

АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ДВИЖЕНИЯ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ ПРИ ТОНКОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Ю.В. Дмитрак, В.А. Атрушкевич, Л.С. Адамова
ИПКОН РАН, г. Москва, Россия.

Аннотация: В статье приведены результаты теоретических исследований и математического моделирования процесса измельчения горных пород в мельницах различных типов. Рассмотрены вопросы создания цифровых двойников мельниц и повышения энергоэффективности их эксплуатации. Установлено, что для каждого вида горной породы и заданной тонины её помола существует диапазон значений среднего размера частиц готового продукта, а также тип мельниц, при которых процесс измельчения будет осуществляться с минимальной энергоёмкостью.

Ключевые слова: горные породы, тонкое измельчение, тенденции развития измельчительного оборудования, движение мелющих тел, цифровые двойники мельниц, повышения энергоэффективности и эксплуатации.

ANALYSIS OF SCIENTIFIC TRENDS IN THE RESEARCH OF THE MOVEMENT OF GRINDING BODIES AT FINE GRINDING OF ROCKS

Y.V. Dmitrak, V.A. Atrushkevich, L.S. Adamova
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

Abstract: The article presents the results of theoretical studies and mathematical modeling of the process of grinding rocks in mills of various types. The issues of creating digital twins of mills and increasing the energy efficiency of their operation are considered. It has been established that for each type of rock and a given fineness of its grinding, there is a range of values for the average particle size of the finished product, as well as the type of mills in which the grinding process will be carried out with a minimum energy intensity.

Keywords: rocks, fine grinding, grinding equipment development trends, grinding media movement, mill digital twins, energy efficiency and operation improvements.

Измельчение, как технологический этап обогащения полезных ископаемых и, в частности, рудоподготовки является одним из наиболее энергоёмких процессов в горнорудной отрасли. Объёмы производства концентрата на современных горно-обогатительных фабриках постоянно увеличиваются, вследствие чего растут типоразмеры оборудования применяемого для измельчения. Затраты электроэнергии возрастают нелинейно с увеличением габаритов мельниц, что негативно сказывается на себестоимости готовой продукции.

Логично, что инженеры, конструкторы, производственники и исследователи давно занимаются актуальными вопросами снижения удельной энергоёмкости измельчения горных пород в мельницах различных типов. Предлагались различные варианты, технические решения и технологические схемы работы мельниц для снижения энергоёмкости их работы. Но практически все специалисты, занимающиеся вопросами измельчения горных пород, сходятся во мнении о том, что мощным резервом снижения энергоёмкости измельчения является оптимизация движения мелющей загрузки, потребляющей более 90% всей расходуемой мельницей энергии [1].

Цель исследований: анализ научных тенденций в исследованиях движения мелющих тел при тонком измельчении горных пород.

Методы исследований: анализ исследований, посвящённых работе мельниц, использующих мелющие тела для измельчения горных пород, исследования по моделированию движения мелющей загрузки в помольных камерах измельчительного оборудования,

Результаты исследований и их обсуждение.

В настоящее время для тонкого и сверхтонкого измельчения горных пород применяются мельницы различных типов. Это молотковые, валковые, струйные и другие типы мельниц, а также дезинтеграторы (рис. 1).

а)/а



б)/b



в)/c



г)/d



Рис. 1. Некоторые типы оборудования для тонкого и сверхтонкого измельчения горных пород: а) валковая мельница; б) молотковая мельница; в) струйная мельница; г) - дезинтегратор / Fig. 1. Some types of equipment for fine and ultrafine grinding of rock: a) - roller mill; b) - hammer mill; c) - jet mill; d) - disintegrator.

Наиболее исследованными с точки зрения движения мелющей загрузки являются барабанные мельницы (рис. 2).

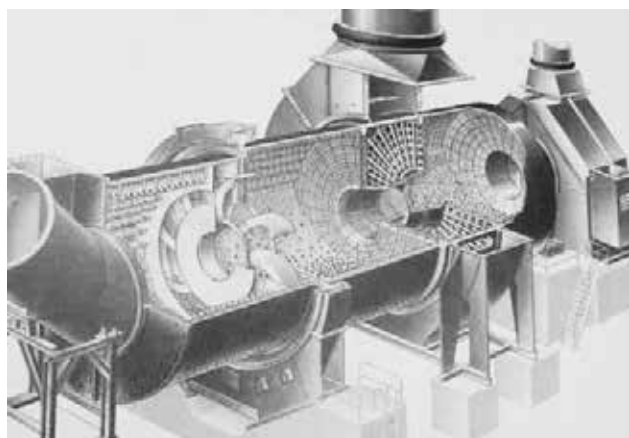
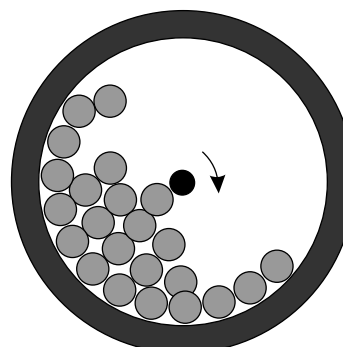


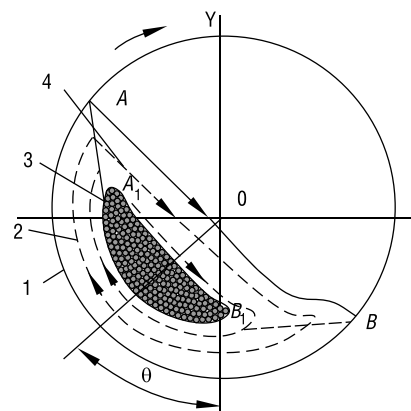
Рис. 2. Общий вид барабанной мельницы конструкции фирмы «Sweco», Австралия / Fig. 2. General view of a drum mill designed by Sweco, Australia.

Ещё в первой половине XX века Дэвисом [2] были сформулированы постулаты, на которых и в настоящее время базируются теоретические модели движения шаровой загрузки (рис. 3).

а)/a



б)/b



в)/с

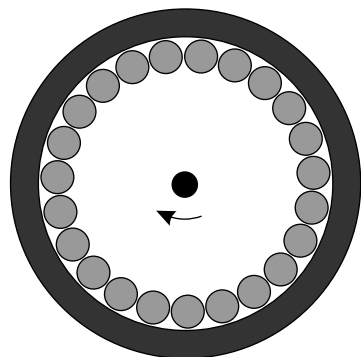


Рис. 3. Схемы движения внутримельничной загрузки барабанных мельниц: а) каскадный режим; б) водопадный режим; в) режим центрифугирования (нерабочий).

Обозначения на схеме: 1 - барабан; 2 - слои материала; 3 - центральное малоподвижное ядро; 4) - оползающие слои материала; 5) - траектории летящих частиц или шаров. /

Fig. 3. Schemes of movement of intramill loading of drum mills: a) cascade mode; b) waterfall mode; c) centrifugation mode (non-operating).

Symbols on the diagram: 1 - drum; 2 - layers of material; 3 - central inactive core; 4) - sliding layers of material; 5) - trajectories of flying particles or balls.

- ✧ Дробящие (мельющие) тела, находящиеся на круговых траекториях движения, имеют одинаковые угловые скорости.
- ✧ Геометрическое место точек перехода шаров с круговых траекторий движения на параболические определяется из равенства сил: центробежной силы, действующей на шар и нормальной составляющей его силы тяжести.
- ✧ В процессе движения мелющей загрузки траектории шаров и частиц измельчаемого материала не пересекаются.

Многолетний опыт использования данных постулатов при составлении математических моделей движения мелющей загрузки, например, профессорами А.Н. Марьютой, В.С. Богдановым, А.Б. Сысой, Д.К. Крюковым и др. показал приемлемость данного подхода только для оценки общих критериев работы барабанных мельниц [3]. В настоящее время в связи с очевидными допущениями, сделанными Дэвисом в своей теории, точность моделей, основанных на данных постулатах, не соответствует требованиям, предъявляемым к современным расчётам динамических параметров мелющей загрузки. Тем не менее, постулаты, сформулированные Дэвисом, позволяют качественно оценить картину движения мелющей загрузки в барабанных мельницах.

В качестве примера на рис. 4 показана расчётная схема фрикционных колебаний малоподвижного ядра, составленная профессором А.Н. Марьютой. В своих исследованиях профессор А.Н. Марюта описал процесс проскальзывания малоподвижного ядра относительно остальной части мелющей загрузки барабанной мельницы.

