УДК 621.926.77

А.А. Грабский, А.В. Покаместов, В.А. Бобин

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИСТИРАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ТЕРОЧНОЙ МЕЛЬНИЦЕ С РАБОЧИМ ОРГАНОМ, УПРАВЛЯЕМЫМ ГИРОСКОПОМ

Аннотация. Изложена научная основа работы терочной мельницы с рабочим органом, управляемым двухстепенным гироскопом, и реализован гироскопический принцип создания тангенциальных усилий истирания горных пород для их дезинтеграции с помощью двухстепенного гироскопа. Его научную основу составляют следующие четыре положения: сдвиговое истирание твердого геоматериала по энергоемкости на порядок величины эффективнее его разрушения с помощью сжатия; усилия истирания создаются за счет исключительно гироскопических сил с помощью двухстепенного гироскопа; а их величина прямо пропорциональна величине угловой скорости маховика гироскопа, его моменту инерции и угловой скорости его вращения вокруг оси силового привода; причем устойчивая работа осуществляется счет автоматического регулирования величины гироскопического момента по механизму отрицательной обратной связи. Создана физико-математическая модель нестационарного движение рабочего органа гироскопической терочной мельницы при наличии переменного по времени значения силы трения в подвесе и переменных по времени величин управляющих моментов электродвигателей. Разработана программа расчета динамических параметров гироскопической терочной мельницы с центральной загрузкой пород для реализации процесса истирания горных пород, спроектировать и провести экспериментальную проверку работоспособности ее экспериментального образца, имеющего эффективность работы более 0,01 т/ч/кВт. Доказано экспериментально, что работа разрушения частиц горных пород в гироскопической терочной мельнице описывается уравнением Риттингера, причем подведенная энергия затрачивается преимущественно на деформацию сдвига за счет касательных напряжений.

Ключевые слова: горные породы, касательные напряжения, истирание, трение, гироскопическая терочная мельница, двухстепенный гироскоп, эффективность.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-168-176

Применяемые в промышленности способы разрушения твердых горных пород требуют высоких энергозатрат, обладают малым к.п.д. (не более 3—5%) и большими весовыми показателями [1].

Анализ существующих технических устройств, машин и оборудования по разрушению горных пород показывает, что их высокая энерго- и металлозатратность определяется тремя основными причинами, а именно: значительной массой рабочего органа этих устройств, которая достигает нескольких тонн; одновременным использованием рабочего органа как элемента, создающего разрушающее усилие, так и качестве силового элемента; отсутствием у системы управления деятельностью рабочего органа свойств системы автоматического регулирования с отрицательной обратной связью, что приводит к катастрофическому разрушению конструкции устройства [1—5].

Устранения этих причин можно достичь только за счет использования прин-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12. С. 168–176.
© А.А. Грабский, А.В. Покаместов, В.А. Бобин. 2018.

ципиально новых способов, машин и механизмов, эффективно реализующих процесс разрушения горных пород.

К числу таких способов относится принципиально новый метод дезинтеграции горных пород, использующий гироскопические силы в качестве усилий истирания в терочных мельницах.

В этой связи актуальной для теории и практики современных горных машин является задача изучения динамического процесса истирания горных пород в терочных мельницах (ТМГ) с рабочим органом, управляемым гироскопом [6]. Эти исследования продолжают разработки в области решения проблемы технологии дробления и измельчения руд и других твердых материалов, которая в Российской Федерации решалась в работах академиков К.Н. Трубецкого, В.А. Чантурия, М.И. Агошкова, В.В. Ржевского, Л.А. Вайсберга, докторов технических наук Л.И. Барона, Л.И. Кантовича, С.Е. Андреева, В.И. Ревнивцева и многих др.

Физическую основу работы ТМГ определяет гироскопический принцип создания усилий истирания горных пород для их дезинтеграции [7]. Его научную основу составляют следующие четыре положения:

- сдвиговое разрушение (истирание) твердого геоматериала по энергоемкости на порядок величины эффективнее его разрушения с помощью сжатия (раздавливания);
- усилия истирания в ТМГ, по разрушению горных пород создаются за счет исключительно гироскопических сил с помощью двухстепенного гироскопа;
- величина усилия истирания в ТМГ прямо пропорциональна величине угловой скорости маховика гироскопа (ω), его моменту инерции (J) и угловой скорости его вращения вокруг оси силового привода (Ω), но обратно пропорциональна расстоянию от шарнира до центра валка (L);
- устойчивая работа ТМГ осуществляется счет автоматического регулирования величины гироскопического момента по механизму отрицательной обратной связи [8].

