

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СТУПЕНЧАТОЙ МЕЛЬНИЦЫ МНОГОКРАТНОГО УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Матвеев А.И., Винокуров В.Р.

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

Ключевые слова: центробежная ступенчатая мельница, разрушение ударом, измельчение породы, эффективность измельчения, конструкция мельницы, ступенчатая форма.

Аннотация: В работе представлены результаты исследований по определению оптимальных конструктивных и рабочих параметров центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия для частиц руд кварц-жильного типа крупностью -2,5+1,6 мм. Особенностью центробежной ступенчатой мельницы является форма противоположно вращающихся рабочих органов. Благодаря этому обеспечивается организация циркулирующих потоков частиц измельчаемой руды на каждой ступени, что приводит к тому, что измельчаемые частицы подвергаются не только многократным ударным воздействиям, но и самоизмельчению за счет взаимодействия друг с другом. При эксплуатации центробежной ступенчатой мельницы важно определить ее рациональные конструктивные и рабочие параметры, такие как количество ступеней на рабочих органах мельницы и их частота вращения. Эти параметры влияют на скорость столкновения частиц в момент удара об отражатель, которая определяет эффективность процесса измельчения. По результатам исследований на лабораторной модели установлены зависимости эффективности измельчения от ее рабочих параметров. На основе данных зависимостей определены рациональные конструктивно-режимные параметры мельницы: количество ступеней 3 шт.; частота оборотов нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего 2000 об/мин; зазор между рабочими органами 20 мм.

DETERMINATION OF OPTIMAL DESIGN AND OPERATING PARAMETERS OF A MULTI-IMPACT CENTRIFUGAL STEP MILL

Matveev A.I., Vinokurov V.R.

*Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk*

Keywords: centrifugal step mill, impact destruction, rock crushing, grinding efficiency, mill design, step shape.

Abstract. The paper presents the results of studies to determine the optimal design and operating parameters of a centrifugal step mill with multiple impact action for quartz-vein type ore particles with a size of -2.5+1.6 mm. A special feature of the centrifugal step mill is the shape of the counter-rotating working elements. This ensures the organization of circulating flows of particles of crushed ore at each stage, which leads to the fact that the crushed particles are subjected not only to repeated impacts, but also to self-comminution by interaction with each other. When operating a centrifugal step mill, it is important to determine its optimal design and operating parameters, such as the number of steps on the working parts of the mill and their rotation speed. These parameters affect the particle collision speed at the moment of impact with the reflector, which determines the efficiency of the grinding process. Based on the results of research using a laboratory model, the dependence of grinding efficiency on its operating parameters was established. Based on these dependencies, rational design and operational parameters of the mill were determined: number of stages: 3 pcs.; speed of the lower working body is 5000 rpm and the upper one is 2000 rpm; the gap between the working bodies is 20 mm.

Введение

В настоящее время одним из перспективных направлений повышения эффективности работы горного измельчительного оборудования являются исследования по разработке и созданию компактных и высокоэффективных измельчителей ударного действия, которые имеют ряд существенных преимуществ, таких как низкая энергоемкость, простота и компактность конструкции, высокая производительность [1-3].

Большинство существующих ударных мельниц, предназначенных для измельчения рудных материалов, не учитывают разнообразие физико-механических свойств измельчаемого сырья [4-6].

Они реализуют ограниченные одно-двухактные механические воздействия динамического характера, которые оказываются недостаточными для эффективного разрушения рудного материала [7-10]. Улучшение процесса измельчения становится возможным только с применением новых конструктивных решений в центробежных измельчителях, направленных на создание оптимальных условий для ударного разрушения материала в рабочей зоне измельчения.

Повышение эффективности измельчения может быть достигнуто с использованием центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия, разработанной в лаборатории обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН [11].

Разработанная центробежная ступенчатая мельница отличается возможностью применения многократных динамических воздействий в процессе перемещения частиц в рабочей зоне дезинтеграции [12, 13]. Это достигается путем увеличения скорости взаимодействия частиц с поверхностью рабочих органов по мере их радиального перемещения в зоне измельчения от загрузки к разгрузке. Таким образом, обеспечивается эффективное разрушение измельчаемых материалов при последовательном уменьшении их размера (потере массы).

Материалы и методы исследований

Целью данных исследований является определение оптимальных конструктивных и рабочих параметров центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия, таких как количество ступеней на ее рабочих органах, частота вращения и радиус рабочих органов, а также скорость удара разрушаемой частицы.

Исследования по определению оптимальных конструктивных и рабочих параметров центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия, проводились на ее лабораторной модели с использованием кварцевых руд.

Схематическая конструкция центробежной ступенчатой мельницы представлена на рисунке 1. Центробежная ступенчатая мельница состоит из герметичного цилиндрического разборного корпуса 1 с загрузочным отверстием 2, верхнего 3 и нижнего 4 противоположно вращающихся рабочих органов ступенчатой формы, а также разгрузочного отверстия 5.

