

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ, ГОРНЫЕ НАУКИ

SUBSOIL USE, MINING SCIENCES

Научная статья

УДК 622.73

DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-60-71

Разработка и предварительные испытания нового опытно-промышленного образца роторной мельницы МДР

Андрей Иннокентьевич Матвеев¹, Василий Романович Винокуров²

^{1,2} Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского

Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Россия

¹andrei.mati@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>

²vaviro@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5698-7922>

Подготовка руд к обогащению является одним из самых энергоёмких и затратных процессов в технологии переработки полезных ископаемых. Соответственно, совершенствование и разработка отечественного высокоэффективного измельчительного оборудования являются весьма актуальной задачей. Объект исследования – барабанные мельницы для сухого измельчения рудного материала. Цель исследования – разработка нового высокоэффективного способа измельчения и конструкции измельчительного аппарата для его осуществления. Для реализации цели исследования проанализированы существующие способы измельчения и конструкции барабанных мельниц самоизмельчения, с учётом их недостатков разработаны и запатентованы новый способ измельчения и конструкция мельницы для его осуществления, запроектирован и изготовлен опытно-промышленный образец мельницы, проведены предварительные экспериментальные испытания. Методология и методы исследования основаны на анализе гранулометрического состава продуктов измельчения для определения эффективности работы роторной мельницы. Проведёнными предварительными технологическими испытаниями нового опытно-промышленного образца роторной мельницы МДР экспериментальным путём определены основные рациональные рабочие параметры, влияющие на эффективность работы барабанных мельниц периодического действия (рациональная масса загрузки питания и время периода измельчения). Сравнительный анализ полученных экспериментальных результатов измельчения позволил установить накопление критического объёма шлама, образующегося в процессе измельчения и негативно сказывающегося на эффективности измельчения. Решение данной проблемы возможно за счёт своевременного удаления образующегося шлама, которое может быть осуществлено в исполнении мельницы МДР в варианте непрерывного действия. Следует отметить, что реализация и применение мельницы непрерывного действия больших типоразмеров позволят достичь более высокой эффективности, производительности и универсальности.

Ключевые слова: разработка, роторная мельница, конструкция, разрушение, рудные материалы, опытно-промышленный образец, экспериментальные исследования, процесс, гранулометрический состав, эффективность измельчения

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКР № 122011800089-2).

Для цитирования

Матвеев А. И., Винокуров В. Р. Разработка и предварительные испытания нового опытно-промышленного образца роторной мельницы МДР // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025. Т. 31, № 1 . С. 60–71. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-60-71

Original article

Development and Preliminary Testing of a New Pilot Industrial Model of the MDR Rotary Mill

Andrey I. Matveev¹, Vasily R. Vinokurov²^{1,2}Institute of Mining of the North named after N. V. Chersky
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia¹andrei.mati@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>
²vaviro@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5698-7922>

Preparation of ores for enrichment is one of the most energy-intensive and costly processes in the technology of mineral processing. In this regard, the improvement and development of domestic highly efficient grinding equipment is a very urgent task. The object of the research is drum mills for dry grinding of ore material. The objectives of the work are to develop a new highly efficient grinding method and the design of a grinding apparatus for its implementation. To achieve the goal of the study, an analysis of existing grinding methods and designs of autogenous grinding drum mills has been carried out and, taking into account their shortcomings, a new grinding method and a mill design for its implementation is developed and patented, a pilot industrial sample of the developed mill is also designed and manufactured, preliminary experimental tests are carried out. The methodology and methods of the study are based on the analysis of the granulometric composition of the grinding products to determine the efficiency of the rotor mill. The preliminary technological tests of the new pilot industrial model of the MDR rotary mill experimentally determined the main rational operating parameters affecting the efficiency of periodic drum mills (rational feed loading mass and grinding period time). At the same time, a comparative analysis of the obtained experimental grinding results established the accumulation of a critical volume of sludge formed during the grinding process and negatively affecting the grinding efficiency. The solution to this problem is possible due to the timely removal of the formed sludge, which can be carried out in the MDR mill in the continuous version. It should be noted that the implementation and use of a continuous mill of large sizes will achieve higher efficiency, productivity and versatility.

Keywords: development, rotary mill, design, destruction, ore materials, pilot-industrial sample, experimental studies, process, granulometric composition, grinding efficiency

Funding: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 0297-2021-0022, EGISU R&D No. 122011800089-2).

For citation

Matveev A. I., Vinokurov V. R. Development and Preliminary Testing of a New Pilot Industrial Model of the MDR Rotary Mill // Transbaikal State University Journal. 2025. Vol. 31, no. 1. P. 60–71. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-1-60-71

Введение. Подготовка руд к обогащению является одним из самых энергоёмких и затратных процессов в технологии переработки полезных ископаемых [2; 3; 16]. В связи с этим совершенствование измельчительного оборудования, а также исследование, разработка и внедрение более эффективных и экономически выгодных способов измельчения и установок для их осуществления представляют собой значимую задачу для стабильного развития отечественного горно-промышленного комплекса. В этом направлении постоянно ведутся отечественные и зарубежные исследования по повышению эффективности работы измельчительных устройств [1; 4; 10].