Автор получил следующее дифференциальное уравнение движения малоподвижного ядра:

$$\frac{d^2\theta_A}{dt^2} + \frac{fR_{02}\Omega}{R_{01}^2\hat{\sigma}} \frac{d\theta_A}{dt} + \frac{g}{R_{01}^2\hat{\sigma}} [R_{01}\hat{\sigma} \cos\hat{\sigma} - 2R_{02}f \sin \frac{\lambda}{2} \sin\hat{\sigma}] \theta_A = \frac{fR_{02}}{R_{01}^2\hat{\sigma}} [2g \sin \frac{\lambda}{2} \cos\hat{\sigma} + R_{01}(\frac{d\theta_A}{dt})^2] - \frac{g}{R_{01}} \sin\hat{\sigma}. \quad (1)$$

Специалисты АО «Моделирование и Цифровые Двойники» в полной мере воспользовались современным уровнем развития компьютерной техники и передовых технологий математического моделирования. На рис. 5 представлен демонстратор цифрового двойника барабанной мельницы (АО «МЦД», Россия).

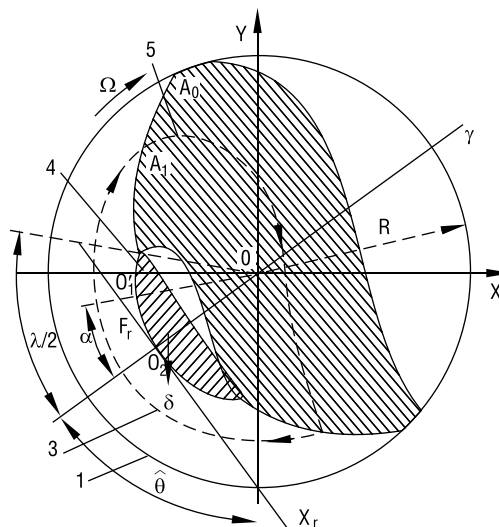


Рис. 4. Расчётная схема фрикционных колебаний малоподвижного ядра по А.Н. Марьюте. /

Fig. 4. Calculation scheme of friction oscillations of a sedentary core according to A.N. Maryute.



Назначение демонстратора:

- ✧ показать основные сценарии эффективности работы мельницы,
- ✧ продемонстрировать возможности оптимизации режимов работы мельниц на основе математического моделирования с целью снижения операционных затрат,
- ✧ продемонстрировать состав и архитектуру системы.

Конструкция демонстратора:

- ✧ барабаны из нержавеющей стали,
- ✧ передние стенки барабана изготовлены из закаленного стекла,
- ✧ дистанционное управление скоростью вращения через ЧМИ.

Рис. 5. Демонстратор цифрового двойника барабанной мельницы (АО «Моделирование и Цифровые Двойники», Россия). / Fig. 5. Demonstrator of a digital twin of a drum mill (JSC «Modeling and Digital Twins», Russia).

Комплексный цифровой двойник выдает рекомендации по изменению режимов работы, остаточном ресурсе и износу элементов мельницы. Технологии цифрового двойника включают эталонные математические модели процессов измельчения (DEM) и нейросетевые компоненты, интегрированные на платформе Промышленного Интернета вещей

PTC ThingWorx. Метамоделли разработаны с помощью программных продуктов Rocky DEM и optiSlog от компании Ansys, интегрированы в PLC и работают в реальном времени совместно с системой управления.

На наш взгляд наиболее близко к точному описанию динамики мелющей загрузки подошли исследователи Центрального университета штата Юта, США. В этом университете на протяжении ряда лет ведутся работы по компьютерному моделированию движения мелющей загрузки в помольных камерах барабанных мельниц. Исследования выполнены для барабанных мельниц различных типоразмеров: от лабораторных до больших промышленных. Эти исследования вначале проводились в двумерной постановке. Затем появились исследования трехмерного движения [4].

Авторы данных работ поставили своей целью разработку метода для численного моделирования шаровой загрузки в барабанной мельнице. При этом были учтены как линейные перемещения шаров (в трех направлениях), так и их вращения (относительно любой прямой). В анализируемых работах при описании взаимодействия шаров друг с другом и со стенкой помольной камеры учтена динамика удара (или безударного взаимодействия) за счет введения нормальной и сдвиговой жесткостей шаров (рис. 6).

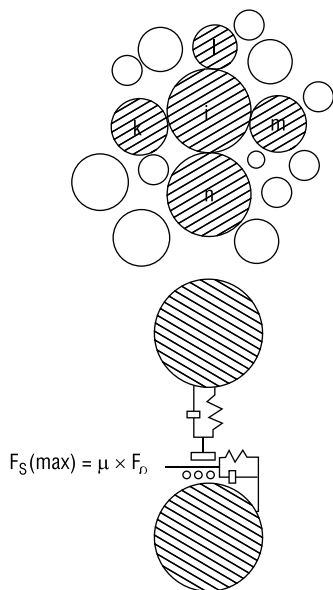


Рис. 6. Расчётная схема соударения двух мелющих тел по К. Раджамани. / Fig. 6. Calculation scheme of collision of two grinding bodies by K. Rajamani.

В механике сплошных сред это эквивалентно применению уравнения состояния и уравнению неразрывности, без которых вообще невозможно описание динамики сжимаемой среды. Также предпринята попытка смоделировать зависимость коэффициента трения от скорости за счет введения коэффициентов пропорциональности Ралли и условия проскальзывания шаров параллельно поверхности контакта. В результате проведённых исследований впервые была получена модель движения отдельных мелющих тел, однако она не учитывает случайный характер соударений шаров, а также демпфирующие свойства измельчаемого материала.

Кроме того, экспериментальные подтверждения данной теории носят косвенный характер и, строго говоря, они

не могут быть приняты в качестве неоспоримого доказательства возможности её применения на практике.

Другим типом измельчительного оборудования, использующим мелющие тела, являются вибрационные мельницы. Главным негативным фактором, сдерживающим распространение промышленных образцов вибромельниц, является не проработанность конструкции подшипниковых узлов мельниц, что снижает их долговечность.

На сегодняшний день в мире существуют всего несколько образцов вибромельниц больших типоразмеров (рис. 7, 8). Вместе с тем при условии решения вопросов, связанных с обеспечением заданного ресурса, вибрационные мельницы являются эффективным типом измельчительного оборудования, позволяющего получать качественный помол с высокой производительностью.



Рис. 7. Промышленная вибрационная мельница конструкции фирмы Siebtechnik 854-2ks (Германия). / Fig. 7. Industrial vibrating mill designed by Siebtechnik 854-2ks (Germany).



Рис. 8. Промышленная вибрационная мельница конструкции фирмы «General Kinematics» (США). / Fig. 8. Industrial vibrating mill designed by «General Kinematics» (USA).

Движение мелющей загрузки в помольной камере вибрационной мельницы является наименее изученным вопросом по сравнению с аналогичными исследованиями загрузки в других типах мельниц. Одной из причин этого является большие значения частоты колебаний помольной камеры и коэффициента заполнения камеры мелющими телами [1].

П.Ф. Овчинников разработал теорию движения мелющей загрузки вибромельниц с учётом свойств измельчаемого материала [5, 6]. В своих работах автор рассматривает мельницу с одним мелющим телом, которое совершает независи-

мое от помольной камеры движение, либо движется вместе с ней, либо катится по ней. Расчётная схема движения мелющей загрузки согласно теории П.Ф. Овчинникова представлена на рис. 9.

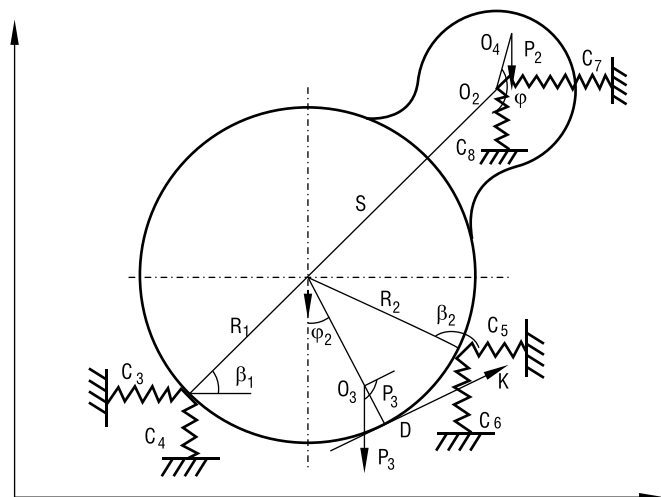


Рис. 9. Расчётная схема движения мелющей загрузки по П.Ф.Овчинникову./
Fig. 9. Calculation scheme for the movement of grinding load according to P.F. Ovchinnikov.

