

УДК 622.732

В.А. Бобин, А.Н. Ланюк

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИЛОВОГО ОРГАНА ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ ТЕРОЧНОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ТВЕРДОЙ ИЗМЕЛЬЧАЕМОЙ ПОРОДОЙ

Семинар № 25

В"Центре изучения природного вещества при комплексном освоении недр" ИГКОН РАН разработана и при помощи НПК "Механобр-техника" построена гироскопическая терочная мельница (ГТМ), не имеющая аналога в мировой практике [1-6].

Актуальность этой разработки определяется практической необходимостью уменьшить удельные энерго- и массозатраты на дезинтеграцию единицы массы однородной исходной природной твердой породы до состояния размолотой сыпучей породы, с гранулометрическим составом, отвечающим регламентированным параметрам обогатительных предприятий, требуются разработки по созданию перспективных измельчителей твердой породы, в основе работы которых заложены в основном принципы истирания, а не ударного дробления исходного сырья истиранием.

ГТМ относится к центробежно-гироскопическим-маятниковым устройствам общего вида, использующим гироскопический принцип создания разрушающих горную породу усилий. Схематический чертеж, поясняющий устройство и основные элементы ГТМ изображен на рис. 1.

Для математического описания работы ГТМ используются центробеж-

ные силы инерции, гироскопические эффекты, сила тяжести, диссиликтивные силы трения, управляющие (демпфирующие) механические колебания гироскопической системы и моменты количества движения электродвигателей, реализующие силовой контакт измельчающих органов мельницы с твердой горной породой.

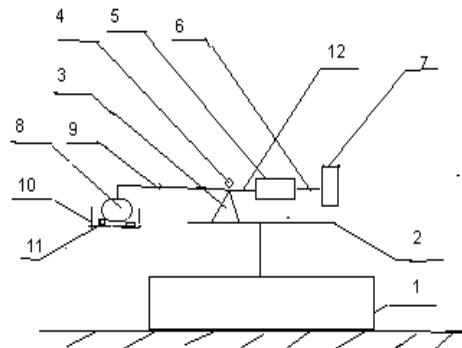


Рис. 1. Гироскопическая терочная мельница (измельчитель) твердой породы: 1 - силовой привод вращения; 2 - горизонтальная грузовая площадка; 3 - опора; 4 - шарнирная ось; 5 - электродвигатель; 6 - вал; 7 - маховик гироскопа; 8 - валок; 9 - ось валка; 10 - размольный стол, на котором находится 11 - измельчаемая порода. Электродвигатель 5 с валом 6 и маховиком 7, установленный на оси валка 9, шарнирно соединенного осью 4 с опорой 3, образуют двухступенчатый гироскоп 12

В сферических (полярных) координатах положение центра масс маятника маховика ГТМ в любой момент времени t определяется значениями трех пространственных независимых переменных, а именно: $\rho(t) = L(t) = \text{const}$ - постоянное по времени в рамках исследуемой физической модели расстояние центра масс маховика маятника ЦГМ до точки его шарнирного подвеса, что соответствует физической модели абсолютно нерастяжимого стержня (нити подвеса маятника);

$\theta(t)$ - угол отклонения центра масс маховика маятника ГТМ от направления вектора силы тяжести (направления вектора ускорения свободного падения g) ;

ϕ - угол поворота центра масс ГТМ вокруг оси, параллельной направлению вектора силы тяжести.

Угловая скорость вращения маховика ГТМ ω вокруг его оси и угловая скорость $\Omega_\phi(t)=d(\phi(t))/dt$ вращения центра масс маховика ЦГМ вокруг оси, параллельной направлению вектора ускорения свободного падения g . В эксперименте, проведенном на модельной установке ИПКОН РАН, значения этих параметров изменялись во времени в широком диапазоне величин и независимо друг от друга.