Для реализации на практике научных основ гироскопического принципа создания усилий истирания горных пород была разработана конструкция ТМГ с центральной загрузкой породы (рис. 1).

ТМГ с центральной загрузкой пород, включает: *1* — электродвигатель рабочей площадки; *2* — основание; *3* — горизонтальная площадка; *4* — опора; *5* — шарнир; *6* — электродвигатель с валом; *7* — маховик; *8* — валок; *9* — рычаг; *10* — размольный стол; *11* — балансировочные грузы; *12* — цилиндрический кожух; *13* — усеченный конус центрального загрузочного устройства; *14* — цилиндр горизонтальной площадки; *15* — шарикоподшипник; *16* — разгрузочный усеченный конус; *17* — цилиндр разгрузочного усеченного конуса; *18* — центральный рассекатель породы; *19* — перфорированные отверстия; *20* — измельчаемая порода; *21* — бункер.

ТМГ работает следующим образом: силовой привод *1* раскручивает горизонтальную площадку *3* с установленным на ней валком *8* до угловой скорости Ω вокруг вертикальной оси вращения, электродвигатель *6* раскручивает маховик *7* до угловой скорости ω, направление вектора которой совпадает с направлением рычага *9* валка *8*.

При этом на двухстепенной гироскоп действует гироскопический момент

$$(I\, M_г I = J_м \times \omega \times \Omega \times \sin\alpha,$$

где $J_м = m_м\, R_м^2 /2$ — момент инерции маховика *7*; $m_м$ и $R_м$ — соответственно масса и радиус маховика *7*, α — угол между векторами ω и Ω), а на валок *8* действует вертикальная гироскопическая сила $F_д$

$$(I\, F_д I = I\, M_г I/L = J \times \omega \times \Omega \times \sin\alpha/L,$$

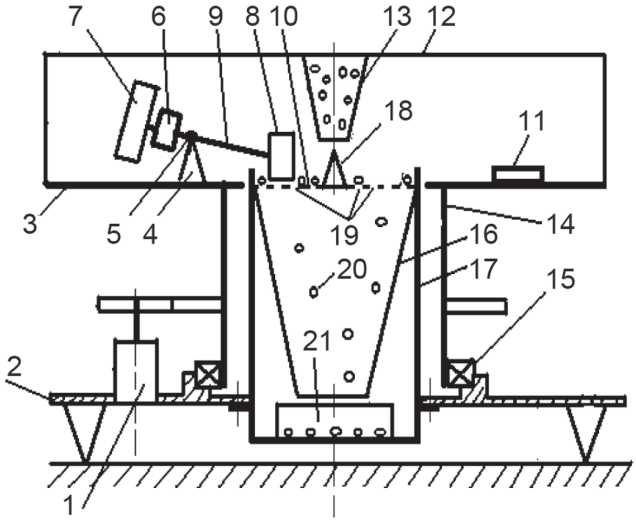


Рис. 1. ТМГ с центральной загрузкой пород
Fig. 1. Gyroscope grinding mill with central feed

где *L* — расстояние от шарнира *5* и до центра валка *8*. Направление этой силы определяется знаком тригонометрической функции). Измельчаемая горная порода *20* через усеченный конус центрального загрузочного устройства *13* попадает на размольный стол *10*, по которому она равномерно распределяется с помощью центрального рассекателя *18*. При истирании на размольном столе порода дезинтегрируется и через перфорированные отверстия *19* размольного стола *10* сначала попадает в разгрузочный усеченный конус *16* и далее в бункер *21*.

Схема сил и моментов, реализующих рабочий процесс разрушения горной породы в ГМ приведены на рис. 2 и 3.

