

<https://doi.org/10.51301/jemet.2025.i1.03>

State-of-the-art grinding equipment and centrifugal gyratory mill

M.A. Aldanova*, G.A. Smailova

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: Aldanova_margari@inbox.ru

Abstract. For Kazakhstan, reducing energy consumption at all levels of production is a significant national challenge, particularly in the processing and beneficiation of ores. The most labor-intensive and energy-consuming process in beneficiation technology is ore grinding, which accounts for approximately 64% of energy costs. Therefore, reducing energy consumption is a highly relevant objective today. Each year, billions of tons of mineral raw materials are ground worldwide. In Kazakhstan alone, about 150 million tons of ore undergo grinding annually. This primarily includes ore for extracting valuable minerals such as zinc, aluminum, lead, chromium, uranium, magnesium, titanium, and coal. This process is highly energy-intensive. Currently available mills consume enormous amounts of electricity, with specific energy consumption for ore grinding reaching up to 15-20 kWh per ton. The development of centrifugal-gyro mills with increased productivity, reduced metal consumption, and lower energy demand is a critical design and technological task. Equipping the industry with such mills will enhance their efficiency and productivity.

Keywords: mill, valuable minerals, mineral raw materials, defect, crushing, grinding.

1. Введение

В послании Президента Республики Казахстан Н.Назарбаева, сказано: «На сегодняшний день я ставлю задачу обеспечить реализацию Третьей модернизации Казахстана. Необходимо создать новую модель экономического роста, которая обеспечит глобальную конкурентоспособность страны.

Основным приоритетом является ускоренная технологическая модернизация экономики, которая ставит комплексные задачи, параллельно созданием новых индустрий нам следует придать импульс развитию традиционных базовых отраслей. Необходимо продолжить индустриализацию с упором на развитие конкурентоспособных экспортных производств в приоритетных отраслях. Горно-металлургический и нефтегазовый комплексы страны должны сохранить свое стратегическое значение для устойчивости экономического роста. В условиях замедления мирового спроса нужно выходить на новые рынки и расширять географию поставок. Большое внимание должно быть уделено расширению минерально-сырьевой базы. Дальнейшее развитие этих отраслей должно быть жестко увязано с углублением комплексной переработки сырья» [1].

Примечательно, что среди 14 приоритетных секторов промышленности 6 относятся к машиностроению. Это отражает тот факт, что оно становится опорой промышленности и драйвером роста экономики Казахстана [2].

Развитие казахстанского машиностроения активно поддерживается растущим внутренним спросом на оборудование для добывающей промышленности, металлургии и строительства. Низкая стоимость электроэнергии является преимущественным фактором для развития машиностроения в Казахстане с учетом его энергоёмкости.

Среди ряда операций и технологических процессов при переработке полезных ископаемых одним из наименее эффективных считается процесс измельчения. В то же время в последние годы значение измельчения увеличивается, более часто становясь главной операцией [3]. Особое место в структуре капитальных затрат современных обогатительных фабрик также занимают операции измельчения, по одним источникам 27-30% по другим 30-35% [4, 5].

Несмотря на четырехкратную за последние 100 лет смену технологии рудоподготовки и очевидный прогресс в данной области, затраты на этот передел возрастают, их доля в общих затратах на обогащение увеличивается. Измельчительная техника, установленная на предприятиях Казахстана, устарела не только морально, но и физически. В условиях нашего промышленного сектора положение осложняется тем, что ряд даже этих недостаточно совершенных машин отечественным машиностроением не выпускается и их приходится закупать за рубежом.

Недостаточные объемы производства и низкое изготовление оборудования, медленные темпы технического переоснащения действующих предприятий, длительные сроки реализации проектов их реконструкции, недостаточный уровень механизации и автоматизации остаются основными причинами низкой производительности труда на предприятии [6].

В настоящее время существует множество агрегатов, предназначенных для среднего и тонкого измельчения. Центробежные мельницы представляют собой разновидность вибрационных мельниц. Отличительной особенностью центробежных мельниц является высокоэффективное измельчение за счет интенсивного движения мелющих тел при сложном плоскопараллельном перемещении помольных камер.

Тем самым, становится актуальным направление конструктивно – технологического совершенствования центробежно – гирационных мельниц – организация измельчения материалов за счет изменения характера динамического воздействия мелющей среды на измельчаемый материал.

Вместе с тем, столь стремительный рост спроса на измельчительное оборудование отнюдь не означает аналогичных темпов развития отечественной горнодобывающей промышленности. Чтобы устоять конкуренции импортных производителей измельчительного оборудования необходимо внедрить в отечественную промышленность высокоэффективное оборудование, машины и технологические линии, не уступающих своим зарубежным аналогам.

