

Шатохин В.М., Деревянко Н.И., Гранько Б.Ф., Клименко М.В.

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
(ул. Сумская, 40. м. Харьков, 61002. Украина; e-mail: shatokhinvlm@gmail.com)***К ДИНАМИКЕ РОТОРНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ОДНИМ ШАРОМ И ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ**

Выполнен структурный анализ роторной резонансной шаровой мельницы оригинальной конструкции с одним рабочим шаром. Составлена система дифференциальных уравнений динамики шара; при этом учтены одна голономная и две неголономные связи шара. Полученные уравнения динамики после их решения, позволят конструктору выполнить расчеты основных рабочих параметров мельницы.

Ключевые слова: роторная резонансная мельница, рабочий шар, система динамических дифференциальных уравнений шара, возможности расчета динамических параметров.

Введение. В современных условиях строительство способствует поиску новых механизмов, снижающих затраты и повышающих производительность изготовления строительных материалов. В частности, это относится к шаровым мельницам, которые широко используются для различных целей во многих отраслях производства. При этом распространились трубные шаровые мельницы, для которых характерны ударный водопадный режим, «мертвая зона» для части обрабатываемого сырья, сложная конфигурация футеровки [1-4, 14].

Цель и задачи исследований. Предлагается новая модель шаровой мельницы, конструкция которой была опубликована в статье [3]; эта мельница состоит из рамы, опирающейся на две опоры, имеющая свой независимый привод для вращения вокруг своей оси; на раме устроен четырехшарнирный параллелограмм, две стороны которого являются кривошипами, на которых закреплена площадка как одна из сторон параллелограмма; противоположно этой площадке сторона параллелограмма совпадает с рамой; кривошипы имеют независимый привод и вращаются синхронно; площадка движется поступательно с той особенностью, что любая точка ее имеет траекторию в виде окружности; на площадке закреплена сферическая оболочка, внутри которой находится шар, являющийся рабочим телом мельницы и при круговом движении оболочки обкатывает внутреннюю поверхность оболочки, разрушая своим

давлением на оболочку и истирая цементное или другое сырье.

Представляется, что предлагаемая схема шаровой мельницы исключит ударное воздействие и «мертвую зону».

В настоящей статье рассматривается динамика шара как важнейшего рабочего органа мельницы в случае, когда модуль (мельница) движется с одной степенью свободы, т.е. работают только кривошипы; при этом движение сферической камеры задано.

Результаты исследования. Составляется механико-математическая модель движения шара в сферической полости оболочки. Вводятся обобщенные координаты и квазискорости. Рассматривается движение шара в сферической камере с центром в точке А и радиусом R, которая совершает заданное поступательное движение (рис. 1). Камеру в этом случае можно трактовать как нестационарную связь. Радиус шара с центром в точке С обозначим через r, а точку его касания со сферической поверхностью – Р. Введем в рассмотрение основную (неподвижную) систему координат $O_1x_1y_1z_1$ и подвижную поступательно перемещающуюся систему координат $Oxyz$.

За независимые обобщенные координаты примем $q_1=x_c$, $q_2=y_c$, $q_3=\psi$, $q_4=\varphi$, $q_5=\vartheta$, где x_c , y_c – координаты центра масс шара в связанной с камерой системе координат; ψ , φ , ϑ – углы Эйлера, определяющие положение осей жестко связанной с шаром си-

стемы координат относительно собственных осей координат, параллельных Ox , Oy , Oz .