Уравнения движения и граничные условия [9], описывающие движение цент-

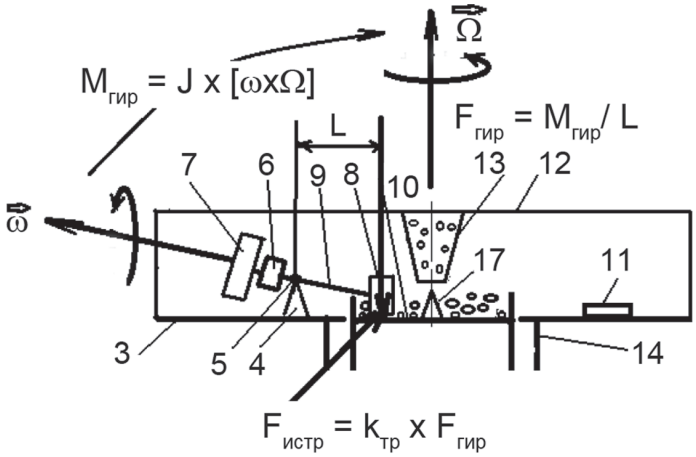


Рис. 2. Схема сил и моментов, реализующих рабочий процесс истирания горной породы в ТМГ (главный вид)
Fig. 2. Scheme of forces and moments of rock grinding in gyroscope mill: frontal view

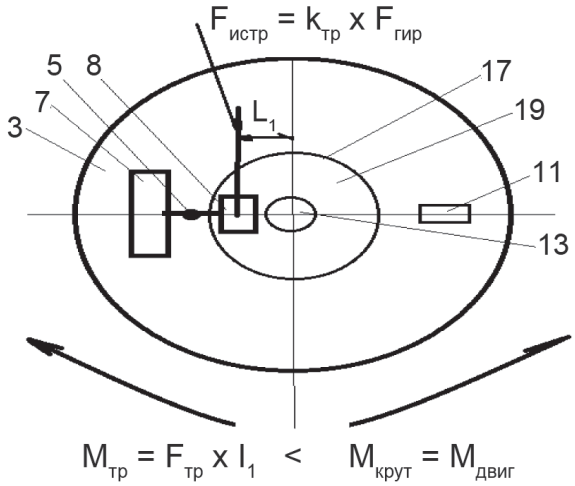


Рис. 3. Схема сил и моментов, реализующих рабочий процесс истирания горной породы в ТМГ (вид сверху на рабочий стол)

Fig. 3. Scheme of forces and moments of rock grinding in gyroscope mill: top view of worktable

ра масс ТМГ при наличии нутационных колебаний имеют вид:

Граничные условия:

$$t_0 \le t \le t_к;\ \varphi(t) = \varphi(t_0) = \varphi_0 = \text{const};$$
$$\theta(t_0) = \theta_0;\ \Omega_\theta(t_0) = \Omega_{\theta_0}. \qquad (1)$$

Уравнения движения:

$$\rho(t) = \rho(t_0) = \rho_0 = L = \text{const}$$
$$d(I_\theta\Omega_\theta)/dt = M_{\theta g} + M_{\theta G};\ I_\theta = mL^2;$$
$$\Omega_\theta = d(\theta(t))/dt;$$
$$M_{\theta g} = mgL\sin(\theta);\ M_{\theta v} = 0;\ M_{\theta c} = 0;$$
$$M_{\theta G} = I_\omega\Omega_\varphi\omega\sin(\theta); \qquad (2)$$
$$d(I_\varphi\Omega_\varphi)/dt = 0;\ I_\varphi = mgL^2(\sin(\theta))^2$$

где I_θ — момент инерции маятника относительно его оси вращения; m — масса маятника; L — расстояние центра масс маятника до его оси вращения (точки подвеса); Ω_θ — угловая скорость вращения маятника относительно вертикальной оси вращения; g = 9,8 м/с^2 — ускорение свободного падения у поверхности Земли; $M_{\theta g}$ — момент силы тяжести относительно оси вращения маятника; $M_{\theta v}$ — момент сил трения на оси вращения маятника; $к_{tr}$ — коэффициент трения на оси вращения маятника; $M_{\theta B}$ — управляющий (демпфирующий механические колебания системы) момент сил электродвигателей относительно оси вращения маятника; d — диаметр оси вращения маятника; t — время, независимая переменная; t_0 — начальный момент времени; $t_к$ — конечный момент времени.

Программа вычисления параметров ГМ, описанных системой уравнений (2), выражающих физико-математическую модель процесса взаимодействия силового органа гироскопической мельницы с твердой измельчаемой породой, позволяет рассчитывать в режиме реального физического времени силовые нагрузок разрушения горной породы.