2. Материалы и методы

Полезные ископаемые в зависимости от их минерального состава, метода обогащения и характера использования подвергаются дроблению и измельчению до различной крупности. Предел крупности дробления и измельчения определяется размером вкрапленности рудных и не рудных минералов. Это крупность устанавливается опытным путем, для каждого полезного ископаемого при исследовании его на обогатилось [7].

Среди ряда операций и технологических процессов при переработке полезных ископаемых одним из наименее эффективных считается процесс измельчения. В то же время в последние годы значение измельчения увеличивается, оно, более часто становясь главной операцией. Особое место в структуре капитальных затрат современных обогатительных фабрик также занимают операции измельчения, по одним источникам 27-30% по другим 30-35%.

Измельчение в металлургической отрасли является одной из самых энергоемких стадий производства. При измельчении любого минерального сырья необходимо соблюдать принцип «не дробить ничего лишнего». Переизмельчение приводит к излишнему расходу энергии, увеличению износа мельниц, уменьшению их производительности [8].

Применяемые в настоящее время измельчительные машины, среди которых наибольшее распространение получили барабанные мельницы, имеют низкий коэффициент полезного действия, громоздки, характеризуются низкой удельной производительностью, значительным расходом стали на мелющие тела и футеровку с высоким уровнем шума [9].

На сегодняшний день ПЦМ - 3000 является единственным типом промышленных мельниц, на которых возможно осуществление процессов механохимических превращений для значительных объёмов исходных материалов.

Энергонапряжённость в планетарных мельницах может достигать 8 МВт/м^3 , тем самым обеспечивая наилучшие условия для механоактивации. Технология позволяет менять свойства многих измельчаемых веществ, раскрывая их новые возможности.

Используемые на современных обогатительных фабриках дробильно – измельчительные оборудования, реализующие уже известные принципы работы, требуют создание и внедрение новых конструкций на основе

фундаментальных исследований, НИР и НИОКР, с использованием рациональных видов механической и других видов воздействия на измельчаемый материал.



Рисунок 1. Планетарно – центробежная мельница ПЦМ – 3000 [26]

Процессы дробления и измельчения применяются для доведения минерального сырья и других материалов до необходимой крупности, требуемого гранулометрического состава или заданной степени раскрытия минералов. При этих процессах куски зерна и частицы горных пород разрушаются внешними силами. Разрушение происходит преимущественно по ослабленным сечениям, имеющим дефекты структуры, после перехода за предел прочности нормальных и касательных напряжений, возникающих в материале при его упругих деформациях – сжатии, растяжении, изгибе или сдвиге [10].

По своему технологическому назначению различают следующие виды процессов дробления:

- самостоятельное – продукты дробления являются конечными и не подвергаются дальнейшей обработке. Например, дробление углей, горных пород для получения щебня и т.д;
- подготовительные – продукты дробления получают заданной крупности и подвергают последующей переработке. Например, дробление руд для последующего обогащения;

На рисунке 2 приведены применяемые способы разрушения или их комбинации. Способы дробления и измельчения отличаются видом основной необратимой деформации [11]:

раздавливание (рисунок 2, а) – разрушение в результате сжатия куска между двумя дробящими поверхностями, наступающее после перехода напряжений за предел прочности на сжатие;

раскалывание (рисунок 2, б) – разрушение в результате расклинивание куска между остриями дробящих поверхностей и последующего его разрыва;

излом (рисунок 2, в) – разрушение куска в результате его изгиба при ребристой форме дробящих поверхностей;

срезывание (рисунок 2, г) – разрушение, при котором материал подвергается деформации сдвига;

истирание (рисунок 2, д) – разрушение кусков скользящей рабочей поверхностью машины, при котором внешние слои куска подвергаются деформации сдвига и постепенно срезаются вследствие перехода касательных напряжений за пределы прочности;

удар (рисунок 2, е) – разрушение куска в результате воздействия динамических кратковременных нагрузок.

Дробление ударом приводит к разрушению прежде всего по трещинам и поверхностям соприкосновения зерен отдельных компонентов [12].