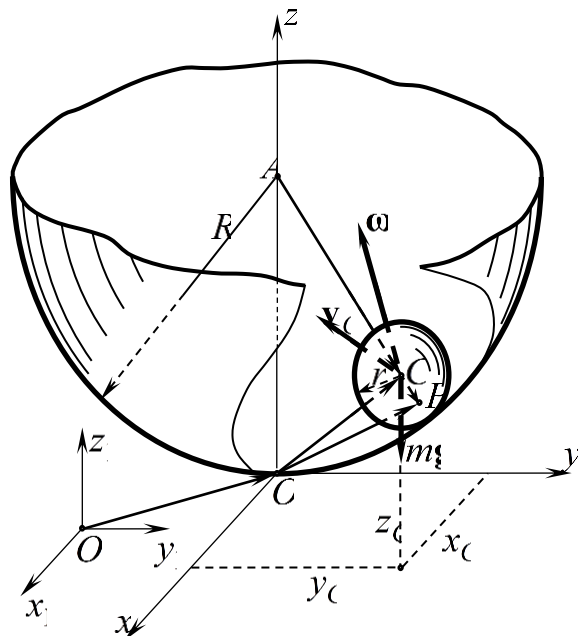


Рис. 1. Схема движения шара в сферической камере

Уравнение голономной (геометрической) связи выражается уравнением

$$z_c = R - \sqrt{(R-r)^2 - x_c^2 - y_c^2} \quad (1)$$

Уравнения неголономных связей найдем из условия отсутствия скольжения шара по сферической поверхности, которое выражается равенством абсолютных скоростей точек касания шара и камеры

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{Pa} &= \mathbf{v}_{Pe} + \mathbf{v}_{Pr} = \mathbf{v}_{Oa} + \mathbf{v}_C + \boldsymbol{\omega} \times \overline{CP} = \mathbf{v}_{Oa}; \\ \mathbf{v}_{Pr} &= \mathbf{v}_C + \boldsymbol{\omega} \times \overline{CP} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где \mathbf{v}_{Pa} , $\mathbf{v}_{Pe} = \mathbf{v}_{Oa}$, \mathbf{v}_{Pr} – абсолютная, переносная и относительная скорости точки P;

$\mathbf{v}_C = \mathbf{v}_{Cr} = [\dot{x}_c \ \dot{y}_c \ \dot{z}_c]^T$ – скорость точки C в подвижной координатной системе (относительная скорость; t – знак транспонирования); $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ – мгновенная угловая скорость шара.

Так как на основании формулы (1) проекция скорости точки C на ось z

$$\dot{z}_c = \frac{x_c \dot{x}_c + y_c \dot{y}_c}{R - z_c} \quad (3)$$

В развернутой форме \mathbf{v}_{Pr} запишется

так

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \frac{x_c \dot{x}_c + y_c \dot{y}_c}{R - z_c} \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ x_c & y_c & z_c - R \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \dot{x}_c - \lambda[\omega_y(R - z_c) + \omega_z y_c] \\ \dot{y}_c - \lambda[\omega_x(R - z_c) + \omega_z x_c] \\ \frac{x_c \dot{x}_c + y_c \dot{y}_c}{R - z_c} + \lambda(\omega_x y_c - \omega_y x_c) \end{bmatrix} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\lambda = \frac{r}{R-r}$.

Третий элемент вектора в последнем столбце этой формулы является линейной комбинацией выражений для первых двух элементов, поэтому условия, налагаемые неголономной связью, оказываются следующими

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_c &= \lambda[\omega_y(R - z_c) + \omega_z y_c], \\ \dot{y}_c &= -\lambda[\omega_x(R - z_c) + \omega_z x_c]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Примем за независимые квазискорости проекции угловой скорости на оси x, y, z [15, 16]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\pi}_1 &= \omega_x = \dot{\phi} \sin \vartheta \sin \psi + \dot{\vartheta} \cos \psi, \\ \dot{\pi}_2 &= \omega_y = -\dot{\phi} \sin \vartheta \cos \psi + \dot{\vartheta} \sin \psi, \\ \dot{\pi}_3 &= \omega_z = \dot{\phi} \cos \vartheta + \dot{\psi}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Таким образом конфигурация изучаемой системы (движущегося шара) определяется пятью обобщенными координатами x_c , y_c , ψ , ϕ , ϑ , но степеней свободы система имеет только три вследствие двух уравнений (5).