Актуальность. Процесс измельчения различных материалов в измельчительных установках представляет собой уменьшение геометрических размеров разрушаемых кусковых материалов за счёт использования механических сил. Эффективность измельчения в основном зависит от физико-механических свойств разрушаемого кускового материала и характеризуется крупностью продуктов из-

мельчения, состоящих из мельчайших частиц размером 1–1 000 мкм. При этом тонкое измельчение обходится значительно дороже, чем среднее и крупное. При переработке рудного материала в тонкую фракцию удельные затраты на измельчение могут достичь 40 % общей стоимости обработки руды, тогда как при среднем и крупном измельчении они не превышают 20 %. Таким образом, разработка отечественного высокоэффективного измельчительного оборудования является весьма актуальной задачей.

Объект – барабанные мельницы для сухого измельчения рудного материала.

Предмет – возможность повышения эффективности работы барабанных мельниц для сухого измельчения рудного материала.

Цель – разработка нового высокоэффективного способа измельчения и конструкции измельчительного аппарата для его осуществления.

Задачи:

1) анализ существующих способов измельчения и конструкций барабанных мельниц самоизмельчения и их недостатков;

2) разработка нового способа измельчения и конструкции мельницы для его осуществления;

3) проектирование и изготовление нового опытно-промышленного образца разработанной мельницы;

4) проведение предварительных экспериментальных испытаний по определению основных рациональных параметров работы опытно-промышленного образца роторной мельницы МДР (массы загрузки и времени периода измельчения).

Методология и методы основаны на анализе гранулометрического состава продуктов измельчения для определения зависимости эффективности измельчения от основных рациональных рабочих режимов роторной мельницы (массы загрузки измельчаемого материала, времени измельчения). При исследовании процессов измельчения в новом опытно-промышленном образце роторной мельницы МДР оценивается выход контрольного класса крупности 0,071 мм или степень измельчения рудных материалов разной крупности. Оценка производится по анализу гранулометрического состава продуктов измельчения. Исследования осуществляются с пробами твёрдостью по шкале Мооса 7, классом крупности $-10+5$, массой 1, 2, 3 и 4 кг. Частота вращения барабана составляла 46,6 об/мин, частота вращения ротора – 700 об/мин. Диапазон измельчения проб во времени составлял 15–60 мин.

Разработанность темы. Для тонкого помола рудных материалов обычно используют двух- или трёхстадиальные схемы измельчения, дающие весьма тонкий помол 80 % класса $-0,071$ мм [5; 6; 9]. Для измельчения различных материалов при тонком измельчении применяются мельницы разных типов, в которых разрушение происходит за счёт ударных нагрузок, либо по принципу раздавливания разрушаемых кусков между конструктивными элементами мельниц, либо по принципу истирания кусковых материалов, за счёт измельчающих рабочих тел, органов мельниц. Тип применения измельчительных установок зависит в основном от физико-механических свойств измельчаемого материала и требований к измельчённому продукту [11; 13; 17]. При тонком измельчении наибольший интерес представляют так называемые барабанные измельчители или мельницы, в которых осуществляется переработка более 70 % всех измельчаемых материалов. Определение «барабанные мельницы» означает, что основной конструктивный элемент мельни-

цы – её корпус – исполнен в виде цилиндрического барабана, приводимого во вращение в процессе измельчения материала.

В настоящее время одним из перспективных направлений исследований является разработка барабанных измельчительных установок сухого самоизмельчения. Мельницы сухого измельчения имеют свои недостатки и преимущества, среди которых следует назвать существенное удешевление процесса рудоподготовки за счёт отсутствия необходимости применения мелящих рабочих тел, технологической воды и связанных с этим коммуникаций.

Принцип работы мельницы самоизмельчения в основном является таким же, как и у шаровой мельницы, где в качестве измельчающей среды используются крупные куски руды. Сущность процесса самоизмельчения заключается в том, что при разрушении кускового материала в рабочей камере барабанной мельницы более крупные куски, разрушаясь, измельчают более мелкие. Процесс самоизмельчения кусковых материалов реализуется сухим и мокрым способами: сухим – в мельницах «Аэрофол», мокрым – в мельницах «Каскад» и «Гидрофол».

Широко известен способ сухого самоизмельчения кусковых материалов в барабанных мельницах, работающих в так называемом «водопадном режиме», т. е. с частотой вращения барабанов, равной 80–85 % критической частоты вращения. Наибольшее распространение из конструкций, реализующих этот способ, получили мельницы типа «Аэрофол». Конструкция мельницы «Аэрофол» для сухого измельчения рудных материалов основана на разработках и исследованиях норвежского конструктора А. Д. Хадсела [12].

Основной недостаток данных мельниц заключается в том, что они не могут быть рекомендованы для всех материалов и руд без предварительных испытаний. Для разрушения самоизмельчением наиболее подходят хрупкие руды зернистого сложения и соответствующей текстуры. На практике для разработки и выбора любого рудоподготовительного оборудования необходимо провести масштабирование, полупромышленные, а лучше промышленные исследования по самоизмельчению данной руды [14].