В результате разработки математической модели автор получил дифференциальные уравнения движения мелющей загрузки для всех описанных выше случаев:

$$\begin{aligned} & [(m_1 + m_2)x + m_3x_3 + m_2q \cos \theta + S \sin \varphi] + \\ & C_1(x - x_0) - C_3R_1(\cos \beta_1 - \cos \beta_{10}) - \\ & C_5R_2(\cos \beta_2 - \cos \beta_{23}) + C_3q(\cos \theta - \cos \theta_0) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_1, m_2, m_3 – соответственно массы камеры, шаровой загрузки и вала с дебалансом; x, x_0 – соответственно координаты по вертикали всей системы и центра тяжести загрузки; q – расстояние от центра тяжести системы до центра тяжести дебаланса.

Однако П.Ф. Овчинников рассматривал шаровую загрузку как сосредоточенную массу и не исследовал движение отдельных мелющих тел, что снижает точность результатов, получаемых с использованием его метода.

Б.П. Красовский в работе [7] разработал математическую модель движения загрузки с учётом силы трения, возникающей между стенкой помольной камеры и крайнем рядом шаров (рис. 10).

Дифференциальное уравнение движения загрузки имеет вид:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} - f \frac{d\varphi}{dt} - F_1(\omega t) \cos \varphi + F_2(\omega t) \sin \varphi = 0, \quad (3)$$

где φ – угол поворота загрузки при её качении по поверхности камеры; f – коэффициент трения качения; $F_1 = q - a\omega^2(\sin \omega t + f \cos \omega t)$; $F_2 = qf - a\omega^2(\sin \omega t + f \cos \omega t)$; r_1 – радиус загрузки; $a = A/r_1$; A – амплитуда колебаний камеры; ω – угловая скорость колебаний центра масс системы.

Несмотря на учёт фрикционных свойств мелющей загрузки Б.П. Красовский рассматривает её как распределённую массу, обладающую упругими и диссипативными свой-

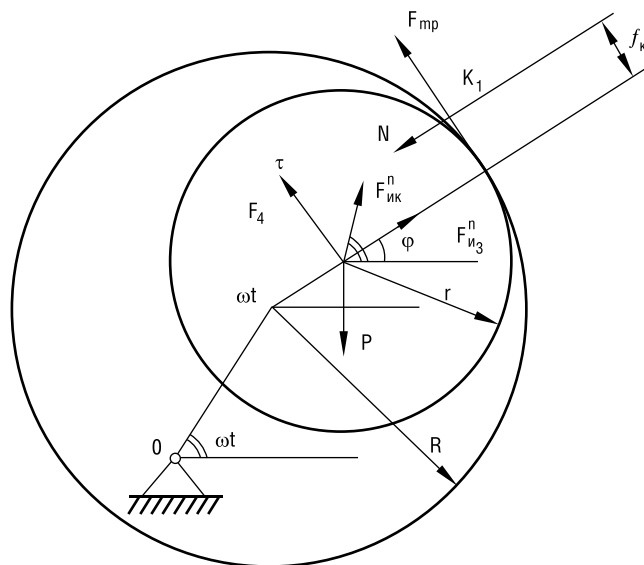


Рис. 10. Расчётная схема движения мелющей загрузки по Б.П. Красовскому./ Fig. 10. Calculation scheme of the movement of grinding load according to B.P. Krasovsky.

ствами, что негативно сказывается на точности получаемых результатов [8].

Большой опыт в исследовании и создании промышленных вибромельниц накопили специалисты американской фирмы «Microgrinding corporation», исследования которых в последнее время сосредоточены в области снижения энергоёмкости измельчения за счёт грамотного взаимного расположения отдельных частей мельницы. В частности, ими разработана виброкинетическая мельница со встречным креплением пружин, что позволяет использовать во время работы их потенциальную энергию, а также снизить вибрации, передаваемые на фундамент (рис. 11) [9]. Математическая модель движения помольной камеры, составленная на основе основных уравнений динамики, учитывает влияние режимных и конструктивных параметров мельницы на энергоёмкость измельчения, однако величина удельной энергии измельчения, входящая в модель, определена эмпирической формулой, что снижает точность получаемых результатов.



Рис. 11. Виброкинетическая мельница конструкции фирмы «Microgrinding corporation», США. / Fig. 11. Vibrokinetic mill designed by Microgrinding Corporation, USA.

Третьим рассматриваемым типом измельчительного оборудования, использующим мелющие тела, являются планетарные мельницы (рис. 12). Это наименее изученный тип мельниц. Связано это, прежде всего с особенностью движения мелющей загрузки, совершающей сложное движение в соответствии с характером движения помольной камеры.

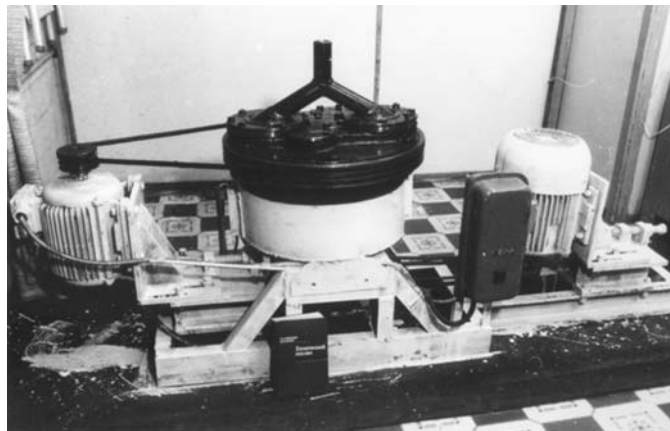


Рис. 12. Планетарная мельница конструкции МГГУ. / Fig. 12. Planetary mill designed by the Moscow State Mining University.

На современном этапе развития измельчительного оборудования существуют несколько промышленных планетарных мельниц. В нашей стране ведущим производителем таких мельниц является компания «ТТД-Балтиец» (рис. 13), которая занимается разработкой и серийным производством планетарных мельниц периодического и непрерывного действия, как для сухого, так и для мокрого помола в режиме шарового и бесшарового измельчения. Отметим, что фирма накопила значительный опыт по измельчению различных материалов в планетарных мельницах, которые позволяют сделать вывод о рациональных областях их применения.

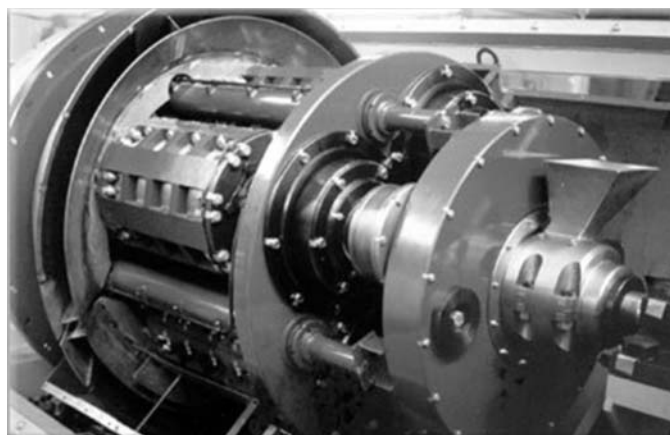


Рис. 13. Промышленная планетарная мельница конструкции «ТТД-Балтиец» / Fig. 13. Industrial planetary mill design «ТТД-Baltiets».

Американская компания «FunPlanet Enterprises, Ltd.» сконструировала самый большой на сегодняшний день промышленный образец планетарной мельницы непрерывного действия для производства угольного порошка (рис. 14) [10].

Теоретические исследования движения мелющей загрузки в помольных камерах планетарных мельниц опираются



Рис. 14. Промышленная планетарная мельница фирма «FunPlanet Enterprises, Ltd.», США. / Fig. 14. Industrial planetary mill FunPlanet Enterprises, Ltd., USA.