Составим уравнения движения шара в форме Аппеля [15, 16]

$$\frac{\partial S}{\partial \dot{\pi}_1} = \Pi_1, \quad \frac{\partial S}{\partial \dot{\pi}_2} = \Pi_2, \quad \frac{\partial S}{\partial \dot{\pi}_3} = \Pi_3 \quad (7)$$

Здесь S функция ускорений Аппеля, которая в данном случае имеет вид

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} [m(\dot{x}_{1c}^2 + \dot{y}_{1c}^2 + \dot{z}_{1c}^2) + I(\dot{\omega}_x^2 + \dot{\omega}_y^2 + \dot{\omega}_z^2)] = \\ &= \frac{1}{2} [m(\dot{x}_{1c}^2 + \dot{y}_{1c}^2 + \dot{z}_{1c}^2) + I(\dot{\pi}_1^2 + \dot{\pi}_2^2 + \dot{\pi}_3^2)] \end{aligned} \quad (8)$$

где m – масса шара; $I = \frac{2}{5} mr^2$ – осевой момент инерции шара.

Для вычисления обобщенных сил Π_1, Π_2, Π_3 , вычислим возможную работу $\delta A = \Pi_1 \delta \pi_1 + \Pi_2 \delta \pi_2 + \Pi_3 \delta \pi_3 = F_x \delta x_{1C} + F_y \delta y_{1C} + F_z \delta z_{1C}$ (9)

В рассматриваемом случае $F_x = F_y = 0, F_z = -mg$. Координаты точки С в неподвижной системе координат

$$\begin{aligned} x_{1C} &= x_{1O} + x_C; \quad y_{1C} = y_{1O} + y_C; \\ z_{1C} &= z_{1O} + z_C = z_{1O} + \\ &+ R - \sqrt{(R-r)^2 - x_C^2 - y_C^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

причем $z_{1O} = \text{const} = 0$. Тогда с учетом (3), (5)

$$\dot{z}_{1C} = \dot{z}_C = \frac{x_C \dot{x}_C + y_C \dot{y}_C}{R - z_C} = -\lambda \dot{\pi}_1 y_C + \lambda \dot{\pi}_2 x_C,$$

а, следовательно,

$$\delta z_{1C} = -\lambda y_C \delta \pi_1 + \lambda x_C \delta \pi_2. \quad (11)$$

Таким образом

$$\delta A = -mg(-\lambda y_C \delta \pi_1 + \lambda x_C \delta \pi_2) = mg \lambda y_C \delta \pi_1 - mg \lambda x_C \delta \pi_2, \quad (12)$$

а значит $\Pi_1 = mg \lambda y_C, \Pi_2 = -mg \lambda x_C, \Pi_3 = 0$.

Для проекций ускорения точки С с учетом формул (3), (5) имеем

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{1C} &= \ddot{x}_{1O} + \ddot{x}_C = \ddot{x}_{1O} + \\ &+ \lambda [\ddot{\pi}_2 (R - z_C) - \dot{\pi}_2 \dot{z}_C + \ddot{\pi}_3 y_C + \dot{\pi}_3 \dot{y}_C] \\ \ddot{y}_{1C} &= \ddot{y}_{1O} + \ddot{y}_C = \ddot{y}_{1O} - \\ &- \lambda [\ddot{\pi}_1 (R - z_C) - \dot{\pi}_1 \dot{z}_C + \ddot{\pi}_3 x_C + \dot{\pi}_3 \dot{x}_C] \\ \ddot{z}_{1C} &= \ddot{z}_{1O} + \ddot{z}_C = \ddot{z}_{1O} - \lambda \dot{\pi}_1 y_C + \lambda \dot{\pi}_2 x_C + \\ &+ \lambda \dot{\pi}_1 \frac{y_C \dot{z}_C}{R - z_C} - \lambda \dot{\pi}_2 \frac{x_C \dot{z}_C}{R - z_C} + \\ &+ \lambda \dot{\pi}_3 \frac{(x_C y_C - y_C x_C)}{R - z_C} + \frac{\dot{x}_C^2 + \dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2}{R - z_C} \end{aligned} \right\} (13)$$

