontiev A. A., Tauger V. M., Volkov E. B. The dynamics of a laden skip of the shaft pneumatic winding plant during acceleration. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 115–121 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-115-121