Она имеет блочную структуру 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 ГМ релаксационным методом и блока записи на диск и печати результатов численных расчетов.

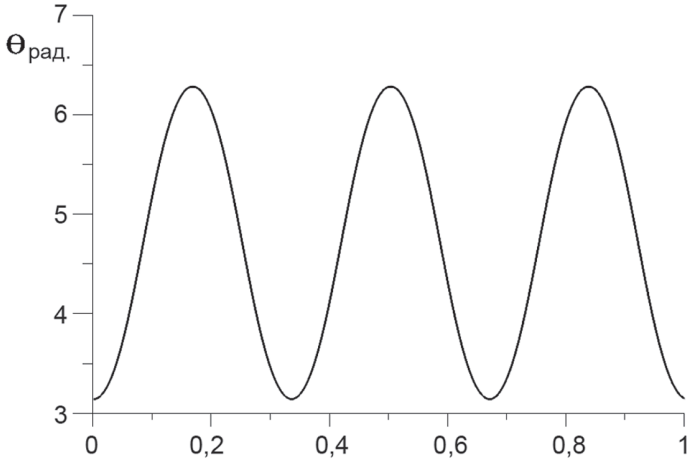


Рис. 4. Зависимость величины угла качания θ(t) от физического времени t для экспериментального образца ТМГ без учета трения в шарнирном подвесе

Fig. 4. Rolling angle θ(t) versus physical time t for pilot gyroscope grinding mill without regard to friction in pivot suspension

Для проверки точности и совпадения результатов численных расчетов изменения по времени основных параметров ГМ по разработанным алгоритму и программе, проведено сравнение результатов численных расчетов с известными аналитическими (точными решениям), которые были получены для простейших колебательных систем (для математического маятника), при этом отличие величины периода колебаний, полученного из теории малых колебаний от значения, полученного в численном расчете составляет 15% (рис. 4).

При всех численных расчетах использовались конечно-разностные схемы Эйлера первого, второго и третьего порядка аппроксимации по времени на равно-

Таблица 1

Динамические параметры ГМ с центральной загрузкой породы
Dynamic parameters of gyroscope mille with central feed

№	Динамические параметры	Обозначение	Единица измерений	Количественные данные
1	Период колебаний маятника ГМ	T	С	0,28
2	Угол качания рабочего органа ТМГ	θ	Рад	0—6
3	Вертикальное ускорение центра масс рабочего органа ТМГ	$A_в$	м/с^2	16,5
4	Угол качания рабочего органа ТМГ в апериодическом режиме	θ	Рад	3,2—4,6
5	Вертикальное ускорение центра масс рабочего органа ТМГ в апериодическом режиме	$A_в$	м/с^2	–10
6	Угловая скорость вращения рабочего стола	ω	с$^{-1}$	0—38
7	Угловая скорость вращения маховиков гироскопов	Ω	с$^{-1}$	0—400

мерных разностных сетках и релаксационный интегральный метод решения системы интегральных уравнений [10—11]. При этом число разностных ячеек (К9) при разбиении расчетного интервала времени на равномерные ячейки изменялось для реализации внутреннего контроля точности численных расчетов дискретным образом.

В ходе проведения численных расчетов в соответствии с «Методикой физического и математического моделирования работы гироскопической мельницы для деструкции горной породы» были получены и обоснованы динамические параметры гироскопических мельниц с центральной загрузкой породы, значения которых приведены в табл. 1.

Значениях этих параметров обеспечивают эффективную и устойчивую работу гироскопической мельницы на всех режимах работы.

Лабораторные экспериментальные исследования с целью проверки работоспособности экспериментального образца гироскопической мельницы проводились в ООО «НПП Профиль-Т».

Технические параметры испытуемой мельницы ГМ в сравнении с параметрами известных мельниц типа «Титан» и СМД представлены в табл. 2.

Сравнение технических параметров показывает, что экспериментальный образец гироскопической мельницы имеет практически ту же эффективность (0,01—0,02 т/ч/кВт), что и выпускаемые серийно мельницы типа «Титан», и в два с лишним раза превосходит по этому показателю мельницу СМД-493Б, причем по показателю удельной эффективности (3—4 т/ч/кВт/т массы установки) опережает известные мельницы почти на четыре порядка величины.