В процессе дробления происходит накапливание в мельнице кусков «критического размера», т. е. кусков размерами 25–75 мм, которые слишком малы, чтобы дробить другие куски, но слишком велики и прочны, чтобы быть раздробленными крупными кусками.

Для борьбы с накапливанием таких кусков в мельнице рудного самоизмельчения приходится принимать специальные меры, которые усложняют работу фабрики. В частности, для повышения энергии удара падающих кусков породы в мельнице увеличивают диаметр барабана, применяют специальные лифтёры для подъёма материала до необходимой точки отрыва, увеличения эффективности удара и т. д. Эффективность дезинтеграции горных пород таким способом крайне низка, а коэффициент полезного действия мельниц по разным данным не превышает 1,2 % [8].

Результаты. В лаборатории обогащения полезных ископаемых Института горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН разработан и запатентован способ измельчения горных пород и создана роторная мельница МДР [7]. В настоящее время с учётом корректировки конструкции подана новая заявка на изобретение. Разработанный способ измельчения горных пород включает подачу материала во вращающийся барабан с подъёмом его по внутренней поверхности барабана, где куски измельчаемого материала после отрыва от внутренней поверхности барабана подвергают ударному воздействию рабочим органом, соосно установленным на полом валу в барабане с возможностью противоположного вращения со скоростью, равной 85–92 % от критической. При этом разгрузка измельчённого материала осуществляется через соосно установленное разгрузочное устройство формы усечённого конуса со стороны разгрузки, где боковая образующая поверхность усечённого конуса выполнена

в виде колосниковой решетки или съёмных щитков секторного типа с перфорированными отверстиями заданного отверстия. Внутри устройства размещаются разгрузочные лифтёры косоугольной формы с возможностью перегрузки измельчённого материала через полое отверстие вращающегося вала мельницы, а недоизмельчённые материалы имеют возможность скатываться вдоль перфорированной боковой поверхности конуса в зону действия ротора с билами.

Роторная мельница для осуществления указанного способа содержит установленный с возможностью вращения барабан с лифтёрами на внутренней поверхности, имеющий на торцах приёмный и разгрузочный отверстия для измельчаемого материала. Внутри барабана соосно на полом валу установлен ротор с билами, с возможностью противоположного вращения со скоростью, равной 85–92 % от критической, отличающейся тем, что разгрузочный узел мельницы, расположенный на торце вращающегося барабана, представляет собой соосно установленную к торцевой стенке барабана дополнительную надстройку в виде полого усечённого конуса с углом 45° внутри которого располагаются косоугольные лифтёры, а поверхность боковой конусной части выполнена в виде колосниковой решётки или съёмных щитков секторного типа с перфорированными отверстиями заданного размера. Радиус полого усечённого конуса с косоугольными лифтёрами больше радиуса вращения бил ротора.

Принципиальная схема конструкции роторной мельницы представлена на рис. 1.

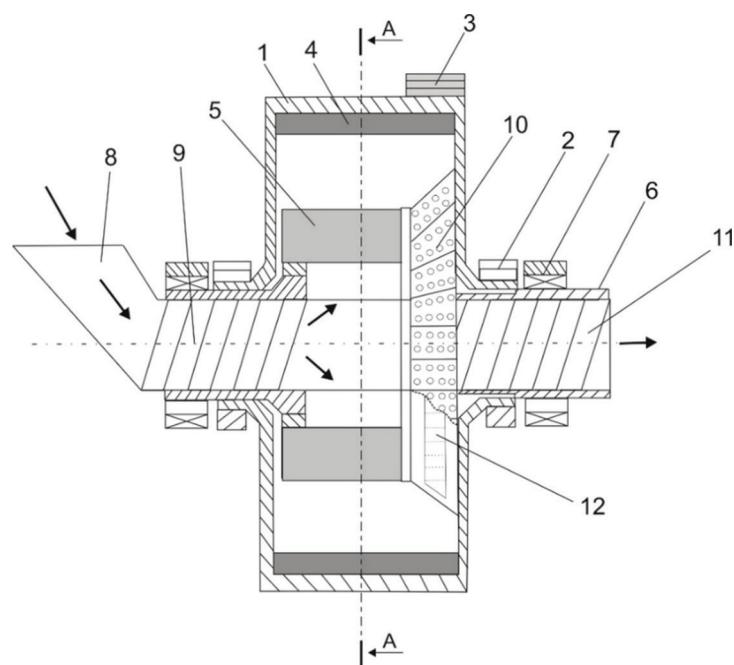


Рис. 1. Способ измельчения горных пород и роторная мельница для её осуществления / **Fig. 1.** Method of crushing rocks and a rotary mill for its implementation