на широко известный, но экспериментально не подтвержденный постулат об эквивалентности форм движения загрузки в планетарной и барабанной мельницах. Предполагается, что в помольной камере планетарной мельницы могут существовать по аналогии с барабанной мельницей каскадный, водопадный и смешанный режимы движения шаров. На наш взгляд, точное следование данному постулату приводит в исследованиях к искажению реальной динамической картины, происходящей внутри помольной камеры планетарной мельницы.

В качестве иллюстрации эквивалентности подхода к описанию движения мелющей загрузки в помольных камерах барабанной и планетарной мельниц можно привести работу Л.П. Бушуева [11]. Для определения зависимости границ основных режимов загрузки в планетарно-центробежной мельнице с вертикальными осями от коэффициента загрузки автор использует математическую модель водопадного режима движения загрузки, которая базируется на идеализированной расчетной схеме, аналогичной предложенной В.Э. Девисом [2] для барабанных мельниц. Предполагается, что движение частиц носит регулярный циклический характер и состоит из двух этапов: кругового движения совместно с барабаном по круговым траекториям и свободного движения после отрыва от массива.

Для расчета режима движения загрузки в барабанах планетарно-центробежной мельницы Л.П. Бушуевым разработан алгоритм, на основе которого был произведен численный расчет на ЭВМ с целью определения вида движения загрузки в многобарабанной планетарной мельнице. Составлены расчетные схемы движения мелющей загрузки для каскадного и водопадного режимов (без учета коэффициента трения), (рис. 15).

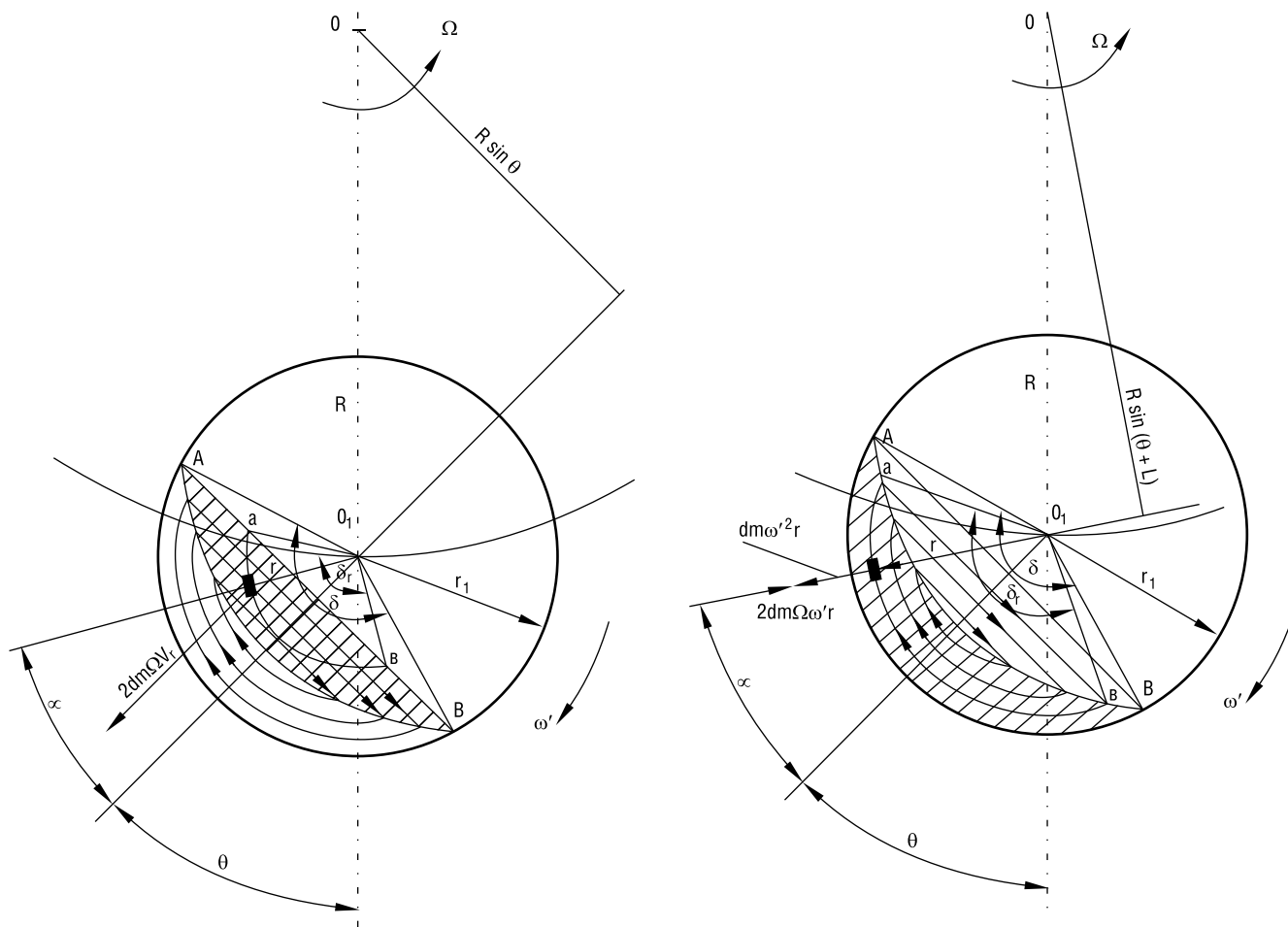


Рис. 15. Расчётные схемы движения мелющей загрузки по Л.П.Бушуеву: а) - каскадный режим; б) - водопадный режим. / Fig. 15. Calculation schemes for the movement of grinding load according to L.P. Bushuev: a) - cascade mode; b) - waterfall mode.

Математическая модель движения шаровой загрузки, разработанная Л.П. Бушуевым, легла в основу современных исследований динамики планетарных мельниц. Однако она не учитывает влияния динамики отдельных мелющих тел на формирование фазового портрета загрузки и требует уточнений с целью её использования для оценки энергоёмкости планетарных мельниц.

На сегодняшний день доказано, что характер движения мелющей среды для планетарных мельниц с коротким водилом существенно отличается от имеющего место в шаровых мельницах. Исследованиями установлено, что при уменьшении длины водила до некоторого значения, планетарная мельница превращается в вибрационную мельницу [1].

Все рассмотренные выше математические модели движения мелющей загрузки объединяет один общий подход к методологии описания процесса взаимодействия мелющих тел с измельчаемым материалом: мелющая загрузка рассматривалась исследователями как единая система, обладающая демпфирующими и упругими свойствами. Безусловно, такой подход позволял найти с достаточным приближением основные закономерности движения мелющих тел, зоны относительной неподвижности их, установить диапазоны значений коэффициента заполнения помольной камеры мелющими телами и т.д.). Однако данный подход априори не позволял устанавливать точные величины значений вышеперечисленных параметров, и, самое главное, делал невозможным точное опи-

ределение величины энергии, которую необходимо подвести к мелющей загрузке для обеспечения эффективного процесса измельчения горных пород до заданной тонины помола. Не вызывает сомнений тот факт, что только смоделировав движение каждого мелющего тела в отдельности, поняв физику процесса взаимодействия отдельных мелющих тел с измельчаемым материалом, можно с заданной степенью точности определить величину энергии мелющего тела, необходимой и достаточной для разрушения частицы материала до заданного размера.

Такая задача была поставлена перед группой исследователей Московского государственного горного университета ещё 25 лет назад, и в тот период начались фундаментальные и прикладные исследования по определению динамики мелющих тел в помольных камерах мельниц различных типов. Понятно, что для экспериментального подтверждения результатов теоретических исследований потребовалось создание комплекса измерительного оборудования, позволяющего измерять ударные импульсы, сообщаемые мелющей загрузке отдельными мелющими телами. На Международной конференции «Плаксинские чтения-2021» нами представлен доклад, в котором был представлен обзор измерительных комплексов для определения динамики мелющей загрузки в помольных камерах мельниц [12].

В данной работе мы представляем обзор основных направлений в моделировании движения мелющей загрузки в мельницах различных типов, сформированных в течение более чем 25-летних исследований группы учёных Москов-

ского государственного горного университета (МГГУ), Северо-Кавказского государственного горно-металлургического института (государственного технологического университета) (СКГМИ (ГТУ)) и Института проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН). Все эти исследования объединяет единый подход к изучению динамики мелющей загрузки — исследованию движения отдельных мелющих тел для определения энергетических параметров мелющей загрузки в целом.