В ходе испытания экспериментального образца ТМГ был проверен основополагающий аспект гипотезы разрушения, позволяющий определить физику процесса разрушения горных пород в рассматриваемом типе мельниц, т.е. установить роль нормальных и касательных напряжений в этом процессе.

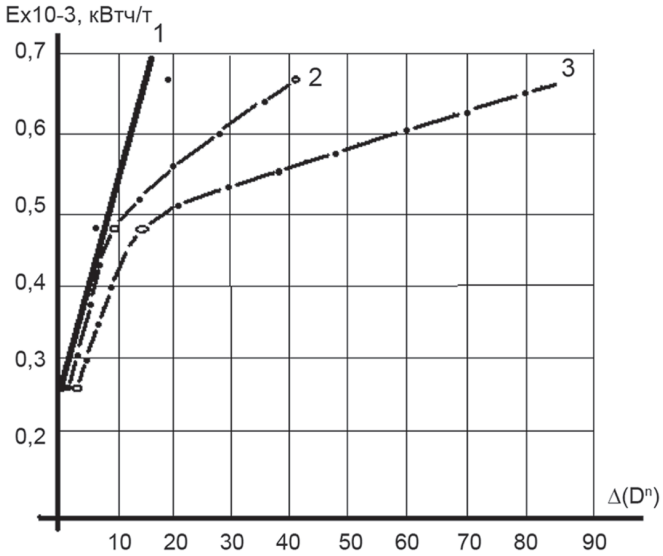
Для руды Узельгинского месторождений была проверена зависимость значений работы деформации одного куска горной породы от его характерного размера (диаметра исходной фракции горной породы) ($E = f(\Delta(D^n)$, где $n = 2; 2{,}5; 3$), и результаты представлены в табл. 3 и на рис. 5.

Эти данные убедительно показывают, что в ТМГ энергия затрачивается преимущественно на деформацию сдвига за счет касательных напряжений, так как данные по значению энергии, затрачиваемой на разрушение (E), группируются около кривой *1* на рис. 5, что свидетельствует о том, работа разрушения описывается уравнением Риттингера вида $E = K_R \times \Delta(D^2)$ [12]. При этом коэффициент пропорциональности для руды Узельгинского месторождения оценивается величиной равной $K_R = 0{,}032 \times 10^3$ кВтч/т мм^2.

Таблица 2

Сравнительные технические параметры мельниц «Титан», СМД и ГМ
Comparison of technical parameters of Titan, SMD and gyroscope mills

Параметры	Титан М-63	Титан М-125	Титан М-160	СМД-493Б	ГМ
Q, т/ч	1—3	3—15	10—55	0,2—10	$0{,}2 \times 10^{-3}$
N, кВт	110	305	850	55	24×10^{-3}
m, т	8	22	35	12,6	$2{,}8 \times 10^{-3}$
$Э = Q/N$, т/ч/кВт	0,009	0,01	0,012	0,0036	0,01
$Э_{уд} = Э/m$, т/ч/кВт/т	0,0011	0,0045	0,00034	0,00029	3,61



1 - гипотеза Риттингера 2 - гипотеза Бонда 3 - гипотеза Кирпичева-Кику

Рис. 5. Доказательство гипотезы разрушения, реализуемой в ТМГ, за счет усилий истирания
Fig. 5. Proof of hypothesis of disintegration by shearing effect in gyroscope grinding mill

Таблица 3

№	Размер исходной фракции, мм	Размер конечной фракции, мм	$\Delta(D)$, мм	$\Delta(D^2)$, мм^2	$\Delta(D^{2,5})$, мм^{2,5}	$\Delta(D^3)$, мм^3	$Э_E$, кВтч/т
Медно-колчеданная руда Узельгинского месторождения							
1	+4 ÷ –5	0,1	4,4	19,4	40,6	85,4	$0,67\times10^{-3}$
2	+2 ÷ –3	0,1	2,4	5,8	8,9	13,9	$0,48\times10^{-3}$
3	+1 ÷ –2	0,1	1,4	1,96	2,3	2,74	$0,25\times10^{-3}$

