

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ КРУПНОСТИ ПИТАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ МНОГОКРАТНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ЦМВУ-800 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Винокуров В.Р.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск*

Ключевые слова: рудоподготовка, ударное воздействие, центробежная мельница, крупность питания, экспериментальные исследования, износ рабочих органов, эффективность измельчения.

Аннотация. Ключевым параметром, влияющим на эффективность дробильно-измельчительного оборудования ударного типа, является крупность исходного сырья. Именно этот показатель определяет гранулометрию продуктов измельчения, и, как следствие, предопределяет выбор последующей технологической схемы его обогащения. В работе представлены результаты исследований по определению рациональной крупности питания новой высокоэффективной центробежной мельницы многократного динамического действия ЦМВУ-800 при измельчении рудных проб довольно высокой крепости месторождения Гурбей, классами крупности: -15+10 мм, -13+10 мм, -10+8 мм, -8+5 мм, -5+3 мм, -3+1 мм. По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что увеличение крупности исходной измельчаемой руды повышает степень измельчения с 7,7 до 15,6. Однако, чтобы избежать повышенного износа рабочих органов от истирания, оптимальным признан класс питания -8+5 мм. При питании мельницы крупнее 8 мм разрушение происходит в основном за счёт истирания, что повышает степень измельчения, но ведёт к интенсивному абразивному износу рабочих органов мельницы, в связи с этим питание мельницы крупностью более 8 мм применимо лишь для руд низкой крепости. При этом, учитывая, что условная граница между дроблением и измельчением традиционно проходит на уровне 5 мм, эффективное измельчение рудного материала классом крупности -8+5 мм позволяет мельнице ЦМВУ-800 сочетать процессы дробления и измельчения. Это позволяет не только повысить общую эффективность разрушения, но и упростить схему рудоподготовки за счёт сокращения необходимого количества стадий переработки рудного материала.

JUSTIFICATION OF THE OPTIMAL FEED PARTICLE SIZE FOR THE TSMVU-800 CENTRIFUGAL MILL WITH MULTIPLE DYNAMIC ACTION TO ENHANCE GRINDING EFFICIENCY

Vinokurov V.R.

*N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Yakutsk*

Keywords: ore preparation, impact action, centrifugal mill, initial size, experimental studies, wear of working parts, grinding efficiency.

Abstract. A key parameter influencing the efficiency of impact-type crushing and grinding equipment is the size of the feed material. This specific factor determines the particle size distribution of the ground product and, consequently, dictates the choice of the subsequent beneficiation flowsheet. This paper presents the results of a study aimed at determining the optimal feed size for the new, high-efficiency TsMVU-800 centrifugal mill-which utilizes multiple dynamic action-when processing high-strength ore samples from the Gurbey deposit across the following size fractions: -15+10 mm, -13+10 mm, -10+8 mm, -8+5 mm, -5+3 mm, and -3+1 mm. Experimental studies have established that increasing the particle size of the feed ore raises the degree of comminution from 7.7 to 15.6. However, to avoid excessive wear of the working components due to abrasion, the -8+5 mm feed size fraction was determined to be optimal. When the mill is fed with material coarser than 8 mm, breakage occurs primarily through attrition; while this increases the degree of comminution, it leads to intense abrasive wear of the mill's working components. Consequently, feeding the mill with material coarser than 8 mm is suitable only for low-strength ores. Moreover, given that the conventional boundary between crushing and grinding is traditionally set at 5 mm, the effective grinding of ore material in the -8+5 mm size fraction enables the TsMVU-800 mill to combine the crushing and grinding processes. This not only enhances overall breakage efficiency but also simplifies the ore preparation flowsheet by reducing the number of processing stages required.

Введение

Процессы измельчения в рудоподготовке представляют из себя последовательное уменьшение размеров разрушаемых частиц руды до определенных размеров, обеспечивающих максимальное раскрытие полезного компонента из вмещающей породы. Разрушение рудного материала происходит под действием механических сил, за счет различных способов разрушения (удар, раскалывание, истирание, раздавливание). На сегодняшний день большое распространение получили измельчительные установки ударного действия, которые обеспечивают высокую степень и качество измельчения [1-3]. Однако, при измельчении рудных материалов выше средней крепости эффективность работы ударных мельниц снижается.