Барабан (1) мельницы смонтирован на опорах скольжения (2) и получает вращение от привода через зубчатый венец (3). Внутренняя поверхность барабана имеет лифтёры (рёбра) (4) для исключения перекатывания и увеличения высоты подъёма материала. Внутри барабана соосно установлен ротор с билами (5), смонтированный на полом валу (6) и вращающийся на опорах качения (7) в противоположную сторону от направления вращения барабана. Материал из воронки (8) попадает во внутреннюю полость вала, которая служит каналом для подачи руды в мельницу через загрузочное отверстие. Для облегчения перемещения материала внутри вала предусмотрена винтовая спираль (9). Вторая половина вала также полая и служит для разгрузки измельчённой продукции через косоугольные (торцевые) лифтёры с перфорированными отверстиями (10), благодаря которым осуществляется возврат недоизмельчённых частиц в процесс измельчения, а измельчённая часть проваливается через перфорированные отверстия на косоугольных (торцевых) лифтёрах и разгружается через центральное соосное разгрузочное отверстие (11), при этом под косоугольными (торцевыми) лифтёрами для облегчения разгрузки измельчённых частиц расположены дополнительные лифтёры (12), смонтированные на вращающемся полом валу.

На основе патентной документации разработан, спроектирован, изготовлен и испытан опытно-промышленный образец новой роторной мельницы МДР. Опытно-промышленный образец роторной мельницы изготовлен на механическом заводе «ВОСХОД» в варианте периодического действия. В статье приведены результаты опытно-конструкторских работ по разработке новой роторной мельницы МДР и результаты предваритель-

ных малообъёмных технологических испытаний опытно-промышленного образца роторной мельницы МДР.

Мельница-дробилка роторная МДР (рис. 2) периодического действия предназначена для дезинтеграции твёрдого кускового материала размером до 20 мм. Конструктивно мельница содержит установленный с возможностью вращения барабан с лифтёрами на внутренней поверхности, приспособления для загрузки и пневматической выгрузки материала, при этом внутри барабана соосно на полом валу установлен ротор с билами.

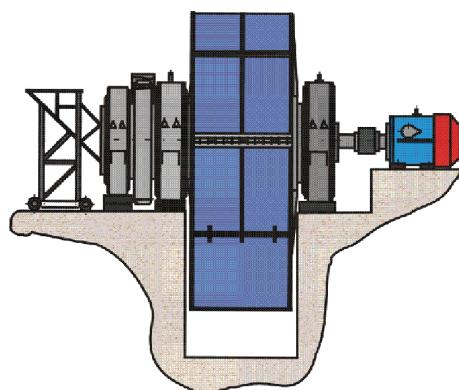


Рис. 2. Общий вид мельницы роторной МДР /
Fig. 2. General view of the MDR rotary mill

Общий вид и основные конструктивные параметры изготовленного опытно-промышленного образца мельницы роторной МДР представлены на рис. 3 и в табл. 1. Способ дезинтеграции рудного материала, реализованный в данной мельнице, позволяет повысить эффективность измельчения рудных материалов, а также за счёт укрупнённого исходного питания совместить в одном аппарате процессы дробления и измельчения, сократив, соответственно, количество стадий дробления и измельчения.

Таблица 1 / Table 1

Основные конструктивные параметры мельницы роторной МДР /
Main design parameters of the MDR rotary mill

Параметры / Parameters	Ед. изм. / UOM	Показатели / Indicators
Производительность / Performance	кг/ч / kg/h	до 200
Размер загружаемого материала / Size of the loaded material	мм / mm	до 20
Диаметр барабана / Drum diameter	мм	470
Ширина барабана / Drum width	мм	264
Диаметр ротора / Rotor diameter	мм	320
Мощность двигателя ротора / Rotor motor power	кВт	3.0
Мощность двигателя барабана / Drum motor power	кВт	2.2
Масса без электродвигателя и редуктора / Weight without motor and gearbox	кг	937,7



Рис. 3. Опытно-промышленный образец мельницы роторной МДР /
Fig. 3. Pilot-industrial sample of the rotary mill MDR

Практически роторная мельница работает следующим образом: исходный материал равномерно подаётся через воронку в загрузочный патрубок и при помощи спирального транспортера через отверстия в роторе попадает в полость барабана. Вращение барабана происходит в субкритическом режиме. Куски породы равномерно разбрасываются с помощью бил вращающегося ротора. При этом происходит удар кусков с футерованной внутренней поверхностью барабана и с частью материала, вращающейся вместе с барабаном. Порода под действием центробежной силы прижимается ко внутренней стенке барабана и поднимается до тех пор, пока не достигнет точки отрыва. Барабан вращается в субкритическом режиме, а частицы после отрыва описывают параболическую траекторию и попадают на лицевую сторону бил ротора, который вращается противоположно барабану. Основное разрушение горной породы происходит под воздействием ударов бил. Дополнительное разрушение создаётся в результате отбрасывания обломков породы билами, в том числе и поступающего исходного материала, на поверхность барабана. Во всех случаях динамическое воздействие на горную породу сопровождается ударами кусков породы с друг другом (самоизмельчением), что существенно повышает эффективность дезинтеграции и снижает износ поверхности рабочих органов. Такой процесс будет происходить на внутренней поверхности барабана, футерованной обломками, т. к. вращение барабана происходит в субкритическом режиме, и на поверхности ударных бил, где с одной стороны поступает исходная горная порода, а с другой на неё падают обломки пород, оторвавшиеся от внутренней поверх-