Таким образом, изучение динамического процесса истирания горных пород в терочных мельницах (ТМГ) с рабочим органом, управляемым гироскопом позволило:

• заложить научную основу ее работы и реализовать гироскопический принцип создания усилий истирания горных пород для их дезинтеграции с помощью двухстепенного гироскопа;

• создать физико-математическую модель нестационарного движение рабочего органа ТМГ при наличии переменного по времени трения в подвесе и переменных по времени величин управляющих моментов электродвигателей;

• разработать программу расчета динамических параметров ТМГ с центральной загрузкой пород для реализации процесса истирания горных пород, спроектировать и провести экспериментальную проверку работоспособности экспериментального образца ТМГ, имеющей эффективность работы более 0,01 т/ч/кВт;

• доказать экспериментально, что работа разрушения частиц горных пород в ТМГ описывается уравнением Риттингера, причем подведенная энергия затрачивается преимущественно на деформацию сдвига за счет касательных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аренс В.Ж.* Горная наука. Понятия. Структурные схемы. — М.: НИТУ «МИСиС», 2016. — 48 с.

2. *Науки* о Земле. Вчера, сегодня, завтра. Материалы III международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, июль 2017 г.). — СПб.: Свое издательство, 2017. — 42 с.

3. *Перспективы* развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов. Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием посвященная 55-летию кафедры автоматизации производственных процессов (Иркутск, 19—20 апреля 2017 г.). — Иркутск, изд-во ИРНИТУ, 2017. — 220 с.

4. *Цыпин Е.Ф.* Информационные методы обогащения полезных ископаемых. Учебное пособие. — Екатеринбург, Изд-во УГГУ, 2015. — 206 с.

5. *Пыталев И.А.*, *Рыльников А.Г.* Информационные методы управления качеством рудопотоков на горных предприятиях. — М.: Медиа Мир, 2015. — 188 с.

6. *Бобин В.А.*, *Покаместов А.В.*, *Бобина А.В.* Гироскопическая мельница с центральной загрузкой горной породы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 11. — С. 263—267.

7. *Покаместов А.В.*, *Бобина А.В.* Новый физический принцип создания и регулирования усилиями истирания за счет гироскопического эффекта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 3. — С. 182—186.

8. *Грабский А.А.*, *Покаместов А.В.* Научные основы нового гироскопического принципа создания усилий разрушения в горных машинах и устройствах для разрушения горных пород истиранием // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6.

9. *Atkinson B.K.* Fracture Mechanics of Rock. London: Academic Press, 1987. 546 p.

10. *Wang S., Elsworth D., Liu J.* Rapid decompression and desorption indused energetic failure in coal // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015. Vol. 7. Iss. 3. P. 345—350.

11. *Smith T.G.*, *Lange G.D.*, *Marks W.B.* Fractal methods and results in cellular morphology — dimensions, lacunarity and multifractals // Journal of Neuroscience Methods. 1996. Vol. 69. Iss. 2. P. 123—136.

12. *Лавриненко А.А.*, *Гольберг Г.Ю.*, *Свечникова Н.Ю.* Теория и практика применения флокулянтов в обогащении углей. — Магнитогорск-М.: Изд-во МГТУ, 2014. — 77 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Грабский Александр Адольфович[1] — доктор технических наук, профессор, e-mail: a.a.grabsky@yandex.ru,
Покаместов Александр Викторович[1] — аспирант, e-mail: pokamest@bk.ru,
Бобин Вячеслав Александрович — доктор технических наук, e-mail: bobin_va@mail.ru, ИПКОН РАН,
[1] МГИ НИТУ «МИСиС».

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 12, pp. 168–176.