Все известные дробильно-измельчительные агрегаты ударного действия основаны на разрушении свободным ударом или ударом налету [4, 5]. Разрушение руды в данном случае происходит за счет динамических воздействий, вследствие которых разрушение куска происходит в результате столкновения с подвижным или неподвижным отражателем [6, 7]. При этом, главными факторами, влияющими на эффективность разрушения, являются скорость столкновений и их количество [8]. Как правило, повышение скорости столкновений в ударных мельницах решается за счет повышения окружных скоростей вращения рабочих органов или за счет увеличения их геометрических размеров, что неизбежно ведёт к увеличению энергоёмкости и без того энергозатратных процессов измельчения.

Для решения данной проблемы в ИГДС СО РАН разработан, запатентован и изготовлен опытный образец центробежной мельницы многократного ударного действия ЦМБУ-800 [9]. Разрушение руды в разработанной мельнице происходит за счет многократных механических воздействий об подвижные противоположно вращающиеся рабочие органы с увеличением скорости столкновений измельчаемых частиц руды [10].

Ранее опытный образец мельницы ЦМБУ-800 прошел предварительные испытания при крупнообъемном опробовании месторождений «Одолго» и «Задержнинское», где показал высокую степень измельчения [4, 5]. Также, ранее проведенными исследованиями были установлены оптимальные конструктивные и рабочие параметры центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия, таких как количество ступеней на ее рабочих органах, частота вращения и радиус рабочих органов, а также скорость столкновения разрушаемой частицы [11].

Материалы и методы исследований

Одним из основных факторов, определяющих эффективность работы измельчительных установок ударного действия, является рациональная крупность питания мельницы, от которой напрямую зависит крупность измельченного рудного материала и дальнейшая технологическая схема переработки измельченного готового продукта.

Целью данных исследований является определение рациональной крупности питания опытного образца центробежной мельницы многократного динамического действия ЦМБУ-800.

Исследования проводились на опытном образце мельницы ЦМБУ-800; общий вид и основные конструктивные параметры опытно-промышленного образца центробежной мельницы ступенчатой ЦМБУ-800 показаны на рисунке 1.

Измельчению подвергались руды довольно высокой крепости месторождения Гурбей, классами крупности: -15+10 мм, -13+10 мм, -10+8 мм, -8+5 мм, -5+3 мм, -3+1 мм. Продукты измельчения подвергались ситовому анализу. Гранулометрический состав продуктов измельчения определяли на механических анализаторах по стандартным методикам. Сита брали с квадратными ячейками и набором классов: +15 мм, -15+13 мм, -13+10 мм, -10+8 мм, -8+5 мм, -5+3 мм, -3+2,5 мм, -2,5+1,6 мм, -1,6+1 мм, -1+0,5 мм, -0,5+0,315 мм, -0,315+0,2 мм, -0,2+0,1 мм, -0,1+0,071 мм и -0,071 мм.

Эффективность работы опытного образца центробежной мельницы многократного динамического действия ЦМБУ-800 оценивалась по степени измельчения.



Параметры	Показатели
Производительность, т/ч	до 6
Крупность исходного питания, мм	до 15
Диаметр рабочих органов: верхнего, мм	790
нижнего, мм	770
Степень измельчения	до 30
Мощность двигателей, кВт	7
Масса измельчителя, кг	900

Рис. 1. Общий вид и основные конструктивные параметры опытного образца центробежной мельницы ступенчатой ЦМВУ-800

Степень измельчения рудного материала определялась по формуле:

$$i = D_1 / D_2,$$

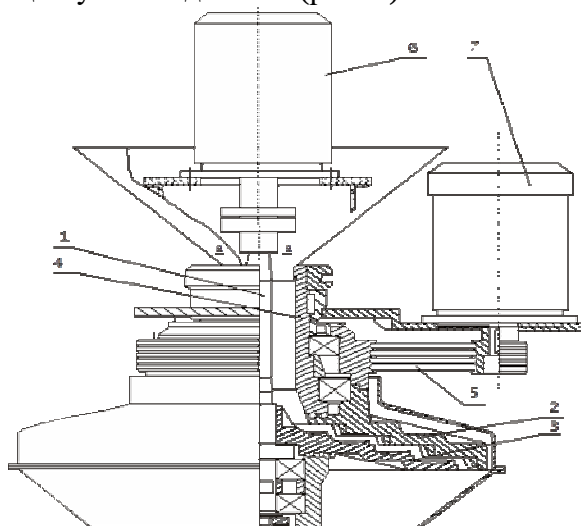
где D_1 , D_2 – средневзвешенный диаметр по массе частиц продуктов соответственно до и после измельчения.