Для теоретического решения задачи о движении центра масс маховика маятника ГТМ с двумя степенями свободы и расчета действующих при этом на центр масс маховика нестационарных усилий, необходимо решить систему уравнений движения, описывающих в рамках используемой физической модели законы движения центра масс ГТМ и определить зависимость изменения по времени t угловых координат $\theta(t)$ (широта), $\phi(t)$ (долгота).

Система уравнений и граничных условий, описывающая нестационар-

ные нутационные колебания двухстепенного гироскопа ГТМ, имеет вид;
 $\rho(t) = \rho(t_0) = \rho_0 = L = \text{const}$
 $d(I_\theta \Omega_\theta)/dt = M_{\theta g} + M_{\theta G}; I_\theta = mL^2;$
 $\Omega_\theta = d(\theta(t))/dt; M_{\theta g} = mgL \sin(\theta);$
 $M_{\theta v} = 0; M_{\theta c} = 0; M_{\theta G} = I_\omega \Omega_\phi \omega \sin(\theta);$
 $d(I_\phi \Omega_\phi)/dt = 0; I_\phi = mgL^2 (\sin(\theta))^2$

Границные условия:

$t_0 \leq t \leq t_k; \phi(t) = \phi(t_0) = \phi_0 = \text{const};$
 $\theta(t_0) = \theta_0; \Omega_\theta(t_0) = \Omega_{\theta 0}.$

Основы дифференциальных и интегральных численных методов для решения гиперболических уравнений изложены в работах [7, 8, 9].

Текст программы для описания нестационарного движения центра масс ГТМ написан на языке ФОРТРАН и состоит из блока описания величин, блока присвоения исходных данных, блока расчета исходной стационарной траектории центра масс гироскопа, блока решения основной системы уравнений для определения нестационарного движения центра масс ЦГМ релаксационным методом и блока записи на диск и печати результатов численных расчетов.

Основные физические параметры, характеризующие перемещение центра масс маховика гироскопа мельницы:

IB – удельный по массе вертикальный импульс центра масс маховика гироскопического маятника; $IB = \int a_v(t) dt$, a_v - вертикальное ускорение (m/c^2) при этом, интегрирование ведется по физическому времени в пределах $0 \leq t \leq T_k$, T_k – период затухающих колебаний.

IR - удельный по массе радиальный импульс количества движения центра масс гироскопического маятника; $IR = \int a_r(t) dt$, a_r – радиальное ускорение во вращающейся системе координат; $0 \leq t \leq T_k$.

$a_{v,c} = IB/T_k$ – величина среднего по периоду затухающих колебаний вер-

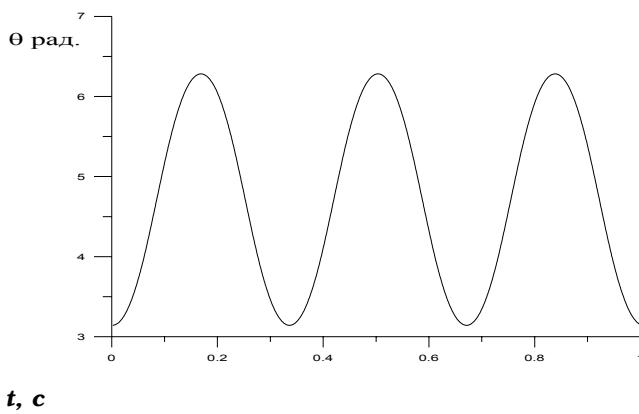


Рис. 2

тикального ускорения; $a_r = IR/\Gamma_k$ – величина среднего по периоду затухающих колебаний радиального ускорения.

IX – удельный по массе горизонтальный импульс количества движения центра масс маховика гирокомпенсаторного маятника в направлении оси ОХ стационарной декартовой системы координат: $IX = \int a_r(t) \cos(\Omega(t)) dt$.

IY – удельный по массе горизонтальный импульс количества движения центра масс маховика гирокомпенсаторного маятника в направлении оси ОY стационарной декартовой системы координат: $IY = \int a_r(t) \sin(\Omega(t)) dt$.