Е.Е. Балахнина в своих исследованиях динамики мелющей загрузки барабанных мельниц представляла мелющую загрузку в виде цепочки взаимодействующих между собой мелющих тел [13]. Впервые ей удалось получить закономерности движения мелющей загрузки барабанных мельниц, отличающихся тем, что они учитывают динамические параметры отдельных мелющих тел, а также влияние фрикционных

свойств измельчаемого материала на формирование фазового портрета шаровой загрузки (рис. 16).

В результате теоретических исследований процесса взаимодействия шаров Е.Е. Балахниной были определены угловые координаты каждого мелющего тела в загрузке

$$\varphi_i = \Phi_{\max} + (\Phi_0 - \Phi_{\max}) \cdot \frac{i}{N_{ch}} + \delta\varphi_i, \quad (4)$$

а также установлены значения для скоростей шаров

$$V_{n1} = \frac{g \cdot \cos \beta \cdot T_n}{2}; V_{n2} = \frac{g \cdot \cos \beta \cdot T_n}{2}. \quad (5)$$

В частности, ей были получены зависимости удельной энергоёмкости измельчения горных пород от среднего диаметра частиц готовой продукции при измельчении в барабанной мельнице (рис. 17).

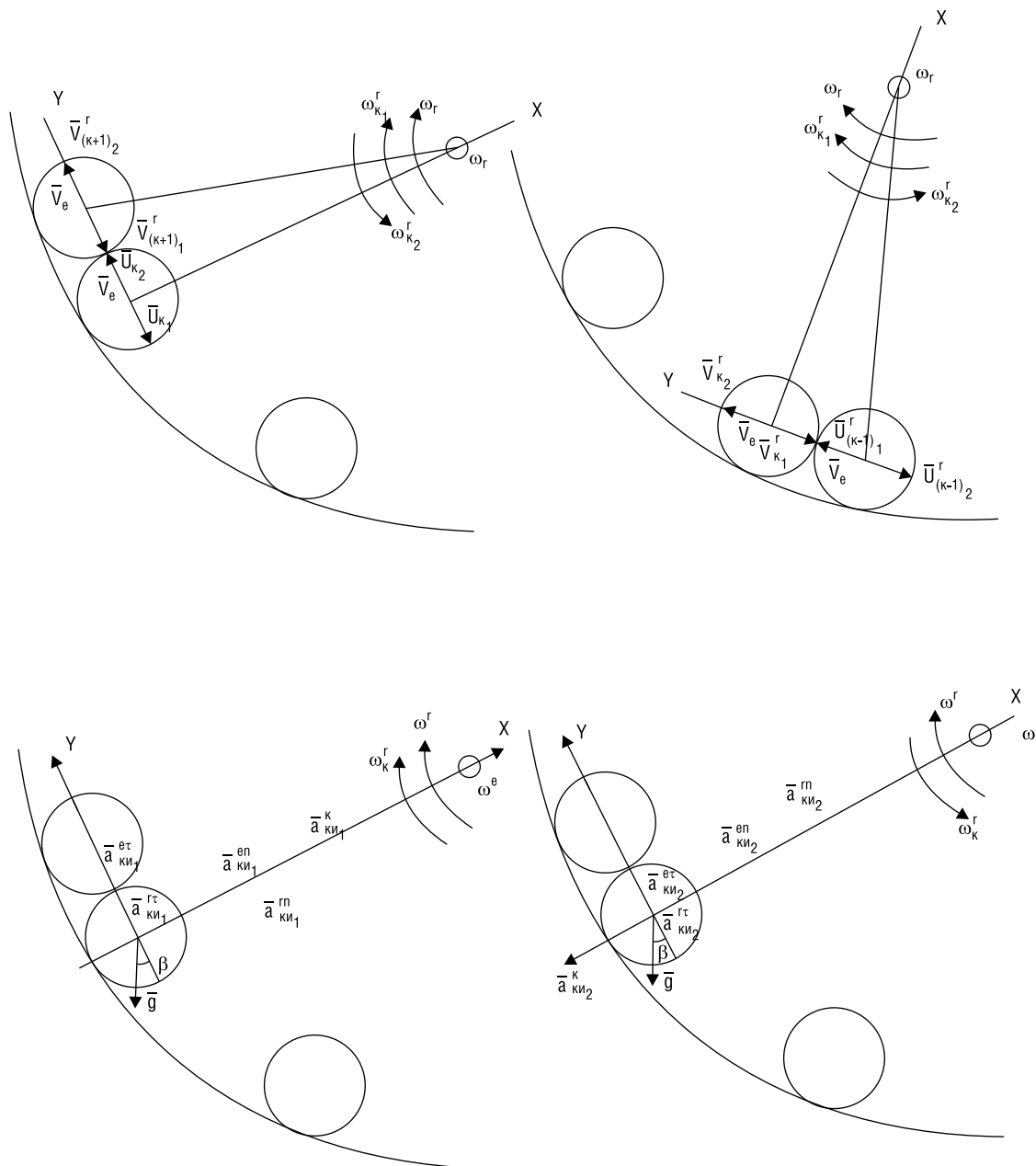


Рис. 16. Расчётная схема движения цепочки шаров мелющей загрузки барабанной мельницы по Е.Е. Балахниной: а) определение скоростей шаров; б) определение ускорений шаров. / Fig. 16. Calculation scheme for the movement of a chain of balls of the grinding load of a drum mill according to Е.Е. Balakhnina: а) determination of the speeds of the balls; б) determination of the accelerations of the balls.

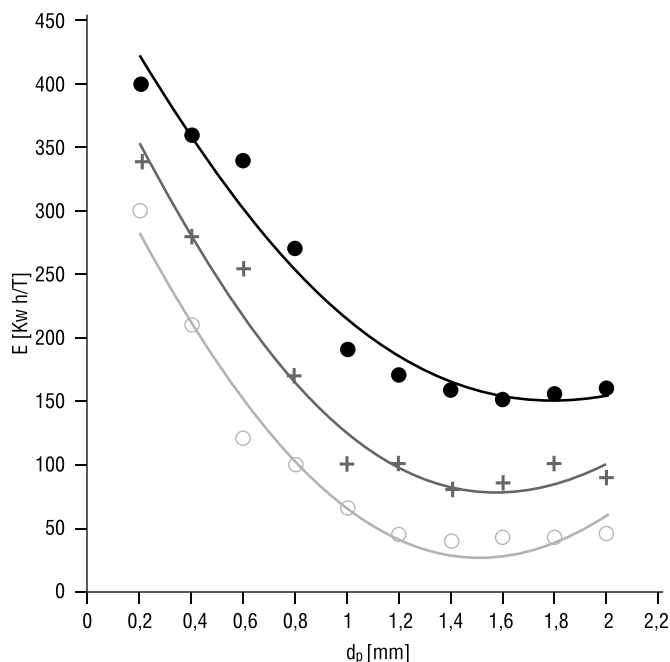


Рис. 17. Зависимости удельной энергоёмкости измельчения горных пород от среднего диаметра частиц готовой продукции при измельчении в барабанной мельнице. / Fig. 17. Dependences of the specific energy consumption of grinding rocks on the average particle diameter of the finished product during grinding in a drum mill.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 17, позволяет сделать важный вывод о том, что оптимальным диапазоном значений среднего диаметра частиц измельчаемого материала с точки зрения минимальной удельной энергоёмкости измельчения для барабанных мельниц является интервал 1,2-1,8 мм.

Ранее мы упоминали об очень интересных исследованиях, которые проводит компания АО «Моделирование и Цифровые Двойники» [14]. На наш взгляд, имитационное моделирование движения мелющих загрузки на основе применения программного комплекса Rocky DEM в сочетании с экспериментальными исследованиями с применением уникального комплекса виброизмерительного оборудования, разрабатываемого в ИПКОН РАН, даст мощный синергетический эффект в решении проблемы определения динамического портрета мелющей загрузки барабанных мельниц.