ности мельницы. Куски пород, траектория которых не пересекается с зоной ударного действия бил, падают на поверхность барабана и снова возвращаются в процесс. Таким образом, вращающийся барабан выполняет очень важную роль: создаёт режим циркуляции и обеспечивает равномерную шлейфовую подачу горной породы на ударные поверхности бил ротора. В роторной мельнице в варианте периодического действия измельчённый материал удаляется из полости барабана через разгрузочный люк.

Одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность работы в барабанных мельницах, является рациональная загрузка измельчаемого материала, т. е. его масса в зависимости от геометрических размеров барабана мельницы, потому что от массы измельчаемого материала зависит степень заполнения барабана шламом в процессе работы мельницы. В барабанных мельницах существующих конструкций детально не изучено влияние степени заполнения барабана шламом на процесс измельчения. Однако как показали К. А. Разумов и В. А. Петров¹, объём шлама в барабане мельницы существенно влияет на эффективность её работы. Учитывая, что конструкция новой разработанной мельницы МДР в отличие от известных барабанных мельниц содержит вращающийся ротор с билами, исследования по определению рациональной загрузки являются приоритетными. В барабанных мельницах периодического действия эффективность измельчения определяется не только массой, объёмом загрузки разрушающегося материала, но и временем периода измельчения [15].

¹ Разумов К. А., Петров В. А. Проектирование обогатительных фабрик: учебник. – М.: Недра, 1982. – 518 с.

В связи с этим проведены экспериментальные исследования по определению основных рациональных параметров работы опытного образца роторной мельницы МДР (массы загрузки и времени периода измельчения).

Результаты исследований по измельчению проб массой 1, 2, 3 и 4 кг при диапазоне

времени 15–60 мин приведены в табл. 2–6. Фактический объём камеры мельницы составляет 46,4 л.

Сравнительные результаты исследований по измельчению проб массой 1, 2, 3 и 4 кг за один период измельчения, составляющий 60 мин, приведены в табл. 6.

Таблица 2 / Table 2

**Результаты исследований измельчения пробы массой 1 кг /
Results of studies of grinding a sample weighing 1 kg**

Классы крупности, мм / Size classes, mm	Выход, % / Yield, %			
	15 мин / 15 min	30 мин / 30 min	45 мин / 45 min	60 мин / 60 min
-0,071	0,31	3,00	4,68	7,01
-0,1+0,071	0,23	2,10	1,71	2,19
-0,2+0,1	0,31	2,50	0,65	2,20
-0,315+0,2	1,10	0,70	0,41	1,09
-0,63+0,315	0,17	2,10	0,39	0,78
-1+0,63	0,18	1,80	0,31	0,61
-2+1	0,33	4,20	8,79	9,10
-3,2+2	0,39	4,30	8,68	9,35
-4+3,2	0,78	6,40	10,70	13,07
-5+4	12,80	24,40	20,77	26,19
+5	83,40	48,50	42,91	28,41

Таблица 3 / Table 3

**Результаты исследований измельчения пробы массой 2 кг /
Results of studies of grinding a sample weighing 2 kg**

Классы крупности, мм / Size classes, mm	Выход, % / Yield, %			
	15 мин / 15 min	30 мин / 30 min	45 мин / 45 min	60 мин / 60 min
-0,071	2,55	22,75	29,82	29,95
-0,1+0,071	1	3,20	0,98	0,90
-0,2+0,1	1,35	1,75	1,53	1,50
-0,315+0,2	0,4	1,35	0,94	0,85
-0,63+0,315	1	2,65	1,84	1,65
-1+0,63	0,95	2,25	1,99	1,75
-2+1	2,45	5,05	5,1	5,15
-3,2+2	2,8	5,85	6,3	6,65
-4+3,2	4,75	10,55	10,2	10,60
-5+4	20,45	20,70	20,21	20,85
+5	62,3	23,90	21,09	20,15

Таблица 4 / Table 4

**Результаты исследований измельчения пробы массой 3 кг /
Results of studies of grinding a sample weighing 3 kg**

Классы крупности, мм / Size classes, mm	Выход, % / Yield, %			
	15 мин / 15 min	30 мин / 30 min	45 мин / 45 min	60 мин / 60 min
-0,071	1,87	16,63	18,03	22,37
-0,1+0,071	0,83	2,93	2,91	0,71
-0,2+0,1	1,03	2,1	3,11	3,84