При этом выполняется равенство: $IR^2 = IX^2 + IY^2$.

Для проверки точности и совпадения результатов численных расчетов изменения по времени основных параметров ГТМ была рассчитана зависимость величины угла качания $\theta(t)$, математического маятника без учета затухания колебаний маятника (рис. 2).

Численные расчеты на ПЭВМ PENTIUM-2 производились при изменении физического времени в интервале от 0 до 1с. ($0 \leq t \leq 1$ с), при этом использовались конечно-разностные схемы Эйлера первого, второго и третьего порядка аппроксимации по времени на

равномерных разностных сетках и релаксационный интегральный метод решения системы интегральных уравнений (число разностных ячеек при разбиении расчетного интервала времени на равномерные ячейки изменялось для реализации внутреннего контроля точности численных расчетов дискретным образом и равнялось соответственно 500, 1000 и 2000).

В результате численных расчетов, проведенных на трех вышеописанных равномерных разностных сетках, было получено, что значения основных величин, характеризующих колебательный процесс математического маятника, (значение величин периода колебаний, амплитуды колебаний маятника) с приемлемой для практики точностью не зависит от размеров использованных разностных сеток и порядка аппроксимации разностных схем. Время счета типичного варианта для математического маятника составляло 5-10 с, число итераций – 1000-2000.

Из анализа вида кривой, изображенной на рис. 2, следует, что величина периода колебаний маятника $T = 0.33$ с, тогда как из классической формулы для случая малых колебаний математического маятника около положения равновесия – $T = 2\pi(l/g)^{1/2}$, получается результат $T = 0.28$ с, при этом отличие величины периода колебаний, полученного из теории малых колебаний от значения T , полученного в численном расчете составляет 15 %.

На рис. 3 представлена графическая зависимость величины вертикального ускорения $a_v(t)$ центра масс маятника ГТМ от физического времени t при отсутствии трения. В резуль-

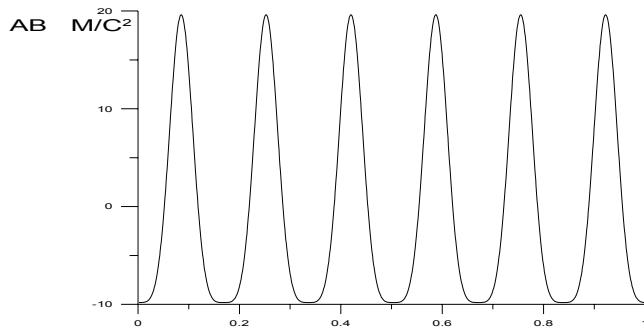


Рис. 3

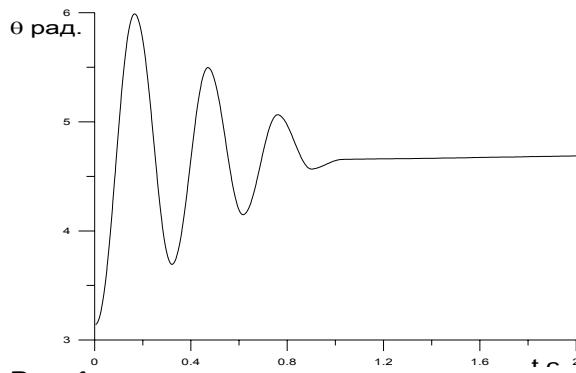


Рис. 4

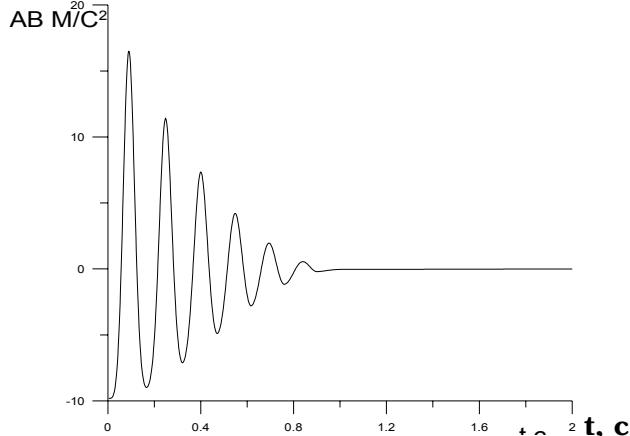


Рис. 5

тате сравнения данных точного и численного решений для частных случаев нахождения центра масс маятника в горизонтальном положении, ($\theta = \pi$) ,