Средневзвешенный диаметр частиц в продуктах рассчитывается на основе гранулометрического состава по формуле:

$$D = \frac{\sum \gamma_i \cdot d_i}{\sum \gamma_i},$$

где γ_i – выход узкого класса крупности, %; d_i – средний диаметр частиц узкого класса (среднеарифметического пределов), мм; $\sum \gamma_i$ – общий выход всех классов, %; $\sum \gamma_i \cdot d_i$ – сумма произведений выхода узкого класса.

Конструктивно вся измельчающая установка смонтирована на раме и состоит из следующих узлов и деталей (рис. 2).



- 1 – вал в сборе;
- 2 – ротор верхний;
- 3 – ротор нижний;
- 4 – втулка несущая;
- 5 – передача клиноременная;
- 6 – электродвигатель верхнего ротора,
 $N = 3,5$ кВт;
- 7 – электродвигатель нижнего ротора,
 $N = 3,5$ кВт

Рис. 2. Конструкция центробежной ступенчатой мельницы:

Особенность, центробежной мельницы ЦМВУ-800 заключается в возможности реализации многократных динамических воздействий в процессе перемещения частиц в рабочей зоне дезинтеграции. Это достигается, благодаря увеличению скорости взаимодействия частиц с поверхностью рабочих органов по мере радиального перемещения материала в зоне измельчения от загрузки к разгрузке. При этом обеспечивается эффективное разрушение измельчаемых материалов по мере последовательного уменьшения их размера (потери массы). Рабочие органы мельницы представляют собой два противоположно вращающихся горизонтально расположенных диска ступенчатой формы. На рисунке 3 представлена схема рабочей камеры мельницы ЦМВУ-800.

Результаты экспериментов

Для определения рациональной крупности питания опытного образца центробежной мельницы многократного динамического действия ЦМВУ-800 были проведены экспериментальные исследования по измельчению рудных проб месторождения Гурбей довольно высокой крепости с разными классами крупности.

На рисунке 4 представлен фрагмент работы мельницы ЦМВУ-800.

Сравнительные средние значения полученных результатов при измельчении рудных проб классами крупности: -15+13 мм, -13+10 мм, -10+8 мм, -8+5 мм, -5+3 мм, -3 +1 мм, при заданных рабочих параметрах мельницы ЦМВУ-800 представлены в таблице 1.

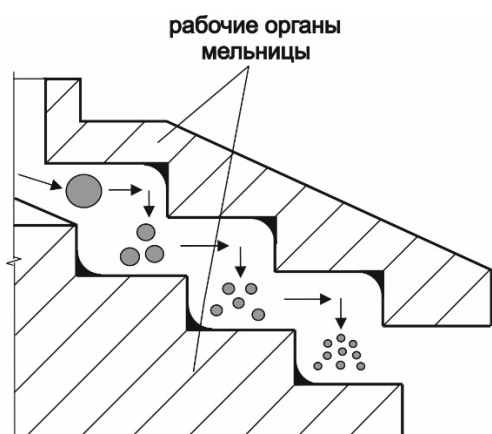


Рис. 3 Схема рабочей камеры ЦМВУ-800



Рис. 4. Фрагмент работы центробежной мельницы ЦМВУ-800

Табл. 1. Гранулометрические составы продуктов измельчения руд разных классов крупности при измельчении на опытном образце мельницы ЦМВУ-800

Классы крупности, мм	Выход, %					
	-15+13	-13+10	-10+8	-8+5	-5+3	-3+1
-0,071	5,2	19,2	20,8	23,2	18,9	23,9
-0,1+0,071	6,8	17,7	17,9	13,0	16,2	22,2
-0,2+0,1	19,7	13,0	12,8	8,5	7,9	6,0
-0,315+0,2	18,7	10,59	10,9	9,6	8,8	9,0
-0,5+0,315	12,8	11,6	10,7	17,9	18,1	25,5
-1+0,5	11,2	5,75	5,3	13,1	16,9	13,4
-1,6+1	9,7	6,8	8,7	7,6	7,9	0,0
-2,5+1,6	5,5	6,5	6,8	5,2	5,5	0,0
-3+2,5	4,5	4,5	3,1	2,0	0,0	0,0
-5+3	3,7	2,4	3,1	0,0	0,0	0,0
-8+5	2,3	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0
-10+8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-13+10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-15+13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Степень измельчения	15,6	15,4	14,3	13,0	10,2	7,7

По распределению продуктов измельчения рудных проб разных классов крупности представленного в таблице 1 видно, что измельчение проб исходной крупностью менее 8 мм сопровождается характерным для ударного способа разрушения преимущественным накоплением измельченного материала в двух узких интервалах крупности: -1+0,315 мм и -0,1+0,0 мм, а при измельчении материала более 8 мм распределение измельченного материала по классам крупности более равномерное, что более характерно при разрушении руд истирающими нагрузками.