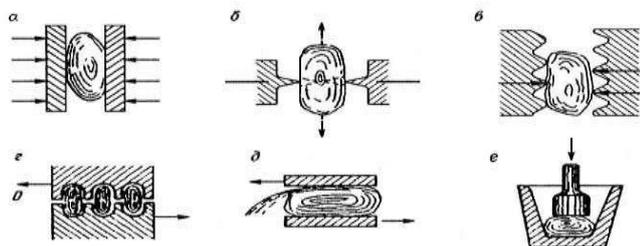


Рисунок 2. Способы дробления полезных ископаемых [15]

Если материал подвергается действию не статических усилий, а динамических нагрузок, то в этом случае применяют термины «ударное дробление» и «ударное измельчение», однако деформации остаются здесь теми же (сжатие, растяжение, изгиб и сдвиг).

Перечисленные способы разрушения являются общими для дробления и измельчения. Эти процессы отличаются по своему технологическому назначению и месту в цепи последовательных операций обогатительной фабрики [13].

При обогащении полезных ископаемых дробление и измельчение применяют для разъединения сростков полезных и породных минералов, содержащихся в исходном сырье, и доведения исходного материала до необходимой крупности или гранулометрического состава. Пределы крупности дробления и измельчения определяются размером вкрапленности извлекаемых ценных минералов. Эта крупность устанавливается опытным путем для каждого полезного ископаемого при исследовании его на обогатимость [14].

Рекомендуется считать дроблением такой процесс разрушения, в результате которого большая часть готового продукта оказывается крупнее 5 мм, а измельчением – процесс, весь продукт которого мельче 5 мм. Размеры граничного зерна (5 мм) приняты условно и может колебаться в некоторых пределах в зависимости от типа обрабатываемого минерального сырья [18].

Условность размера граничного зерна приводит в некоторых случаях к неопределенности терминов. Однако различие между процессами дробления и измельчения может быть уточнено, если за основу разделения принять оборудование, с помощью которого эти процессы осуществляются.

По технологическому назначению все машины, применяемые для разрушения кусков, зерен и частиц минерального сырья и аналогичных материалов, делятся на две основные разновидности: дробилки и мельницы. В дробилках между дробящими деталями всегда имеется некоторый зазор, заполняемый материалом при работе под нагрузкой и остающийся свободным при работе на холостом ходу (щековые, конусные, роторные и другие дробилки). В мельницах измельчающие детали отделяются друг от друга слоем материала только под нагрузкой, а при работе на холостом (а частично и на рабочем) ходу они соприкасаются (шаровые, стержневые, роликовые и другие механические мельницы) [15].

В связи с этим дроблением считается процесс разрушения кускового материала, осуществляемый в дробил-

ках, а измельчением – разрушение материала в мельницах. Дробилки благодаря наличию того или иного «калибрующего» зазора выдают преимущественно кусковый продукт с преобладанием крупных фракций и с относительно небольшим количеством мелких. Мельницы, где рабочий зазор между измельчающими телами становится близким к нулю, выдают преимущественно порошкообразный продукт с преобладанием мелких фракций.

При дроблении и измельчении заметно сказывается разнообразие свойств горных пород. Горные породы различаются по структуре и текстуре. Первая в основном обусловлена размером и формой минеральных агрегатов; вторая – слоистостью, пористостью и трещиноватостью.

Для процессов разрушения наиболее важными характеристиками горных пород являются их прочность (крепость), дробимость, измельчаемость и абразивность.

Прочностью горных пород называется способность твердого тела противостоять разрушению от действия внешних сил. Она характеризуется предельными напряжениями, которые могут быть созданы в опасном сечении тела при разных видах разрушающих воздействий [16].

В таблице 1 приведены сведения об относительной прочности горных пород при разных видах напряжений,

Таблица 1. Относительная прочность горных пород при разных видах напряжений, % [16]

Горная порода	Сжатие	Сдвиг	Изгиб	Растяжение
Гранит	100	9	8	2-4
Песчаник	100	10-12	6-20	2-5
Известняк	100	15	8-10	4-10

3. Результаты и обсуждение

Необходимо выполнить обоснование эффективности работы центробежно – гириационных мельниц для горнорудной промышленности, их конструктивные особенности и факторов, влияющих на их производительность;

- обоснование параметров конструкции центробежно – гириационной мельницы для измельчения рудных материалов на основе силового расчета;

- выполнить модальный анализ конструкции мельницы с использованием подсистемы Modal конечно-элементного пакета ANSYS Workbench, установить резонансные частоты мельницы, и их влияние на собственные частоты, при максимально и минимально допустимых нагрузках;

- экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния кривошипного вала, под действием динамических нагрузок на моделях усталостного разрушения и динамической прочности вала.

Поэтому для характеристики и общего сравнения прочностных свойств горных пород обычно пользуются величиной напряжения на сжатие либо коэффициентом крепости, разработанным профессором.