при котором $a_B = g = -9.81 \text{ м/с}^2$ и в вертикальном положении ($\theta = 3/2\pi$), при котором $a_B = 2g = 19.62 \text{ м/с}^2$, получается хорошее совпадение данных точного и численного решений (с точностью до 0.1%). В результате проведенных численных расчетов было получено, что изменение вертикального и радиального удельных импульсов за период колебаний маятника практически равно 0 ($IB \approx 10^{-4} \text{ м/с}$, $IR \approx 10^{-4} \text{ м/с}$).

В свою очередь при наличии трения в шарнирном подвесе маятника зависимость величины угла его качания имеет вид затухающих колебаний (рис. 4). Анализ этой кривой, показывает, что маятник до полного затухания колебательного процесса совершает 3 колебания. Среднее значение периода затухающих колебаний колебательного процесса $T_C = 0.32 \text{ с}$, что на 14 % превышает величину периода незатухающих колебаний. относительная ошибка составляет 15 %. Согласно принятой в теории колебаний и теории обыкновенных дифференциальных уравнений терминологии, структура фазовой диаграммы вблизи особой точки равновесия математического маятника $\theta=3/2\pi$ называется устойчивым фокусом [10].

На рис. 5 изображена зависимость величины вертикального ускорения a_B

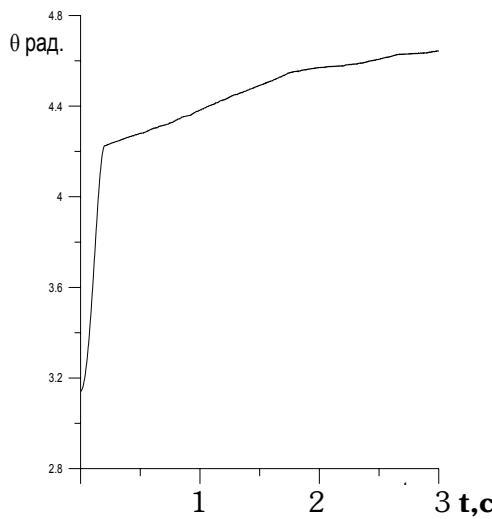


Рис. 6

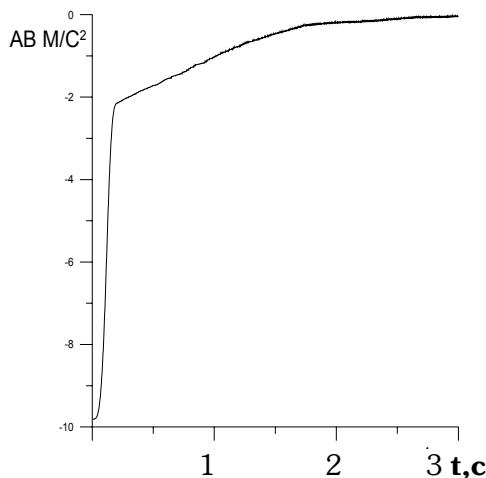


Рис. 7

центра масс маятника ГТМ от физического времени t , измеряемого в секундах, согласно кривой на рис. 4. Из сравнительного анализа кривых, изображенных на рис. 3 и рис. 5 следует, что величина максимального вертикального ускорения центра масс маятника уменьшилась по сравнению со случаем незатухающих колебаний на 12.5 % и равна 16.5 м/с^2 .