При этом, из полученных результатов видно, что с повышением крупности исходного рудного материала, повышается степень его измельчения. Степень измельчения по соотношению средневзвешенной суммарной крупности проб исходной и конечной измельченной партии руды с повышением крупности исходного материала возрастает от 7,7 до 15,6. Данное повышение для исходного материала крупностью менее 8 мм (класс крупности -3+1 мм; -5+3 мм; -8+5 мм), вероятно, является следствием механизма свободного ударного воздействия, ключевым фактором которого, влияющим на эффективность разрушения является масса разрушаемой частицы, а для измельчаемого материала крупностью более 8 мм (класс крупности -10+8 мм, -13+10 мм, -15+13 мм) повышение степени измельчения в основном происходит за счет истирающих нагрузок.

Таким образом, экспериментальным путем установлено, что при измельчении рудных проб в центробежной мельнице ЦМВУ-800 с повышением крупности исходного рудного материала, повышается степень его измельчения от 7,7 до 15,6.

Выводы

На первый взгляд, очевидно, что для повышения эффективности работы мельницы необходимо повысить крупность ее питания. Однако, тут необходимо учитывать то, что одним из основных недостатков центробежных мельниц является интенсивный износ рабочих органов, причем степень износа рабочих органов зависит от механизма разрушения, используемого в измельчительной центробежной установке. Чем больше истирающих нагрузок участвует в процессе разрушения, тем существеннее происходит износ рабочих органов. В этом заключается негативное влияние истирающих нагрузок в центробежных мельницах в отличие от ударных. При чем, как известно, на практике в каждом дробильно-измельчительном аппарате любого способа разрушения, измельчение материала происходит за счет сочетания различных способов разрушения (удара, раскалывания, истирания, раздавливания). При этом, в каждом измельчительном аппарате с учетом его конструкции преобладает один способ разрушения, как, например, в конструкцию мельницы ЦМВУ-800 заложен принцип разрушения осуществляемый в основном за счет ударных динамических нагрузок, позволяющий предотвратить износ рабочих органов.

Таким образом, экспериментально установлено, что при измельчении рудных проб в опытном образце центробежной мельнице ЦМВУ-800 с повышением крупности исходного рудного материала, повышается степень его измельчения от 7,7 до 15,6. Однако, для предотвращения интенсивного износа рабочих органов за счет истирающих нагрузок рациональной крупностью питания мельницы является класс крупности -8+5 мм. При превышении крупности исходного материала более 8 мм разрушение частиц происходит не только за счет ударных динамических нагрузок, но и за счет истирания, что с позиций энергетических и силовых факторов, участвующих в процессе, повышает эффективность разрушения, но может привести к интенсивному износу рабочих органов. Поэтому укрупненное питание более 8 мм, рекомендуется для измельчения руд низкой крепости.

Заключение

При измельчении рудных проб месторождения Гурбей разных классов крупности (-10+8 мм, -13+10 мм, -15+13 мм, 8+5 мм, 5+3 мм, -3+1 мм), установлена рациональная крупность питания (-8+5 мм) опытного образца центробежной мельницы многократного динамического действия ЦМВУ-800. Учитывая, что традиционная граница процессов дробления и измельчения проходит по крупности 5 мм, за счет укрупненного питания исходным рудным материалом классом крупности -8+5 мм у центробежной мельницы ЦМВУ-800 есть возможность объединить в одной мельнице процессы дробления и измельчения, за счет чего возможно повысить эффективность разрушения рудного материала и упростить схему рудоподготовки из-за сокращения необходимого количества стадий переработки рудного материала. В целом, мельница ЦМВУ-800 показала высокую эффективность работы при измельчении рудных проб довольно высокой крепости месторождения Гурбей, степень измельчения при разрушении рационального класса крупности -8+5 мм составила 13, что является высоким показателем для мельниц ударного действия.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2026-0056, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 126021217276-7).

