

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ИСТИРАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯХ

Бобина А.В.¹, Грабский А.А.²

¹ НПП «Профиль-Т», Москва, Россия (129515, г. Москва, ул. 1-я Останкинская, д. 7А), e-mail: annabobini@mail.ru.

² ФГБОУ ВПО «Московский государственный горный университет», Москва, Россия (119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, д. 6), e-mail: a.a.grabsky@yandex.ru.

В данной работе впервые теоретически получена закономерность для производительности гироскопического измельчителя (ГИ), которая зависит от физико-механических свойств измельчаемой горной породы, основных конструктивных параметров ГИ, а также от параметров технологического процесса измельчения, а именно: угловых скоростей маховиков гироскопов и горизонтальной площадки. В ходе проведенных экспериментов доказано, что экспериментальные значения производительности ГИ прямо пропорциональны $(1/\sigma_{cp}^2)$, ω^2 , Ω^3 и $(1/R^3)$, что соответствует аналитически полученной закономерности, причем отличие экспериментальных значений от теоретических не превышает 20%, что и следовало подтвердить в ходе экспериментов. Впервые был спроектирован, выполнен в металле и использован при исследованиях экспериментальный образец гироскопического измельчителя с центральной загрузкой горной породы через полый вал.

Ключевые слова: гироскопический измельчитель, горные машины, энергоэффективность, дезинтеграция горных пород.

EXPERIMENTAL STUDIES OF REGULARITIES WORKING PROCESS OF AN ATTRITION OF ROCKS IN GYROSCOPIC GRINDERS

Bobina A.V.¹, Grabsky A.A.²

¹ NPP Profil-T, Moscow, Russia (129515, Moscow, 1st Ostankinskaya street, 7A), e-mail: annabobini@mail.ru.

² Moscow State Mining University, Moscow, Russia (119991, Moscow, GSP-1, Leninsky prospekt, 6), e-mail: a.a.grabsky@yandex.ru.

In this work for the first time the regularity for productivity of gyroscopic grinders (GG), which depends on the physical and mechanical properties of crushed rock, the key structural parameters of GG, and also parameters of technological process of crushing, namely: angular speeds of flywheels of gyroscopes and horizontal platform, is theoretically received. During the performed experiments it's proved that the experimental values of productivity of GG are directly proportional $(1/\sigma_{cp}^2)$, ω^2 , Ω^3 and $(1/R^3)$. This fact matches to the analytically received regularity, and the difference of experimental values from the theoretical ones doesn't exceed 20 %, as it was necessary to confirm during the experiments. The experimental model of the gyroscopic grinder with a central load of rock through the hollow shaft was designed, performed in metal and was used in research for the first time.

Keywords: gyroscopic grinder, mountain cars, power efficiency, disintegration of rocks.

Анализ существующих методов и технологий дезинтеграции горных пород показывает, что в основном используются методы дробления, а не истирания, что приводит к разрушению их природной зерновой структуры.

В связи с этим становится актуальной проблема разработки энергоэффективных горных машин и устройств, методик их технико-экономической оценки, позволяющих определять перспективу их использования в горной промышленности.

Существенного результата в этой области теории и практики горных машин можно достичь только за счет использования принципиально новых гироскопических

измельчителей горных пород, принцип работы которых основан на создании и регулировании усилий истирания за счет использования гироскопических сил, что не имеет аналога как в России, так и за рубежом.

В России проблемы технологии и экономики процессов дробления и измельчения руд и других твердых материалов решались в работах академиков К.Н. Трубецкого, В.А. Чантурия, М.И. Агошкова, В.В. Ржевского, члена-корреспондента Л.А. Вайсберга, докторов технических наук Л.И. Барона, Л.А. Красовского, А.С. Воронюка, С.Е. Андреева, В.А. Перова, В.В. Зверевича, Л.Ф. Биленко, В.И. Ревнивцев, Ю.А. Чернегова и др. [1–3].

Известные устройства по разрушению горных пород имеют малый к.п.д., большие весовые показатели и энергозатраты.

Повысить эффективность работы устройств по дезинтеграции горных пород возможно, если отказаться от их ударного дробления и перейти на технику дезинтеграции породы с помощью мельниц истирания, среди которых наиболее перспективными являются гироскопические измельчители (ГИ) горной породы.

В них рабочий процесс измельчения подчиняется закону Риттингера, причем энергетические затраты на измельчение значительно меньше, чем аналогичные величины для дисковых истирателей, которые широко используются как для лабораторных исследований, так и в промышленности, в частности для получения гранулометрического состава горных пород.