В исследовании вибрационных мельниц специалистами МГТУ и СКГМИ (ГТУ) главный акцент также делается на определение динамических параметров отдельных мелющих тел. Ф.А. Мешковым в работе [8] составлена математическая модель движения шаровой загрузки в вибрационных мельницах, отличающаяся тем, что на основе численных методов расчёта механики соударений отдельных мелющих тел получены зависимости рабочих параметров мельниц от динамических параметров мелющих тел (рис. 18).

В результате численного моделирования процесса взаимодействия шаров Ф.А. Мешковым впервые составлен динамический портрет шаровой загрузки в помольной камере вибрационной мельницы, описаны траектории шаров в помольной камере, а также произведено разбиение загрузки на динамические зоны (рис. 19, см. цветную вклейку стр. 25).

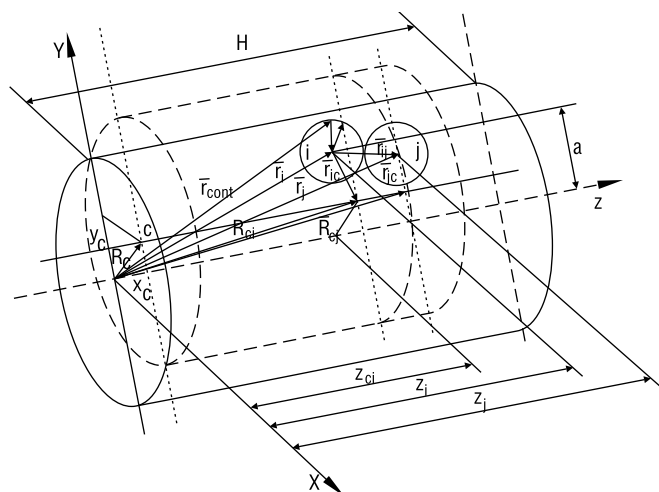


Рис. 18. Расчётная схема движения мелющих тел в помольной камере вибромельницы по Ф.А. Мешкову. / Fig. 18. Calculation scheme for the movement of grinding bodies in the grinding chamber of a vibrating mill according to F.A. Meshkov.

В результате проведённых расчётов составлено выражение для условия не перекрытия зон поверхностных деформаций шаров:

$$\Delta \leq r - \sqrt{\left(r^2 - \left(\frac{r}{2}\right)^2\right)} = r \cdot \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \quad (6)$$

и относительных скоростей двух взаимодействующих между собой шаров:

$$\vec{v}_{ij}^s = \vec{v}_{ij}^t + \vec{n}_{ij} \times \left(r_i \cdot \left(\vec{\phi}_i + \vec{\psi}_i + \vec{\theta}_i \right) + r_j \cdot \left(\vec{\phi}_j + \vec{\psi}_j + \vec{\theta}_j \right) \right). \quad (7)$$

Это позволило автору также получить зависимости удельной энергоёмкости измельчения от среднего диаметра частиц измельчаемого материала (рис. 20). Анализ зависимостей, представленных на рис. 20 позволяет сделать важный вывод о том, что оптимальным диапазоном значений среднего диаметра частиц измельчаемого материала с точки зрения минимальной удельной энергоёмкости измельчения для вибрационных мельниц является интервал 0,08-0,12 мм.

Наиболее сложными с математической и технической сторон проблемы являются исследования динамики мелющей загрузки в планетарных мельницах. В этом направлении также накоплен опыт, позволяющий формулировать критерии работы мельниц с низкой удельной энергоёмкостью измельчения.

В работе [1] нами была составлена математическая модель движения мелющей загрузки в планетарной мельнице (рис. 21).

Составлено дифференциальное уравнение движения загрузки:

$$m \cdot (\vec{\phi} \times \vec{r} - \dot{\phi}^2 \vec{r} - \Omega^2 \vec{R}) = -N \cdot \frac{\vec{r}}{r} + \frac{(\vec{\omega} - \vec{\phi}) \times \vec{r}}{|\vec{\omega} - \vec{\phi}| \times \vec{r}} \cdot N \cdot |\mu| \quad (8)$$

и получены траектории движения шаров в планетарной мельнице (рис. 22).

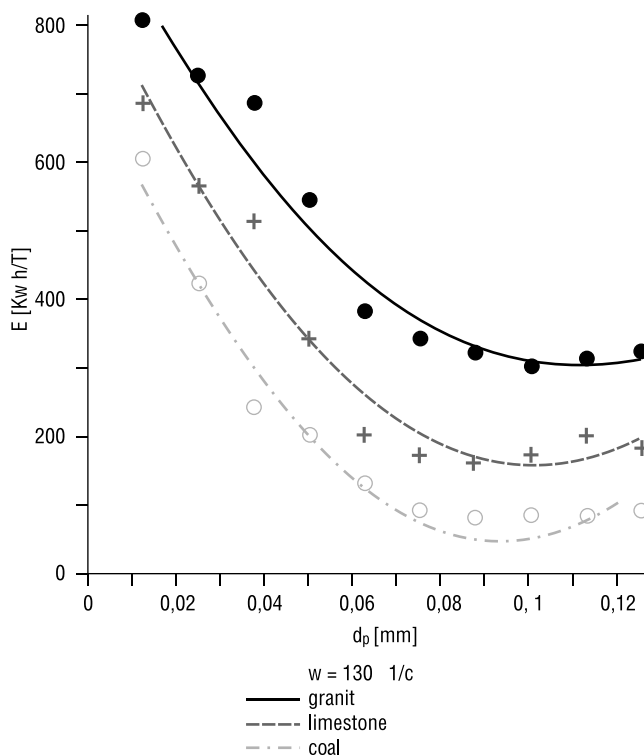


Рис. 20. Зависимости удельной энергоёмкости измельчения от среднего диаметра частиц измельчаемого материала. / Fig. 20. Dependences of the specific energy consumption of grinding on the average particle diameter of the crushed material.

Анализ данного рисунка показывает, что в планетарной мельнице в отличие от барабанной и вибрационной мельниц отсутствуют чётко выраженные изменения направления движения мелющих тел (что характерно для ударных процессов). Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что измельчение в планетарной мельнице происходит за счёт истирания, а соударения мелющих тел не оказывают существенного влияния на процесс измельчения и лишь способствуют перемешиванию материала в помольной камере [1].

Выше мы кратко представили обзор основных направлений в моделировании движения мелющей загрузки в мельницах различных типов. На основании проведённых исследований был сделан вывод о том, что для каждого вида горной породы и заданной тонины её помола существует диапазон значений среднего размера частиц готового продукта, а также тип мельниц, при которых процесс измельчения будет осуществляться с минимальной энергоёмкостью.

В качестве иллюстрации данного вывода рассмотрим процесс измельчения мраморной крошки, применяемый в технологических линиях по производству микрокальцита. Этот материал представляет собой отсеянный на фракции размером от 1 до 500 мкм молотый мрамор. Основными требованиями к мрамору молотому являются процентное содержание в помоле карбоната кальция (от 97 до 99%), белизна молотого мрамора на уровне 96-98% и фиксированная влажность не более 0.1, 0.2, 0.5%.

Требуется получить микрокальцит со средним размером частиц 10 мкм. Если ориентироваться на размер частиц исходного материала, то использование вибрационной мельницы представляется целесообразным со следующими пара-

метрами: диаметр шаров 20 мм и диаметр камеры 200 мм. С другой стороны, если ориентироваться на конечную крупность материала, то в силу того, что на уровне нескольких микрон материал начинает проявлять свои демпфирующие свойства, и высокочастотное воздействие на материал такого грансостава становится малоэффективным. При таких условиях для эффективного измельчения подойдёт либо струйная, либо планетарная мельницы. Если же материал измельчать только в вибрационной мельнице, то до определённой величины среднего диаметра частиц измельчение будет происходить эффективно, а затем с увеличением тонины помола мелющие тела вибромельницы в силу указанных причин постепенно будут терять способность измельчать материал, и эффективность измельчения будет уменьшаться. При этом удельная энергоёмкость процесса будет резко расти. Поэтому в данном случае процесс измельчения целесоо-