Окончание табл. 4 / The end of the table 4

Классы крупности, мм / Size classes, mm	Выход, % / Yield, %			
	15 мин / 15 min	30 мин / 30 min	45 мин / 45 min	60 мин / 60 min
-0,315+0,2	0,35	1,52	1,63	1,94
-0,63+0,315	0,71	2,59	2,37	1,98
-1+0,63	0,69	2,41	2,09	1,89
-2+1	1,74	6,01	5,13	4,99
-3,2+2	1,81	5,92	6,09	6,13
-4+3,2	3,36	10,01	10,5	10,21
-5+4	21,89	23,9	22,71	21,16
+5	65,72	25,98	25,43	24,78

Таблица 5 / Table 5

Результаты исследований измельчения пробы массой 4 кг /
Results of studies of grinding a sample weighing 4 kg

Классы крупности, мм / Size classes, mm	Выход, % / Yield, %			
	15 мин / 15 min	30 мин / 30 min	45 мин / 45 min	60 мин / 60 min
-0,071	1,11	11,53	11,87	12,93
-0,1+0,071	0,72	2,90	3,62	5,25
-0,2+0,1	0,91	3,93	4,84	5,73
-0,315+0,2	0,34	1,70	2,05	2,95
-0,63+0,315	0,50	2,75	2,43	2,15
-1+0,63	0,56	2,50	2,21	1,73
-2+1	1,09	6,13	5,19	4,85
-3,2+2	1,12	6,00	6,12	6,03
-4+3,2	2,20	9,88	10,70	10,15
-5+4	22,05	25,61	24,29	22,05
+5	69,40	27,09	26,68	26,20

Таблица 6 / Table 6

Сравнительные результаты исследований за 60 мин / Comparative research results in 60 minutes

Классы крупности, мм / Size classes, mm	Выход, % / Yield, %			
	1 кг / 1 kg	2 кг / 2 kg	3 кг / 3 kg	4 кг / 4 kg
-0,071	7,01	29,95	22,37	12,93
-0,1+0,071	2,19	0,90	0,71	5,25
-0,2+0,1	2,20	1,50	3,84	5,73
-0,315+0,2	1,09	0,85	1,94	2,95
-0,63+0,315	0,78	1,65	1,98	2,15
-1+0,63	0,61	1,75	1,89	1,73
-2+1	9,10	5,15	4,99	4,85
-3,2+2	9,35	6,65	6,13	6,03
-4+3,2	13,07	10,60	10,21	10,15
-5+4	26,19	20,85	21,16	22,05
+5	28,41	20,15	24,78	26,20
Степень измельчения / Degree of grinding	2,2	3,1	2,7	2,6

Сравнительный анализ результатов измельчения, представленных в табл. 6, по выходу контрольного класса крупности 0,071 мм и по степени измельчения за один и тот же период измельчения (60 мин) показал, что наибольшей эффективностью измельчения обладает проба массой 2 кг. Это позволяет сделать вывод о накоплении критического объёма шлама, образующегося в процессе измельчения и негативно сказывающегося на эффективности измельчения при превышении загрузки более 2 кг.

Общий вид исходной и измельчённой рудной пробы, где визуально можно наблюдать большое количество образовавшегося в процессе измельчения шлама, представлен на рис. 4.

Шлам в виде тонкодисперсной пыли образует на стенках вращающегося барабана футеровку, которая снижает эффективность ударных нагрузок, испытывающих разрушающие частицы при вращении ротора.

Решение приведённой проблемы возможно за счёт своевременного удаления образующегося шлама, что может быть осуществлено в исполнении мельницы МДР в варианте непрерывного действия, где в отличие от конструкции мельницы МДР периодического действия имеется разгрузочный узел для своевременного удаления измельчённого (готового) продукта (шлама). Разгрузочный узел расположен на торце вращающегося барабана и имеет колосниковую решётку или съёмные щитки секторного типа с перфорированными отверстиями заданного размера для разгрузки измельчённого материала.

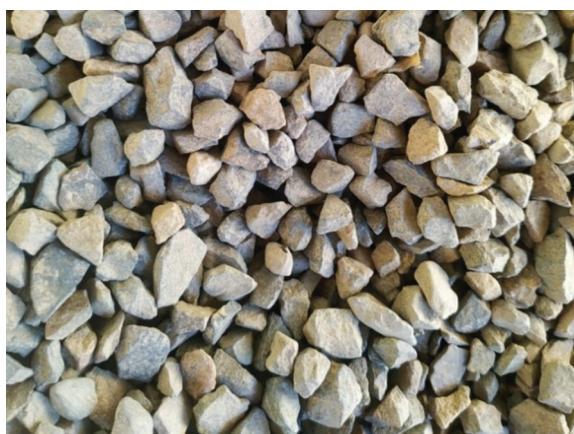
Следует отметить, что реализация и применение мельницы непрерывного действия больших типоразмеров позволяют достичь более высокой эффективности, производительности и универсальности по сравнению с мельницей периодического действия.

Снижение эффективности работы при загрузке менее 2 кг объясняется тем, что при такой заполненности барабана частицы разрушенного материала не попадают в рабочую зону вращающихся бил ротора, из-за чего происходит снижение эффективности их разрушения.