Анализ устройств для дезинтеграции, в которых использовалась гироскопическая сила, показал, что они прошли путь от зерновой мельницы сухого измельчения и роликомаятниковой мельницы для помола зерна до мельницы сухого измельчения растиранием, которая позволяет проводить дезинтеграцию горных пород с твердостью по шкале М.М. Протоdjаконова до 12 единиц [4].

Схематически конструкция ГИ с центральной загрузкой породы через полый вал представлена на рисунке 1.

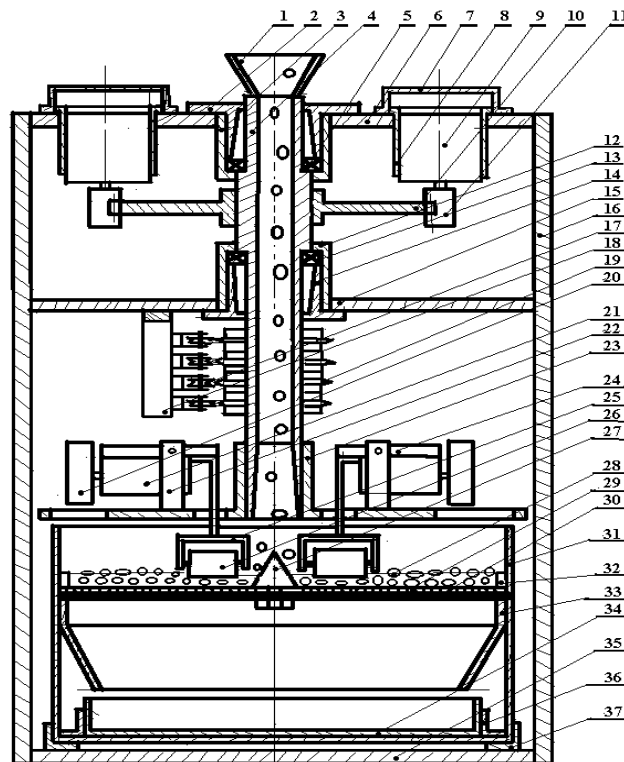


Рис. 1. Конструкция гироскопического измельчителя:

1 – загрузочный конус; 2 – крышка узла подшипника; 3 – держатель подшипника; 4 – полый вал вращения; 5 – упорный подшипник; 6 – верхняя конструктивная площадка; 7 – защитная крышка силового электродвигателя; 8 – втулка силового электродвигателя; 9 – силовой электродвигатель; 10 – ведомая шестерня редуктора; 11 – ведущая шестерня редуктора; 12 – держатель нижнего подшипника; 13 – упорный подшипник; 14 – крышка нижнего подшипника; 15 – средняя конструктивная площадка; 16 – стойка; 17 – подвижные электрические контакты; 18 – держатель электрических контактов; 19 – неподвижные контакты; 20 – маховик гироскопа; 21 – электродвигатель гироскопа; 22 – стойка гироскопа; 23 – горизонтальная рабочая площадка; 24 – рычаг; 25 – держатель валка (рабочий орган); 26 – валок (6 штук, образующих три симметричные пары, расположенные от оси горизонтальной площадки 23 на расстоянии соответственно 0,03, 0,06 и 0,09 м, на рисунке 1 показаны только два валка, чтобы не загромождать его); 27 – рассекатель горной породы; 28 – горная порода; 29 – сетка рабочего стола; 30 – непроницаемое основание рабочего стола; 31 – корпус рабочего стола; 32 – фиксирующее кольцо; 33 – разгрузочный конус; 34 – бункер; 35 – нижняя конструктивная площадка; 36 – направляющая бункера; 37 – направляющая корпуса рабочего стола.

ГИ с загрузкой породы через полый вал вращения размольного стола работает следующим образом: силовой привод, включающий силовые двигатели (9), ведомую (10) и ведущую (11) шестерни редуктора, закрепленные на полем валу вращения (4), раскручивает горизонтальную рабочую площадку (23) с установленными на ней валками (рабочий орган)