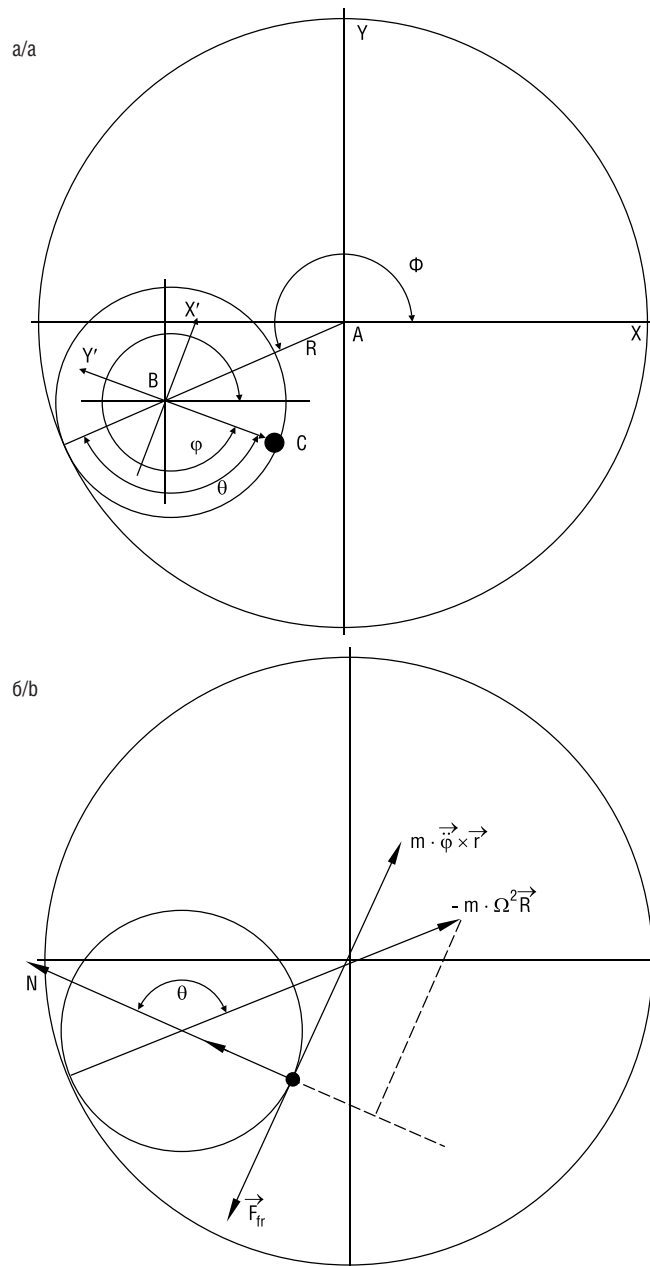


Рис. 21. Расчетная схема движения шара в планетарной мельнице: а) кинематическая схема; б) динамическая схема. / Fig. 21. Calculation scheme of ball motion in planetary mill: a) kinematic scheme; b) dynamic scheme.

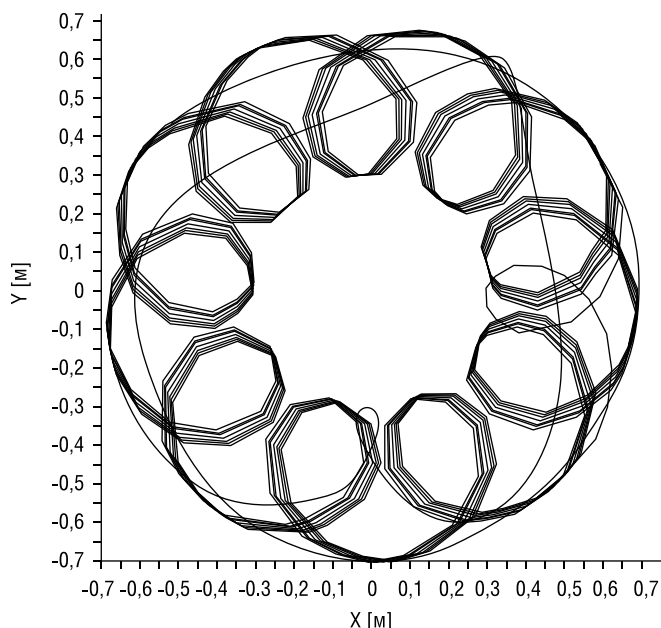


Рис. 22. Траектории движения шаров, находящихся в помольных камерах мельниц планетарного типа. / Fig. 22. Movement trajectories of balls located in the grinding chambers of planetary mills.

бразно разделить на два этапа: сначала материал измельчать в вибрационной мельнице диаметром 40 мм и шарами диаметром 40 мм, а затем в струйной мельнице. На рис. 23 представлены кривые кинетики измельчения мраморной крошки при использовании одного цикла измельчения в вибрационной (сплошная линия) или струйной (штрих-пунктирная линия) мельницах и при последовательном измельчении материала сначала в вибрационной, а затем в струйной мельнице (пунктирная линия).

Анализ рисунка свидетельствует о том, что при использовании только вибрационной мельницы процесс измельчения сначала протекает очень интенсивно, а затем постепенно замедляется и в итоге материал вообще не достигает требуемого гранулометрического состава. При измельчении материала в струйной мельнице процесс измельчения сначала протекает очень медленно, а затем быстро ускоряется, но за счёт медленной первой фазы время измельчения достаточно велико. Замедление процесса измельчения на начальной фазе связано с невозможностью струйной мельницы измельчать материал, содержащий частицы размером более 5 мм.

Наиболее благоприятные условия для измельчения материала создаются при ведении процесса в 2 этапа. На первом

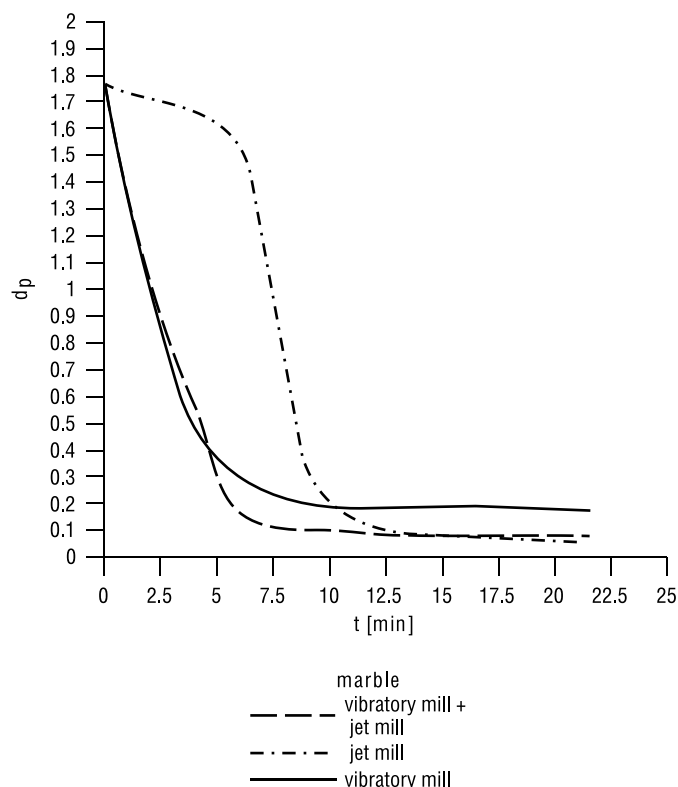


Рис. 23. Кинетика измельчения микроальцита при использовании мельниц различных типов и их комбинаций. / Fig. 23. Kinetics of microcalcite grinding when using mills of various types and their combinations.

этапе измельчение ведётся в вибрационной мельнице с диаметрами помольной камеры и шаров соответственно 300 мм и 30 мм, а на втором этапе — в струйной мельнице. Это позволяет отсечь зоны малоэффективной работы мельницы, что существенно снижает время измельчения, а значит и энергоёмкость процесса [15].

Выводы

В статье приведены результаты теоретических исследований и математического моделирования процесса измельчения горных пород в мельницах различных типов. Рассмотрены вопросы создания цифровых двойников мельниц и повышения энергоэффективности их эксплуатации.