С учетом формул (13) уравнения Аппеля (7) приобретают вид:

$$\left. \begin{aligned} I \ddot{\pi}_1 - \lambda m [(R - z_C)(\ddot{y}_{1O} + \ddot{y}_C) + y_C \ddot{z}_C] &= mg \lambda y_C, \\ I \ddot{\pi}_2 + \lambda m [(R - z_C)(\ddot{x}_{1O} + \ddot{x}_C) + x_C \ddot{z}_C] &= -mg \lambda x_C, \\ I \ddot{\pi}_3 + \lambda m [y_C (\ddot{x}_{1O} + \ddot{x}_C) - x_C (\ddot{y}_{1O} + \ddot{y}_C)] &= 0 \end{aligned} \right\} (14)$$

или окончательно

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_x &= \alpha [(R - z_C)(\ddot{y}_{1O} + \ddot{y}_C) + y_C (\ddot{z}_C + g)], \\ \dot{\omega}_y &= -\alpha [(R - z_C)(\ddot{x}_{1O} + \ddot{x}_C) + x_C (\ddot{z}_C + g)], \\ \dot{\omega}_z &= -\alpha [y_C (\ddot{x}_{1O} + \ddot{x}_C) - x_C (\ddot{y}_{1O} + \ddot{y}_C)], \\ \alpha &= \frac{\lambda m}{I}. \end{aligned} \right\} (15)$$

Дифференциальные уравнения (15) следует интегрировать вместе с выражениями неголономных связей (5).

Начальные условия такие:

при $t=0, x_C = x_{C0}, y_C = y_{C0}, \omega_x = \omega_{x0}, \omega_y = \omega_{y0}, \omega_z = \omega_{z0}$.

Вывод. Показана возможность пополнить разнообразие конструкций шаровых мельниц новым прогрессивным механизмом на базе классической технологии перемалывания сырья на цемент. Необходимо произвести динамические расчеты с учетом дополнительной функции непрерывного перемещения шара по всей внутренней поверхности оболочки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Иванов А.Н. Интенсификация работы шаров в трубных мельницах / А.Н. Иванов, М.М. Шовкун // Науковий вісник будівництва. – 2015.– № 1.– С. 193-197.
2. Балера Н.Д. Комплекс для тонкого измельчения материалов / Н.Д. Балера, А.Т. Гордиенко, С.А. Касай // Науковий вісник будівництва. – 2017.– Т. 89, № 3.– С. 248-252.
3. Клименко М.В. К устройству шаровой мельницы с дополнительной функцией / М.В. Клименко // Науковий вісник будівництва. – 2012.– № 69.– С. 245-250.
4. Андреев С.Е. О внутреннем трении в шаровой мельнице / С.Е. Андреев // Горный журнал. – 1961.– № 2.– С. 62-68.
5. Богданов В.С. Повышение эффективности процесса измельчения в шаровых мельницах / В.С. Богданов, Н.С. Богданов, Н.Д. Воробьев // Известия вузов. Горный журнал. – 1986.– № 11.– С. 35-37.
6. Вердиян М.А. Нужен ли замкнутый цикл для цементных мельниц дискретно-непрерывного действия / М.А. Вердиян, В.С. Богданов, Ю.М. Фадин, И.М. Тынников, Г.Б. Лепетуха // Цемент и его применение. – 1998.– № 1.– С. 26-29.
7. Веригин Ю.А. Теоретическое исследование кинематики и динамики движения загрузки в быстроходной шаровой мельнице с энергообменным устройством / Ю.А. Веригин, Л.Ю. Маликова // Известия вузов. Строительство. – 2001.– № 7.– С. 85-89.
8. Воробьев Н.Д. Математическая модель движения мелющих тел в барабанных мельницах. Общие принципы построения / Н.Д. Воробьев, В.С. Богданов, М.Ю. Ельцов // Известия вузов. Горный журнал. – 1988.– № 8.– С. 116-119.
9. Дзнев С.И. О работе шаровой мельницы при сверхкритических скоростях / С.И. Дзнев // Цветные металлы. – 1962.– № 7.– С. 3-7.