(26) до угловой скорости Ω вокруг вертикальной оси вращения, электродвигатели (21) раскручивают маховики (20) до угловой скорости ω , направление вектора которой совпадает с направлением рычагов (24) валков (26). При этом на каждый из шести двухстепенных валков гироскопа, образованного электродвигателем (21) и маховиком (20), действует гироскопический момент, величина которого определяется формулой

$$IM_{\Gamma}I = J_M \omega \Omega \sin \alpha, \quad (1)$$

где $J_M = m_M R_M^2 / 2$ – момент инерции маховика 20, m_M и R_M – соответственно масса и радиус маховика 20, α – угол между векторами ω и Ω . При этом непосредственно на каждый из шести валков 26 действует вертикальная гироскопическая сила F_d , равная

$$IF_dI = IM_{\Gamma}I / l_1 = J_M \omega \Omega \sin \alpha / l_1, \quad (2)$$

где l_1 – расстояние от шарнира 25 и до центра валка 26. Значение силы истирания, генерируемой каждым из шести валков, вычисляется согласно следующей формуле:

$$F_{истр} = K \times F_d = K \times J_M \omega \Omega \sin \alpha / l_1, \quad (3)$$

где K – коэффициент трения.

Измельчаемая горная порода (28) через усеченный конус центрального загрузочного устройства 1 попадает через полый вал вращения 4 на рабочий стол (29), по которому она равномерно распределяется с помощью центрального рассекателя (27). При истирании на рабочем столе (29) порода дезинтегрируется и через перфорированные отверстия (30) рабочего стола (29), который закреплен в корпусе (31) фиксатором (32), сначала попадает в разгрузочный усеченный конус (33) и далее в бункер (34), установленный на основании (35) с направляющими бункера (36) и направляющими рабочего стола (37).

При работе ГИ его рабочие органы перекрывают всю поверхность рабочего стола радиусом, на котором размещается $n_{\text{част}}$ частиц горной породы диаметром $2R$. За один оборот вращения всей системы они смогут истереть (срезать) объем породы $V_{\text{сег}}$, представляющий собой часть шара, называемого шаровым сегментом.

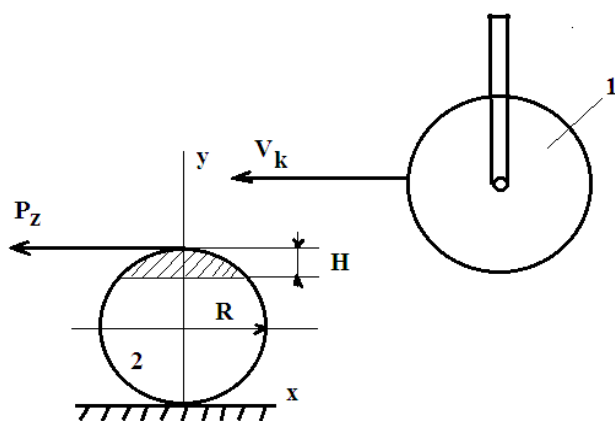


Рис. 2. Механизм взаимодействия рабочего органа ГИ (1)

с частицей горной породы (2).

Срезание шарового сегмента реализуется за счет действия силы $P=F_{\text{истр}}=Kx F_d=Kx J_m \times \omega \times \Omega \times \sin \alpha / l_1$, а условие среза шарового сегмента определяется из условия прочности материала горной породы на срез $[\sigma]_{\text{среза}}=P_z/S_{\text{среза}}$, где $S_{\text{среза}} = \pi a^2$, a – радиус основания шарового сегмента.

$$\text{Производительность ГИ } Q=m/T=(R_{\text{диск}}^2/R_{\text{фр}}^2) \times V_{\text{сег}} \times \rho \times \Omega, \quad (4)$$

где $m = N \times V_{\text{порода}} \times \rho$, где ρ – плотность горных пород, а $T = n_{\text{цикл}} \times t$, где $t = 1/\Omega$.

После ряда упрощений формула (4) примет вид:

$$Q=\rho \times (K \times J_m \times R_{\text{диск}} \times \omega / l_1 / [\sigma]_{\text{среза}})^2 \times (\Omega / R_{\text{фр}})^3 / 4/\pi \quad (5)$$

В формулу (5) входят восемь основных величин, определяющих производительность ГИ, которые можно разделить на три группы. Первую группу составляют величины, которые определяют физико-механические свойства измельчаемой горной породы: это ее плотность (ρ), коэффициент трения породы (K), прочность горной породы на сдвиг ($[\sigma]_{\text{среза}}$) и размер радиуса фракционной частицы ($R_{\text{фр}}$). Вторую группу образуют величины, которые определяют основные конструктивные параметры ГИ, а именно: радиус диска рабочего стола, где происходит истирание ($R_{\text{диск}}$), момент инерции маховиков гироскопов (J_m) и расстояние от шарнира (25) и до центра валка (26) (l_1). И, наконец, третью группу составляют величины, характеризующие параметры технологического процесса, а именно: угловая скорость маховиков гироскопов (ω) и угловая скорость вращения горизонтальной площадки с установленными на ней гироскопами (Ω).