Analysis of dynamic disintegration of rocks in gyroscope grinding mill

Grabsky A.A.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: a.a.grabsky@yandex.ru,
Pokamestov A.V.[1], Graduate Student, e-mail: pokamest@bk.ru,
Bobin V.A., Doctor of Technical Sciences, e-mail: bobin_va@mail.ru,
Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia,
[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Abstract. The scientific basis is presented for the operation of a one-axis gyroscope mill, and the gyroscopic effect on creation of the tangential forces to disintegrate rocks is described. The scientific basis of the processes includes four provisions: the energy efficiency of disintegration of solid geomaterials by shearing and friction is higher by an order of magnitude than by compression; shearing forces are created exclusively by one-axis gyroscope; the value of shearing forces is directly proportional to the angular velocity and inertia moment of the spinner as well as the angular velocity of the gyroscope around the axis of the power drive; stable operation is ensured by the automated control of the gyroscopic moment by the mechanism of negative feedback. The physico-mathematical model of nonstationary motion of gyro under time-variant friction force in suspension and time-variant driving moments of electric motors is constructed. The program is developed for calculating dynamic parameters of a gyroscope grinding mill with central feed, which allows design and testing of a pilot gyro mill with the overall performance more than 0.01 t/h/kW. It is experimentally proved that disintegration of rock particles in the gyroscope grinding mill is described by Rittinger's Law, and the energy is mostly spent to deformation of particles by shear under friction stresses.

Key words: rocks, shear stress, disintegration, friction, gyroscope grinding mill, one-axis gyro, efficiency.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-168-176

REFERENCES

1. Arens V. Zh. *Gornaya nauka. Ponyatiya. Strukturnye skhemy* [Mining science. Concepts. Block diagram], Moscow, NITU «MISiS», 2016, 48 p.

2. *Nauki o Zemle. Vchera, segodnya, zavtra. Materialy III mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (g. Sankt-Peterburg, iyul' 2017 g.)* [Earth science. Yesterday, today, tomorrow. Materials of the III International scientific conference (St. Petersburg, July 2017)], Saint-Petersburg, Svoe izdatel'stvo, 2017, 42 p. [In Russ].

3. *Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh i mineral'nykh resursov. Materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem posvyashchennaya 55-letiyu kafedry avtomatizatsii proizvodstvennykh protsessov (Irkutsk, 19—20 aprelya 2017 g.)* [Prospects of development of technology of processing of hydrocarbon and mineral resources. Proceedings of the VII all-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 55th anniversary of the Department of automation of production processes (Irkutsk, April 19-20, 2017)], Irkutsk, izd-vo IRNITU, 2017, 220 p. [In Russ].

4. Tsypin E. F. Informatsionnye metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. Uchebnoe posobie [Information methods of mineral processing. Educational aid], Ekaterinburg, Izd-vo UGGU, 2015, 206 p.

5. Pytalev I. A., Ryl'nikov A. G. *Informatsionnye metody upravleniya kachestvom rudopotokov na gornykh predpriyatiyakh* [Information methods of quality management at mining enterprises], Moscow, Media Mir, 2015, 188 p.

6. Bobin V. A., Pokamestov A. V., Bobina A. V. Giroskopicheskaya mel'nitsa s tsentral'noy zagruzkoy gornoy porody [Gyroscopic mill with a Central loading of rock], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no 11, pp. 263—267. [In Russ].

7. Pokamestov A. V., Bobina A. V. Novyy fizicheskiy printsip sozdaniya i regulirovaniya usiliyami istiraniya za schet giroskopicheskogo effekta [New physical principle for creating and managing the efforts of abrasion due to the gyroscopic effect], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 3, pp. 182—186. [In Russ].

8. Grabskiy A. A., Pokamestov A. V. Nauchnye osnovy novogo giroskopicheskogo printsipa sozdaniya usiliy razrusheniya v gornykh mashinakh i ustroystvakh dlya razrusheniya gornykh porod istiraniem [The scientific basis of the new gyroscopic principle of destruction in mining machines and devices for the destruction of rocks by abrasion], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012, no 6. [In Russ].

9. Atkinson B. K. *Fracture Mechanics of Rock*. London: Academic Press, 1987. 546 p.

10. Wang S., Elsworth D., Liu J. Rapid decompression and desorption indused energetic failure in coal. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2015. Vol. 7. Iss. 3, pp. 345—350.

11. Smith T. G., Lange G. D., Marks W. B. Fractal methods and results in cellular morphology — dimensions, lacunarity and multifractals. *Journal of Neuroscience Methods*. 1996. Vol. 69. Iss. 2, pp. 123—136.

12. Lavrinenko A. A., Gol'berg G. Yu., Svechnikova N. Yu. Teoriya i praktika primeneniya flokulyantov v obogashchenii ugley [Theory and practice of application of flocculants in the beneficiation of coals], Magnitogorsk-Moscow, Izd-vo MGTU, 2014, 77 p.