Список литературы

1. Савиных П.А., Исупов А.Ю., Иванов И.И. Определение основных кинематических показателей движения частицы в канале распределительной чаши центробежно-роторного измельчителя // Вестник НГИЭИ. – 2020. – №7. – С. 37-46.
2. Батыров В.И., Апхудов Т.М. Обоснование основных конструктивных и технологических параметров двухвалкового роторного измельчителя // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета. – 2022. – №4. – С. 87-97. – DOI: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-87-97.
3. Афанасьев А.И., Zubov B.V., Симисин Д.И., Чиркова А.А. Исследование измельчаемости руд в роторной центробежной мельнице // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2025. – №2. – С. 25-34. – DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-25-34.
4. Барон Л.И., Хмельковский И.Е. Разрушаемость горных пород свободным ударом. – М.: Наука, 1971. – 203 с.
5. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №1. – С. 71-79. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79.
6. Матвеев А.И., Львов Е.С. Апробация методики определения степени дезинтеграции золоторудных образцов на аппаратах с ударным принципом работы ДАУ-250 и ДКД-300 // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №23. – С. 189-196. – doi.org/10.26160/2658-3305-2023-23-189-196.
7. Матвеев А.И., Львов Е.С. Опыт реализации способа дробления многократным ударным воздействием в дробильных аппаратах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – №9-1. – С. 114-125. – DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_114.
8. Афанасьев А.И., Zubov B.V., Симисин Д.И., Чиркова А.А. Измельчение горной породы в центробежных мельницах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – №3. – С. 18-29. – DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_18.
9. Патент №2416463 РФ. Центробежный измельчитель с кольцевыми отбойными элементами / А.И. Матвеев, В.Р. Винокуров. – Заявка №2009122706 от 15.06.2009; опублик. 20.04. 2011, Бюл. №11.
10. Vinokurov V.R. Determination of rational process variables for multi-step centrifugal mills // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 773, p. 012066. doi.org/10.1088/1755-1315/773/1/012066.
11. Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Определение оптимальных конструктивных и рабочих параметров центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №27. – С.67-76. – doi.org/10.26160/2658-3305-2024-27-67-76.

References

1. Savinykh P.A., Isupov A.Yu., Ivanov I.I. Determination of the main kinematic parameters of particle motion in the distribution bowl channel of a centrifugal-rotor crusher // Bulletin of NGIEI. 2020, no. 7, pp. 37-46.
2. Batyrov V.I., Apkhudov T.M. Justification of the main design and technological parameters of a two-roll rotary crusher // News of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University. 2022, no. 4, pp. 87-97. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-87-97.
3. Afanasyev A.I., Zubov V.V., Simisinov D.I., Chirkova A.A. Study of ore grindability in a rotary centrifugal mill // News of the higher educational institutions. Mining journal. 2025, no. 2, pp. 25-34. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-25-34.
4. Baron L.I., Khmelkovsky I.E. Destructibility of rocks by a free blow. – M.: Science, 1971. – 203 p.
5. Simonov P.S. Experimental study of rock crushing by a single blow // Mining information and analytical bulletin. 2020, no. 1, pp. 71-79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79.
6. Matveyev A.I., Lvov E.S. Testing a Methodology for Determining the Degree of Disintegration of Gold Ore Samples Using DAU-250 and DKD-300 Impact-Based Apparatus // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023, no. 23, pp. 189-196. doi.org/10.26160/2658-3305-2023-23-189-196.
7. Matveyev A.I., Lvov E.S. Experience in Implementing a Multiple Impact Crushing Method in Crushing Apparatus // Mining information and analytical bulletin. 2025, no. 9-1, pp. 114-125. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_91_0_114.
8. Afanasyev A.I., Zubov V.V., Simisinov D.I., Chirkova A.A. Grinding of rock in centrifugal mills // Mining information and analytical bulletin. 2025, no. 3, pp. 18-29. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_3_0_18.
9. Patent No. 2416463 RU. Centrifugal grinder with ring impact elements / A.I. Matveev, V.R. Vinokurov. – Appl. No. 2009122706 from 15.06.2009; publ. 20.04. 2011, Bul. No. 11.

10. Vinokurov V.R. Determination of rational process variables for multi-step centrifugal mills // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 773, p. 012066. doi.org/10.1088/1755-1315/773/1/012066.
11. Matveev A.I., Vinokurov V.R. Determination of optimal design and operating parameters of a centrifugal step mill with multiple impact action // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 27, pp. 67-76. doi.org/10.26160/2658-3305-2024-27-67-76.

Сведения об авторах:

Винокуров Василий Романович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых
vaviro@mail.ru

Information about authors:

Vinokurov Vasily Romanovich – candidate of technical sciences, senior researcher of the mineral processing laboratory

Получена 07.07.2026