Формула устанавливает закономерности изменения производительности ГИ от восьми основных параметров, а именно: она изменяется прямо пропорционально плотности горной породы, квадратам коэффициента трения, момента инерции маховиков, радиуса диска рабочего стола, угловой скорости маховиков гироскопов, а также кубу угловой скорости горизонтальной площадки; и обратно пропорциональна квадратам расстояния от шарнира до центра валка, прочности горной породы на сдвиг а также кубу радиуса фракционной частицы.

Эти закономерности являются важнейшими для проектирования и разработки ГИ с заданными технико-экономическими параметрами.

Проверка работоспособности основных элементов конструкции ГИ включает достижение определенных технических характеристик, для определения которых необходимо знать уровень потребления электроэнергии (мощность), производительность ГИ и его вес.

В качестве горных пород использовались образцы угля, галенита, цеолита, шунгита, железистых кварцитов карбонатно-силикатной руды и кварца, при этом загрузочная фракция была представлена фракцией диаметра от 2 до 10 мм, а производительность ГИ (Q , т/ч) оценивалась по фракции диаметром менее 0,1 мм, собираемого в бункере ГИ.

Определенные в результате экспериментов технические характеристики ГИ представлены в таблице 1 в сравнении с известными дисковыми измельчителями.

Таблица 1 – Технические характеристики ГИ

Параметры	ИД-130	ИД-175	ИД-250	ЛДИ-65	ГИ
Исходная крупность породы, мм	до 3	до 10	до 10	до 2	до 10
Конечная крупность породы, мм	0,044	0,05	0,08	0,05	0,06
Q , кг/ч	8	20	40	1	3-10
N , кВт	1,1	1,5	5,5	0,37	0,04-0,1
m , кг	55	80	160	17	5
$\Theta=Q/N$, кг/ч/кВт	7,3	13,3	7,3	2,7	75-100
$\Theta_{уд}=\Theta/m$, кг/ч/кВт/кг	0,13	0,17	0,045	0,16	15-20

Данные таблицы 1 показывают, что в ходе работы спроектирован и создан ГИ, энергоэффективность которого в 5-7 раз, а удельная энергоэффективность в 100 раз больше, чем у дисковых истирателей аналогичного назначения. Разработанный ГИ является устройством для дезинтеграции горных пород, которое не имеет аналога за рубежом.

Целый комплекс экспериментальных исследований направлен на проверку формулы (5) для производительности ГИ в зависимости основных параметров, значение которых подается изменению и регулированию (рис. 3-6).

Они показывают, что экспериментальные значения производительности ГИ прямо пропорциональны $(1/\sigma_{cp}^2)$, ω^2 , Ω^3 и $(1/R^3)$, что соответствует аналитически полученной формуле (5), причем отличие экспериментальных значений от теоретических не превышает 20%, что и следовало подтвердить в ходе экспериментов.

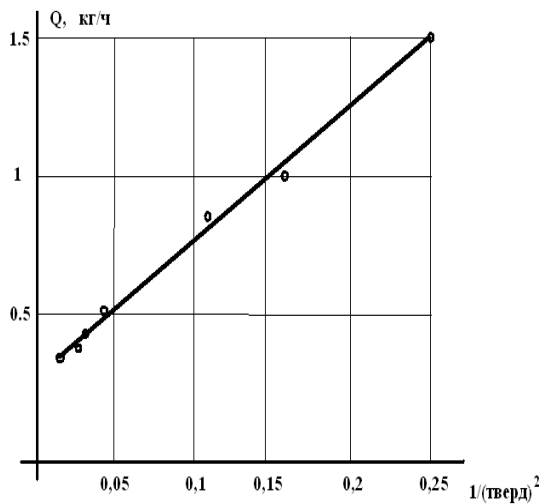


Рис. 3. Зависимость $Q = f(1/\sigma_{cp}^2)$.

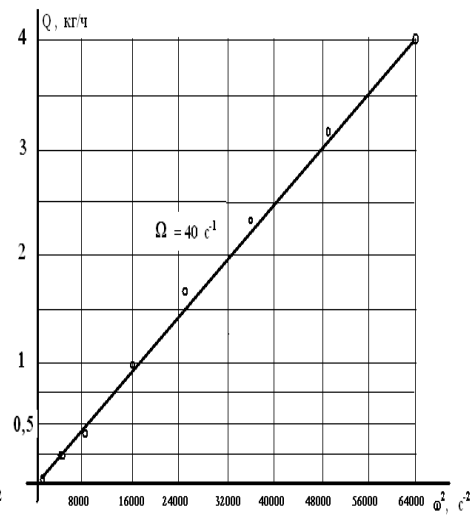


Рис. 4. Зависимость $Q = f(\omega^2)$.