Установлено, что для каждого вида горной породы и заданной тонины её помола существует диапазон значений среднего размера частиц готового продукта, а также тип мельниц, при которых процесс измельчения будет осуществляться с минимальной энергоёмкостью. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитрак Ю.В. Теория движения мелющей загрузки и повышение эффективности оборудования для тонкого измельчения горных пород. Дисс. док. техн. наук. // М, 2000 г. - 430 с.
2. Davis E.W., «Fine crushing in ball mills», AIME transactions, Vol. 61, pp. 250-296, 1919.
3. Марюта А.Н. Практические расчеты по внутренней механике барабанных рудоразмольных мельниц. - Изв. вузов. Цветная металлургия, 1989. - № 3. - с. 17-26.
4. R.Venugopal, Raj K.Rajamani «3D Simulation of Charge Motion in Tumbling Mills by the Discrete Element Method. International Journal of Mineral Processing», 44 (1995) 197-201. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
5. Овчинников П.Ф. К расчету вибромельниц. Машиностроение. - 1966. - 3. - С. 85-89.
6. Овчинников П.Ф. О характере ударного разрушения в вибромельнице - Прикл. механика. - 1968. - Т 4, вып. 4. - СЛ04-П.
7. Красовский Б.П. Обоснование параметров наклонной вибрационной мельницы для производства известняковой муки из отходов карбонатных карьеров: Дисс. ... канд. техн. наук. -М.МГУ, 1989, 231 с.

8. Мешков Ф.А. Обоснование параметров вибрационной мельницы для тонкого измельчения горных пород с учётом динамики мелющих тел.: Дисс. ... канд. техн. наук. - М, МГГУ, 2001. - 170 с.
9. Bruce H Winn «A new approach to Vibratory Grindings»; The 1-st International Partical Technology Forum Posters for Comminution & Attrition, v.1, p. 48-51, 1994.
10. Yuriy V. Dmitrak. «The developing of the technological processes of fine milling for rock's waste grinding». In: The developing and investigations of new and high efficiency equipment for the rock's fine grinding.; The scientific bulletin of «FunPlanet Enterprises, Ltd.», v.36, p.14, Chapel Hill, USA, 1999.
11. Бушуев Л.П. Многорежимная планетарная мельница // Изв. вузов. Горный журнал. - 1965. - № 10. с. 148-154.
12. Дмитрак Ю.В. Основные направления научной деятельности СКГМИ (ГТУ) в исследовании и решении проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья. - Материалы Международной конференции «Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения - 2021). - СКГМИ (ГТУ); Владикавказ, 578 с.
13. Балахнина Е.Е. Обоснование параметров барабанной мельницы для тонкого измельчения горных пород с учётом динамики мелющих тел.: Дисс. ... канд. техн. наук. - М, МГГУ, 2002. - 178 с.
14. Золотарев О.В. Цифровой двойник мельницы измельчения. - CADFEM REVIEW. -2020. - № 7. с. 19-22.
15. Шишканов К.А. Выбор кинематических параметров шаровой загрузки вибрационной мельницы для тонкого измельчения горных пород.: Дисс. ... канд. техн. наук. - М, МГГУ, 2012. - 165 с.

REFERENCES

1. Dmitrak Y.V. The theory of movement of the grinding load and improving the efficiency of equipment for fine grinding of rocks. Diss. doc. tech. Sciences. - M, 2000-430 p.
2. Davis E.W. «Fine crushing in ball mills», AIME transactions, Vol. 61, pp. 250-296, 1919.
3. Maryuta A.N. Practical calculations on the internal mechanics of drum ore-pulverizing mills. - Izv. universities. Non-ferrous metallurgy, 1989. - No. 3. - p. 17 -26.
4. R. Venugopal, Raj K. Rajamani «3D Simulation of Charge Motion in Tumbling Mills by the Discrete Element Method. International Journal of Mineral Processing», 44 (1995) 197 -201. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
5. Ovchinnikov P.F. To the calculation of vibrating mills. Engineering. - 1966. - 3. - pp. 85 -89.
6. Ovchinnikov P.F. On the nature of shock destruction in a vibrating mill - Applied Mechanics. - 1968. Vol. 4, no. 4. - SL04-P.
7. Krasovsky B.P. Substantiation of the parameters of an inclined vibrating mill for the production of limestone flour from carbonate quarry waste: Diss. ... cand. tech. Sciences. -M.MGGU, 1989, 231 p.
8. Meshkov F.A. Substantiation of the parameters of a vibratory mill for fine grinding of rocks, considering the dynamics of grinding bodies: Diss. ... cand. tech. Sciences. - M, MGGU, 2001. - 170 p.
9. Bruce H Winn «A new approach to Vibratory Grindings»; The 1st International Partical Technology Forum Posters for Comminution & Attrition, v.1, p. 48-51, 1994.
10. Yuriy V. Dmitrak. «The developing of the technological processes of fine milling for rock's waste grinding». In: The developing and investigations of new and high efficiency equipment for the rock's fine grinding.; The scientific bulletin of «FunPlanet Enterprises, Ltd.», v.36, p.14, Chapel Hill, USA, 1999.
11. Bushuev L.P. Multimode planetary mill. - Izv. universities. Mining magazine. - 1965. - No. 10. p. 148 -154.
12. Dmitrak Yu.V. The main directions of scientific activity of SKGMI (STU) in the study and solution of the problem of complex and environmentally safe processing of natural and technogenic mineral raw materials. - Materials of the International Conference «Problems of integrated and environmentally safe processing of natural and technogenic mineral raw materials» (Plaksin Readings - 2021). - SKGMI (STU); Vladikavkaz, 578 p.
13. Balakhnina E.E. Justification of the parameters of a drum mill for fine grinding of rocks, taking into account the dynamics of grinding bodies: Diss. ... cand. tech. Sciences. - M, MGGU, 2002. - 178 p.
14. Zolotarev O.V. Digital twin of the grinding mill. - CADFEM REVIEW. -2020. - No. 7. p. 19-22.
15. Shishkanov K.A. The choice of kinematic parameters of the ball load of a vibratory mill for fine grinding of rocks.: Diss. ... cand. tech. Sciences. - M, MSMU, 2012. - 165 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Дмитрак Юрий Витальевич:
 доктор технических наук,
 профессор,
 главный научный сотрудник отдела Моделирования
 геотехнических систем, ,
 Федеральное государственное бюджетное
 учреждение науки Институт проблем комплексного
 освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
 Российской академии наук,
 г. Москва, Россия,
 dmitrak@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitrak Yuriy Vitalievich:
 Doctor of Technical Sciences,
 professor,
 chief research scientist of the Department of Design
 Theory of Subsoil Development,
 Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
 Resources RAS,
 Moscow, Russia,
 dmitrak@yandex.ru



Атрушкевич Виктор Аркадьевич:
доктор технических наук,
профессор,
ведущий научный сотрудник отдела Моделирования
геотехнических систем, ,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем комплексного
освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук,
г. Москва, Россия,
iugi@mail.ru

Atrushkevich Viktor Arkadievich:
Doctor of Technical Sciences,
professor,
Leading Researcher of the Department of Design
Theory of Subsoil Development,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
iugi@mail.ru



Адамова Людмила Станиславовна:
аспирант отдела Моделирования геотехнических
систем, ,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем комплексного
освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук,
г. Москва, Россия,
adamovamila16@yandex.ru

Adamova Ludmila Stanislavovna:
Postgraduate of the Department of Design Theory
of Subsoil Development,
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral
Resources RAS,
Moscow, Russia,
adamovamila16@yandex.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Аккредитованная Лаборатория ЭКОН в составе Отдела теории проектирования освоения недр ИПКОН РАН проводит НИР с подготовкой Заключений для предприятий России об опасности взрыва (воспламенения) серной или сульфидной пыли при отработке месторождений колчеданных, антимонитовых и полиметаллических руд.

Направления деятельности:

- ✦ анализ исходных данных и горно-технических условий разработки месторождений;
- ✦ анализ химического состав руд и пород;
- ✦ исследование текстурно-структурного строения керна (или крупнообломочного материала);
- ✦ изучение процессов выделения/поглощения тепла при взаимодействии пыли с нагретыми поверхностями и контакте с ВВ;
- ✦ оценка риска опасности взрыва сульфидной пыли в горных выработках рудника при ведении подземных горных работ
- ✦ разработка технологических мероприятий и рекомендаций для предотвращения взрывов сульфидной пыли и возгорания колчеданных руд и пород.



Подготовленные ранее аналогичные Заключение в составе Отчетов о НИР успешно принимаются в составе проектной документации Главгосэкспертизой.

Контакты:

Адрес: 111020, г. Москва,
Крюковский туп., д.4.
E-mail: geo-science@mail.ru
Тел: +7 (916)087-54-44
Сайт: <https://ипконран.рф/>
<http://labecomine.com/>