При соответствующих критических значения трения в шарнирном подвесе маятника его зависимость его угла качания носит апериодический, а не колебательный характер (рис. 6), при этом маятник переходит из исходного горизонтального положения в конечное вертикальное положение. Длительность апериодического процесса, как следует из анализа кривой, изображенной на рис. 6, $T_k \approx 3\text{s}$.

Соответствующая кривой на рис. 6 зависимость вертикального ускорения ab для рассматриваемого апериодического процесса качаний исследуемого маятника представлена на рис. 7, из анализа которого следует, что значение вертикального ускорения в любой момент времени неотрицательно.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель, созданы, отложены и проверены на работоспособность на ее основе метод, алгоритм и программа расчета траектории движения рабочего органа ГТМ и усилий, действующих на центр масс ее маховика, позволяющие в режиме реального времени моделировать взаимодействия силового органа мельницы с твердой измельчаемой породой.

2. В ходе проведения численных расчетов был выявлен механизм и способ реализации таких основных режимов работы ГТМ, при которых создаются значительные вертикальные и горизонтальные усилия, возникающие при взаимодействии рабочего органа гироколической мельницы с фрагментами породы и действующие на маховик гироколапа, величина которых в десятки раз превышает вес маховика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобин В.А., Ланюк А.Н.* Метод создания сжимающих усилий с помощью гироскопического пресса, ГИАБ, № 10, М., 2003, с. 161.
2. *Бобин В.А., Воронюк А.С., Ланюк А.Н.* Принцип измельчения минерального сырья в разрушающих гироскопических устройствах, ГИАБ, № 1, М., 2004, с. 266.
3. *Бобин В.А., Ланюк А.Н.* Новый метод создания усилий при бурении скважин за счет электродинамического воздействия с внешними полями, ГИАБ, № 2, М., 2004, с. 251.
4. *Бобин В.А., Ланюк А.Н.* Гироскопическая мельница - эталонный прибор для получения природного гранулометрического состава минералов, XI Международная конференция., Технология, оборудование и сырьевая база горных предприятий строительных материалов, Санкт-Петербург, 2004, с. 207.
5. *Бобин В.А., Воронюк А.С., Ланюк А.Н.* Идея использования гироскопической силы как физической основы новых энерго-сберегающих технологий в горном деле, ГИАБ, № 3, М., 2005, с. 290.
6. *Бобин В.А., Воронюк А.С., Ланюк А.Н.* Принцип измельчения минерального сырья в разрушающих гироскопических устройствах, № ГИАБ 1, М., 2004, с. 266.
7. *Механика. Новое в зарубежной науке.* Выпуск 15. Редакторы серии А.Ю. Ишлинский, Г.Г. Черный. Метод граничных интегральных уравнений, Вычислительные аспекты и приложения в механике, М., Мир, 1978, 207 с.
8. Кунин С.Э. Вычислительная физика, Перевод с английского А.Д. Баркалова и А.Н. Матвеева, Под редакцией проф. А.Н. Матвеева, М., Мир, 1992, 518 с.
9. *Пирумов У.Г.* Численные методы, Учебное пособие для студ. вузов, 2-е издание, М., Дрофа, 2003, 224 с.
10. *Яблонский А.А., Никифорова В.М.* Курс теоретической механики, М., 2004, 763 с. ГИАБ

Коротко об авторах

Бобин В.А., Ланюк А.Н. – ИПКОН РАН.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 25 симпозиума «Неделя горняка-2007». Рецензент д-р техн. наук, проф. А.А. Абрамов.



ИНФОРМАЦИЯ

В Горном информационно-аналитическом бюллетене № 1, 2009 г. в статье автора *В.А. Гневашевой* «Образование как фактор производства в условиях постиндустриального общества» в сведениях об авторе допущена ошибка. Следует читать: *Гневашева В.А.* – кандидат экономических наук, директор центра социологии молодежи Института фундаментальных и прикладных исследований Московского гуманитарного университета.