М.М. Протодяконовым по результатам многолетней горной практики. Дробимость является обобщающим параметром многих механических свойств горных пород (упругих, прочностных, пластических и др) и выражает энергоёмкость процесса дробления породы.

4. Выводы

Применяемые в настоящее время измельчительные машины, среди которых наибольшее распространение

получили барабанные мельницы, имеют низкий коэффициент полезного действия, громоздки, характеризуются низкой удельной производительностью, значительным расходом стали на мелющие тела и футеровку с высоким уровнем шума [17].

Несмотря на четырехкратную за последние 100 лет смену технологии рудоподготовки и очевидный прогресс в данной области, затраты на этот передел возрастают, их доля в общих затратах на обогащение увеличивается. Измельчительная техника, установленная на предприятиях Казахстана, устарела не только морально, но и физически. В условиях нашего промышленного сектора положение осложняется тем, что ряд даже этих недостаточно совершенных машин отечественным машиностроением не выпускается и их приходится закупать за рубежом [16].

В зарубежной практике дробимость определяют опытами по разрушению единичных кусков ударами падающих грузов. По высоте их падения и массе рассчитывается ударная сила дробления и по ней определяется индекс работы W_i и типовой характеристикой разгрузки стандартных дробилок [17].

Эти показатели определяются по результатам дробления проб руды в щековых или конусных дробилках небольших размеров (например, конусной с диаметром основания дробящего конуса 600мм). В дробилку попадает материал широкого диапазона крупности, из которого удалены классы меньше ширины выходной щели, намеченной для опытов. Дробление осуществляется в условиях заполненного рабочего пространства дробилки при одновременной записи потребляемой энергии. Питание дробилки и ее разгрузка подвергаются ситовому анализу на ситах с квадратными отверстиями. Определяется номинальная крупность продукта дробления, оцениваемая размером отверстия сита, через которое проходит 95% материала, и строится типовая характеристика разгрузки дробилки, у которой крупность классов выражается в долях номинальной крупности. Эта характеристика определяется только свойствами дробимых материалов [14]. По времени дробления, массе использованной для опыта пробы руды и потребленной энергии рассчитывается удельный расход энергии [13], затраченной только на дробление (без учета энергии холостого хода), и определяется значение индекса чистой работы дробления.

References / Литература

- [1] Nazarbaev, N. A. (2017). Poslanie Prezidenta Respubliki Kazakhstan narodu Kazakhstanana «Tret'ja modernizacija Kazakhstanana: global'naja konkurentosposobnost'»
- [2] Pravitel'stvo Respubliki Kazakhstan. (2020). Gosudarstvennaja programma po forsirovannomu industrial'no-innovacionnomu razvitiyu Respubliki Kazakhstan do 2020 goda
- [3] Pekonidi, A.V. (2004). Povyshenie jeffektivnosti proces-sa izmel'chenija mineral'nogo syr'ja v centrobezhnoj mel'-nice vertikal'nogo tipa (candidate dissertation). *Vladikavkaz*
- [4] Kostin, I.M. (1957). Puti povyshenija proizvoditel'nosti izmel'chitel'nyh otdelenij obogatitel'nyh fabrik. *V Trudy Mehanobra, 140, 56–59*
- [5] Finkel'shtejn, G.A. & Cukerman, V.A. (1975). O klassifikacionnyh priznakah razlichnyh sposobov droblenija, izmel'chenija i odnositel'noj perspektivnosti sootvetstvujushhego oborudovanija. *V Trudy Mehanobra, 140, 5–9*
- [6] Romanenko, V.S. (2015). Gorizontalnaja valkovaja mel'nica (candidate dissertation). *Belgorod: BGTU*
- [7] Hodakov, G.S. (1972). Tonkoe izmel'chenie stroitel'nyh materialov. *M.: Nedra*
- [8] Biblioteka tehniceskij nauk po temam nomenklatury special'nostej 05.00.00. VAK RF «Tehniceskije nauki». (2012). Retrieved from: <http://tekhnosfera.com>
- [9] Andreev, S.E., Tovarov, V.V. & Perov, V.A. (1959). Zakonomernosti izmel'chenija i ischislenija harakteristiki granulometricheskogo sostava. *M.: Metallurgizdat*
- [10] Sergo, E.E. (1985). Droblenie, izmel'chenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh. *M.: Nedra*
- [11] Hetagurov, V.N. (1999). Razvitie nauchnyh osnov razrabotki i proektirovanija centrobezhnyh mel'nic vertikal'nogo tipa (candidate dissertation). *Vladikavkaz*
- [12] Programma «Termi». (1997). Finansovaja podderzhka Evropy dlja osvoenija novyh tehnologij v oblasti cementnoj promyshlennosti. Chast' 2. Proekty po programme «Termi», svjazannye s vysokoeffektivnymi sistemami pomola. *Cement, (3), 10–13*
- [13] Harder, J. (2010). Grinding trends in the cement industry. *ZKG International, (4), 46–58*
- [14] Andreev, S.E., Perov, V.A. & Zverevich, V.V. (1980). Droblenie, izmel'chenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh (3-e izd., pererab. i dop.). *M.: Nedra*
- [15] Hodakov, G.S. (1972). Tonkoe izmel'chenie stroitel'nyh materialov. *M.: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu*
- [16] Sidenko, P.M. (1977). Izmel'chenie v himicheskoj promyshlennosti. *M.: Himija*
- [17] Hodakov, G.S. (1972). Fizika izmel'chenija. *M.: Nauka*
- [18] Deshko, Ju.I. (1966). Izmel'chenie materialov v cementnoj promyshlennosti. *M.: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu*