Из результатов измельчения, представленных в табл. 2–5, видно, что с увеличением времени периода измельчения рудных проб с разной массой происходит рост выхода контрольного класса крупности -0,071 мм на 0,31–29,95 %. Согласно полученным в табл. 3 данным, при измельчении наиболее рациональной загрузки массой 2 кг очевидно, что эффективность работы опытного образца роторной мельницы МДР практически не увеличивается за период измельчения более 45 мин.

Таким образом, предварительные экспериментальные исследования позволили определить основные рациональные параметры работы опытного образца новой роторной мельницы МДР периодического действия, которые составили: масса загрузки – 2 кг; время измельчения – 45 мин.

Дальнейшее продолжение работ по данной тематике будет связано с проведением научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке мельницы большего типоразмера непрерывного действия.



*Рис. 4. Общий вид исходной и измельчённой рудной пробы /
Fig. 4. General view of the original and crushed ore sample*

Выходы. В результате проведённых технологических испытаний нового опытно-промышленного образца роторной мельницы МДР экспериментальным путём получены предварительные результаты. В периодическом режиме работы роторной мельницы с объёмом рабочей камеры 46,4 л рациональными рабочими параметрами являются: масса загрузки – 2 кг, время измельчения – 45 мин. При превышении

данных показателей происходит накопление критического объёма тонкоизмельченных шламов, снижающих динамику измельчения исходного материала. Повышение эффективности и производительности в перспективе может быть осуществлено при исполнении конструкции роторной мельницы в варианте непрерывного действия больших типоразмеров с выводом измельчённого материала.

Список литературы

1. Бардовский А. Д., Герасимова А. Д., Бибиков П. Я. Разработка принципов совершенствования измельчительного оборудования // Горный журнал. 2020. № 3. С. 56–59.
2. Дмитрак Ю. В. К концепции энергоёмкости измельчения твёрдых материалов в мельницах // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 1. С. 138–146.
3. Клюев Р. В., Гаврина О. А., Михальченко С. Н. Анализ удельного потребления электроэнергии обогатительной фабрики // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 433–447.
4. Львов В. В., Читалов Л. С. Новые подходы в моделировании процессов рудоподготовки // Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке: сб. тр. XII Санкт-Петербургского конгресса. СПб., 2018. С. 266–267.
5. Львов В. В., Читалов Л. С. Современные тенденции подходов к расчёту рудоподготовительных процессов и аппаратов для переработки руд цветных металлов // Цветные металлы. 2020. № 10. С. 20–26. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03
6. Мамонов С. В., Закирничный В. Н., Метелев А. А., Дресвянкина Т. П., Волкова С. В., Кузнецов В. А., Зиятдинов С. В. Перспективные технологии раскрытия минерального сырья при подготовке к флотационному обогащению // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. № 5. С. 158–169.
7. Патент на изобретение № 2185885 РФ. Способ дезинтеграции горных пород, и роторная мельница для его осуществления / А. И. Матвеев, В. Е. Филиппов, А. Н. Григорьев. Заявка № 2000113079/03 от 25.05.2000 г.; опубл. 27.07.2002 г. Бюл. № 21.
8. Хопунов Э. А. Рудоподготовка и развитие процессов переработки минерального сырья // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 9.
9. Хопунов Э. А. Энергетические и силовые факторы селективного разрушения руд // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 79–88. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-79-88
10. Agbenuvor B. S., Antonio C., Jokovic V., Morrison R. Enhancing Coarse Gangue Rejection through Controlled and Precise Multistage Impact Breakage // Proceedings of the Physical Separation Conference. Falmouth, UK, 2019.
11. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Justification for Criteria for Evaluating Activation and Destruction Processes of Complex Ores // Minerals. 2023. No. 5. 684 p. DOI: 10.3390/min13050684
12. Bond E. C. An expert reviews the design and evolution of early autogenous grinding systems // Engineering and Mining. 1964. No. 8. P. 105–111.
13. Bu X., Chen Y., Ma G., Sun Y., Ni C., Xie G. Wet and dry grinding of coal in a laboratory-scale ball mill: Particle-size distributions // Powder Technol. 2020. P. 305–313. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.062
14. Cleary P. W., Owen P. J. Using DEM to understand scale-up for a HICOM® mill // Minerals Engineering. 2016. P. 86–109.
15. Kohobhange S.P. K., Manoratne C. H., Pitawala H.M.T.G. A., Rajapakse R.M. G. The effect of prolonged milling time on comminution of quartz // Powder Technol. 2018. P. 266–274. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.02.033
16. Lakshmanan V. I., Ojaghi A., Gorain B. Beneficiation of Gold and Silver // Innovations and Breakthroughs in the Gold and Silver Industries. Springer Nature Switzerland AG, 2019. P. 288. DOI: 10.1007/978-3-030-32549-7_4
17. Lomovskiy I., Bychkov A., Lomovsky O., Skripkina T. Mechanochemical and Size Reduction Machines for Biorefining // Molecules. 2020. No. 22. DOI: 10.3390/molecules25225345

References

1. Bardovsky AD, Gerasimova AA, Bibikov PYa. Principles of improvement of milling equipment. *Mining Journal*. 2020;(3):56–59. (In Russian).