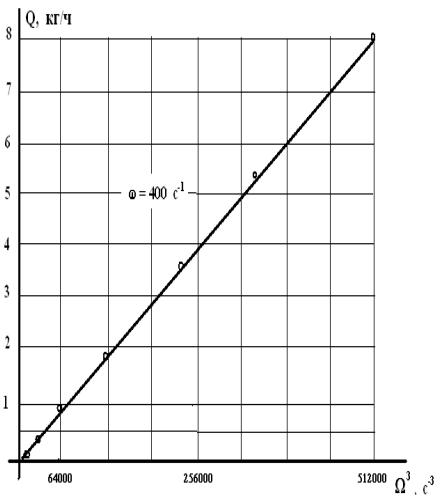


Рис. 5. Зависимость $Q = f(\Omega^3)$.

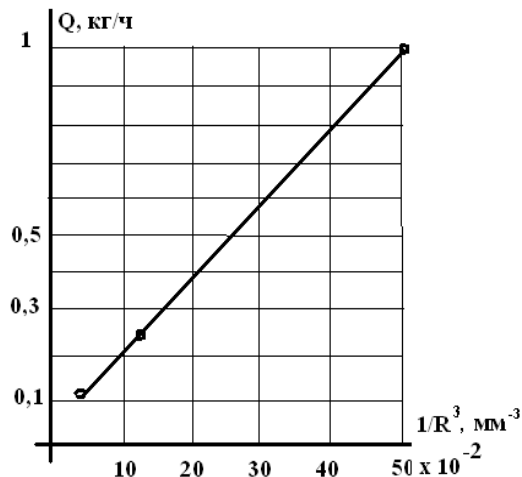


Рис. 6. Зависимость $Q = f(1/R^3)$.

Таким образом, эксперименты показали, что ГИ является энергоэффективным устройством по разрушению горных пород, которое не имеет аналога за рубежом.

Выводы

Основные полученные выводы и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Представлена закономерность для производительности ГИ, которая зависит от физико-механических свойств измельчаемой горной породы, основных конструктивных параметров ГИ, а также параметров технологического процесса измельчения, а именно: угловых скоростей маховиков гироскопов и горизонтальной площадки.
2. Впервые спроектирован, выполнен в металле и использован при исследованиях экспериментальный образец гироскопического измельчителя с центральной загрузкой

горной породы через полый вал, эффективность работы которого составила более 60 кг/ч/кВт, а удельная эффективность 12 кг/ч/кВт/т массы установки, что соответственно в 4 и 100 раз выше, чем у существующих устройств аналогичного типа.

3. В ходе экспериментов доказано, что экспериментальные значения производительности ГИ прямо пропорциональны $(1/\sigma_{cp}^2)$, ω^2 , Ω^3 и $(1/R^3)$, что соответствует аналитически полученной формуле (5), причем отличие экспериментальных значений от теоретических не превышает 20%, что и следовало подтвердить в ходе экспериментов.

Список литературы

1. Бобин В.А., Покаместов А.В., Бобина А.В. Гироскопическая мельница с центральной загрузкой горной породы // ГИАБ, МГГУ. – 2009. – № 11. – С. 263–267.
2. Покаместов А.В., Бобина А.В. Технический регламент получения гранулометрического состава горных пород с помощью гироскопического измельчителя // ГИАБ, МГГУ. – 2012. – № 3. – С. 178–181.
3. Ревнивцев В.И., Зарогатский Л.П., Барзуков О.П. О динамическом уравнивании конусных инерционных дробилок // Обогащение руд. – 1987. – № 5. – С. 30–33.
4. Трубецкой К.Н., Вайсберг Л.А., Бобин В.А., Ланюк А.Н. и др. Гироскопический измельчитель сухой горной породы : патент РФ № 2248242. 2005. Бюл. № 2.
5. Чантурия В.А. и др. Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов. – М. : ИПКОН РАН, 2006. – 352 с.

Рецензенты

Леухин А.Н., д.ф.-м.н., к.т.н., профессор кафедры математики, информатики и информационной безопасности АНО ВПО «Межрегиональный открытый социальный институт», г. Йошкар-Ола.

Рябов И.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры проектирования и производства ЭВС ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет», г. Йошкар-Ола.