Ұнтақтау жабдықтарының және ортадан тепкіш-гирациялық диірменнің қазіргі күйі

М.А. Алданова*, Г.А. Смаилова

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: Aldanova_margari@inbox.ru

Андатпа. Қазақстан үшін маңызды мемлекеттік мәселе – барлық өндіріс деңгейлерінде, әсіресе, кенді қайта өңдеу және байыту сияқты салаларда энергия шығындарын азайту. Байыту технологиясында ең көп еңбекті қажет ететін және энергияны көп тұтынатын процесс – кенді ұсақтау болып табылады, оның үлесіне шамамен 64% энергия шығыны тиесілі. Сондықтан қазіргі уақытта энергия шығындарын азайту өзекті міндеттердің бірі болып отыр. Өлемде жыл сайын миллиардтаған тонна минералды шикізат ұсақталады, ал Қазақстанда жылына шамамен 150 млн тонна кен

ұсақтаудан өтеді. Бұл, ең алдымен, мырыш, алюминий, қорғасын, хром, уран, магний, титан және көмір сияқты пайдалы қазбаларды өндіруге арналған кен. Бұл процесс өте энергияны қажет етеді. Қазіргі уақытта қолданылатын диірмендер электр энергиясының орасан зор мөлшерін тұтынады. Кенге қатысты диірмендердің электр энергиясын тұтынудың меншікті көрсеткіші тоннасына 15-20 кВт-қа дейін жетеді. Металл сыйымдылығын және жабдықтың энергия шығынын азайта отырып, өнімділігі жоғары центробежді-гирациялық диірмендерді жасау маңызды конструктивті және технологиялық міндет болып табылады. Бұл жабдыкпен жабдықтау диірмендердің өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Негізгі сөздер: диірмен, пайдалы қазбалар, минералды шикізат, ақау ұсақтау, ұнтақтау.

Современное состояние измельчительного оборудования и центробежно-гирационной мельницы

М.А. Алданова*, Г.А. Смаилова

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: Aldanova_margari@inbox.ru

Аннотация. Для Казахстана важной государственной проблемой является снижение энергозатрат во всех уровнях производства и в первую очередь в такой как переработка и обогащение руд, при этом наиболее трудоёмким и энергоёмким процессом в технологии обогащения является измельчение руды, на долю которых приходится около 64% энергозатрат. Поэтому на сегодняшний день актуальной перспективой является снижения энергозатрат. Каждый год в мире измельчается миллиарды тонн минерального сырья, только в Казахстане измельчению подвергается около 150 млн. тонн руды. Это, в первую очередь, руда для добычи полезных ископаемых – цинк, алюминий, свинец, хром, уран, магний, титан, уголь. Этот процесс является достаточно энергоёмким. Существующие, в настоящее время, мельницы потребляют огромное количество электроэнергии. Удельный показатель потребления электроэнергии мельниц по руде составляет - до 15-20 кВт на тонну. Создание центробежно-гирационных мельниц повышенной производительности, при снижении металлоёмкости и энергоёмкости оборудования, является важной конструктивной и технологической задачей. Оснащение этим оборудованием позволит повысить производительность мельницы.

Ключевые слова: мельница, полезные ископаемые, минеральное сырьё, дефект, дробление, измельчение.

Received: 18 December 2024

Accepted: 16 March 2025

Available online: 31 March 2025