2. Dmitrak YuV. To the concept of energy capacity of grinding solid materials in mills. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2021;(1):138–146. (In Russian).
3. Klyuev RV, Gavrina OA, Mikhalkchenko SN. Analysis of specific electrical energy consumption of the processing factory. *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*. 2020;1(1):433–447. (In Russian).
4. Lvov VV, Chitalov LS. New approaches to modeling ore preparation processes. In: Professional education, science and innovation in the 21st century: collected works of the XII St. Petersburg Congress. St. Petersburg, 2018. Pp. 266–267. (In Russian).
5. Lvov VV, Chitalov LS. Modern trends in the design of comminution processes and equipment for non-ferrous metals ores. *Non-ferrous metals*. 2020;20–26. (In Russian). DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03
6. Mamonov SV, Zakirnichny VN, Metelev AA, Dresvyankina TP, Volkova SV, Kuznetsov VA. (et al). Promising dissociation technologies for preparation of minerals to flotation. *Journal of Mining Science*. 2019;(5):158–169. (In Russian).
7. Patent for invention No. 2185885 of the Russian Federation. Method of disintegration of rocks, and a rotor mill for its implementation / Matveev AI, Filippov VE, Grigoriev AN.; Application No. 2000113079/03 dated 05.25.2000; Published 07.27.2002 Bulletin No. 21. (In Russian).
8. Khopunov EA. Energy and power factors of selective destruction of ores. *Minerals and Mining Engineering*. 2020;(1):79–88. (In Russian). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-1-79-88
9. Agbenuvor BS, Antonio C, Jokovic V, Morrison R. Enhancing coarse gangue rejection through controlled and precise multistage impact breakage. In: Proceedings of the Physical Separation Conference. Falmouth, UK, 2019.
10. Aleksandrova T, Nikolaeva N, Afanasova A, Romashev A, Kuznetsov V. Justification for criteria for evaluating activation and destruction processes of complex ores. *Minerals*. 2023;3(5):684. DOI: 10.3390/min13050684
11. Bond EC. An expert reviews the design and evolution of early autogenous grinding systems. *Engineering and Mining*. 1964;(8):105–111.
12. Bu X, Chen Y, Ma G, Sun Y, Ni C, Xie G. Wet and dry grinding of coal in a laboratory-scale ball mill: Particle-size distributions. *Powder Technology*. 2020;(359):305–313. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.062
13. Cleary PW, Owen PJ. Using DEM to understand scale-up for a HICOM® mill. *Minerals Engineering*. 2016;86–109.
14. Kohobhange SPK, Manoratne CH, Pitawala HMTGA, Rajapakse RMG. The effect of prolonged milling time on comminution of quartz. *Powder Technology*. 2018;(330):266–274. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.02.033
15. Lakshmanan VI, Ojaghi A, Gorain B. Beneficiation of Gold and Silver. In: Innovations and Breakthroughs in the Gold and Silver Industries. Springer Nature Switzerland AG, 2019. P. 288. DOI: 10.1007/978-3-030-32549-7_4
16. Lomovskiy I, Bychkov A, Lomovsky O, Skripkina T. Mechanochemical and Size Reduction Machines for Biorefining. *Molecules*. 2020;25(22):5345. DOI:10.3390/molecules25225345

Информация об авторах

Матвеев Андрей Иннокентьевич, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Россия; andrei.mati@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, обоснование методов обогащения и разработка современных технологий сухой переработки минерального сырья, инновационные технологии.

Винокуров Василий Романович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых, Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Россия; vaviro@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5698-7922>. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, инновационные технологии, исследования, разработка технологий.

Information about the authors:

Matveev Andrey I., doctor of technical sciences, senior researcher, chief researcher, Mineral Processing Laboratory, Institute of Mining of the North named after N. V. Chersky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; andrei.mati@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>. Research interests: mineral processing, justification of mineral processing methods and development of modern technologies for dry processing of mineral raw materials, innovative technologies.

Vinokurov Vasily R., candidate of technical sciences, senior researcher, OPI Laboratory, Institute of Mining of the North named after N. V. Chersky Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; vaviro@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5698-7922>. Research interests: mineral processing, innovative technologies, research, technology development.

Вклад авторов в статью

Матвеев А. И. – генерация идеи исследования, разработка концепции статьи, обоснование актуальности, формулирование основных результатов.

Винокуров В. Р. – разработка концепции статьи, методологии исследования, проведение экспериментальных работ, анализ результатов исследования, обзор литературы, оформление работы.

The authors' contribution to the article

Matveev A. I. – generation of the research idea, development of the article concept, relevance substantiation, formulation of the main results.

Vinokurov V. R. – development of the article's concept, research methodology, conducting experimental work, analysis of the research results, literature review, design of the work.

*Поступила в редакцию 28.11.2024; одобрена после рецензирования 03.02.2025;
принята к публикации 10.02.2025.*

Received 2024, November 28; approved after review 2025, February 3; accepted for publication 2025, February 10.