10. Олевский В.А. Наивыгоднейший размер шаров для шаровых мельниц / В.А. Олевский // Горный журнал. – 1984.– № 1.– С. 30-33.
11. Сапожников М.Я. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций / М.Я. Сапожников. – М.: Высшая школа, 1971. – 382 с.
12. Ханин С.И. Закономерности процесса движения мелющих тел в корпусе шаровой барабанной мельницы / С.И. Ханин, Д.Н. Старченко. Белгород: Белгор. гос. технол. ун-т, 2013. – 209 с.
13. Шарапов Р.Р. Шаровые мельницы замкнутого цикла / С.И. Ханин, Р.Р. Шарапов. Белгород: Белгор. гос. технол. ун-т, 2008. – 299 с.
14. Крюков Д.К. Футеровки шаровых мельниц / Д.К. Крюков. – М.: Машиностроение, 1965. – 184 с.
15. Лурье А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье. – М.: Гл. ред. физмат. лит., 1961.– 824 с.
16. Гантмахер Ф.Р. Лекции по аналитической механике / Ф.Р. Гантмахер. – 2-е изд., испр.– М.: Физматгиз, 1966.– 300 с.

Шатохин В.М., Дерев'янюк М.І., Гранько Б.Ф., Клименко М.В. ДО ДИНАМІКИ РОТОРНОГО РЕЗОНАНСНОГО КУЛЬОВОГО МЛИНА З ОДНІЄЮ КУЛЕЮ ТА ДВОМА СТЕПЕНЯМИ ВІЛЬНОСТІ. Виконано структурний аналіз роторного резонансного кульового млина оригінальної конструкції з однією робочою кулею. Складено систему диференціальних рівнянь динаміки кулі; при цьому враховані одна голономна і дві неголономні в'язі кулі. Одержані рівняння динаміки після їх розв'язання, дозволять конструктору виконати розрахунки основних виконавчих параметрів млина.

Ключові слова: роторний резонансний млин, виконавча куля сферична, система динамічних диференціальних рівнянь кулі, можливості розрахунку динамічних параметрів.

Shatokhin V.M., Derevianko M.I., Granko B.F., Klymenko M.V. TO THE DYNAMICS OF A ROTARY BOLL MILL WITH ONE BOLL AND TWO DEGREES OF FREEDOM. Finished structural of the rotary resonance ball mill of the original construction with the one working ball. Made a system of differential equations for the dynamics of the ball with non-holonomic constraints. **Keywords:** rotor resonance mill, holonomic constraints, non-holonomic constraints, the system of dynamic differential equations of the ball.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-92-2-244-250

УДК 697.4

Болотских Н.Н.

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры (ХНУСА)
Ул. Сумская, 40, г. Харьков, 61002, Украина. E-mail: tgvtver@gmail.com*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПУШЕК ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБОГРЕВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Описаны современные тепловые пушки, используемые для локального обогрева в строительстве; приведен их анализ и даны рекомендации по дальнейшему эффективному применению.

Ключевые слова: тепловая пушка, мобильный нагреватель воздуха, прямой и непрямой нагрев, термостат.

Введение. При выполнении строительных, ремонтных и отделочных работ в холодные периоды года для целей локального обогрева достаточно широко используются тепловые пушки (мобильные нагреватели воздуха). Они представляют собой

передвижные либо переносные малогабаритные агрегаты, которые нагревают воздух и подают его к месту производства работ.

Во время строительства различных объектов они эффективно применяются для: локального обогрева небольших по