Ступенчатая мельница работает следующим образом. Исходный измельчаемый рудный материал загружается в загрузочное отверстие 2 и поступает в рабочую камеру мельницы на верхнюю ступень вращающегося нижнего рабочего органа 4, где куски измельчаемого рудного материала приобретают максимальную радиальную скорость в крайней точке ступени, и, выбрасываясь от нее испытывают ударные нагрузки об стенки противоположно вращающегося верхнего рабочего органа 5. Неразрушенные куски рудного материала отскакивают и снова получают удары об рабочие органы мельницы до тех пор, пока не разрушатся, а разрушенные частицы за счет потери импульса выпадают на вторую ступень нижнего рабочего органа, от которого отражаются и встречают удар об стенки верхнего противоположно вращающегося рабочего органа. Процесс продолжается, пока не разгрузится дезинтегрированная порода под воздействием центробежных сил с последней ступени нижнего рабочего органа и не удалится через разгрузочное отверстие на днище корпуса. Корпус герметизируется для предотвращения выброса пыли наружу.

Ступенчатая форма рабочих органов, в данном случае нижнего рабочего органа (активатора) и верхнего рабочего органа (отражателя), необходима для организации циркулирующих потоков измельчаемых частиц между противоположно вращающимися рабочими органами и для обеспечения последовательного наращивания линейной скорости движения частиц. Это необходимо для компенсации потери массы частиц по ходу их перемещения в рабочей зоне измельчения, что является основным фактором для достижения максимального эффекта разрушения частиц.

На рисунке 2 наглядно представлено образование циркулирующих потоков измельчаемых частиц в рабочей камере ступенчатой мельницы. Предполагается, что циркулирующие потоки образуются на каждой ступени рабочей камеры мельницы, благодаря противоположному вращению нижнего и верхнего рабочих органов, что приводит к многократным динамическим воздействиям на разрушаемые частицы.

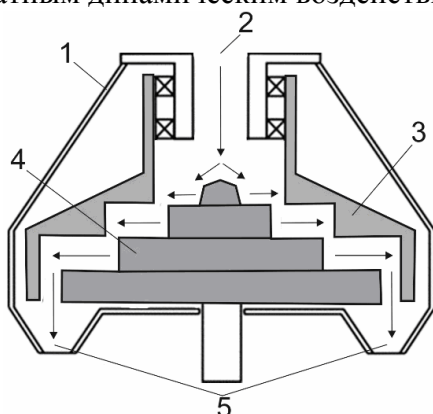


Рис. 1. Конструкция центробежной ступенчатой мельницы

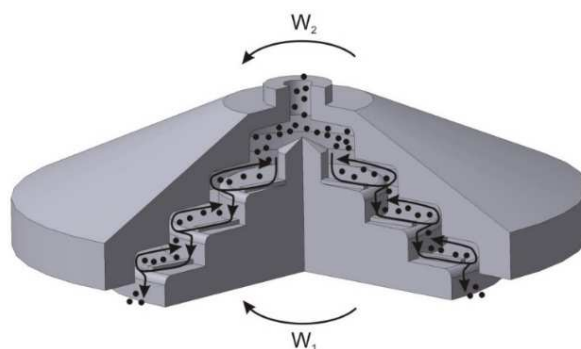


Рис. 2. Схема образования циркулирующих потоков в рабочей камере центробежной мельницы

При эксплуатации центробежной ступенчатой мельницы важно определить ее оптимальные конструктивные и рабочие параметры, такие как количество ступеней на рабочих органах мельницы и их частота вращения. Эти параметры влияют на скорость столкновения частиц в момент удара об отражатель, которая определяет эффективность процесса измельчения. Для этого требуется провести специальные эксперименты.

Результаты экспериментов

Влияние числа ступеней на эффективность измельчения

Экспериментальные исследования проведены с целью подтверждения влияния количества ступеней на эффективность разрушения рудных материалов в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице. Исследованы модели с разным числом ступеней (от 1 до 4 ступеней) при измельчении проб рудного материала (черносланцевой фазы кварц-жильной золотосодержащей руды) размером $-2,5+1,6$ мм при заданных параметрах мельницы (табл. 1).

Табл. 1. Гранулометрический состав продуктов измельчения в лабораторной модели ступенчатой мельницы с разным количеством ступеней

Классы крупности, мм	Выход, %			
	1 ступень	2 ступени	3 ступени	4 ступени
-0,05+0	11,8	22,9	37,8	38,3
-0,25+0,05	22,3	29,1	44,9	42,1
-0,5+0,25	17,9	12,8	8,8	8,1
-1+0,5	21,4	15,6	6,2	6,8
-2,5+1	26,6	19,6	2,3	2

Распределение измельченного материала по классам крупности при разном количестве ступеней на рабочих органах мельницы представлены на рисунке 3. Из графиков (рис. 3) видно, что с увеличением числа ступеней на рабочих органах ступенчатой мельницы эффективность измельчения рудного материала заметно повышается, при этом выход крупных классов ($-2,5+1$ мм) уменьшается, а более мелких ($-0,25+0$ мм) увеличивается.

Однако эффективность практически не меняется при увеличении числа ступеней более 3-х, так как размер разрушаемых частиц при заданных параметрах динамического воздействия достигает такой крупности, что дополнительные ступени не способны обеспечить их разрушение. Таким образом, наиболее оптимальным является трехступенчатый вариант мельницы.

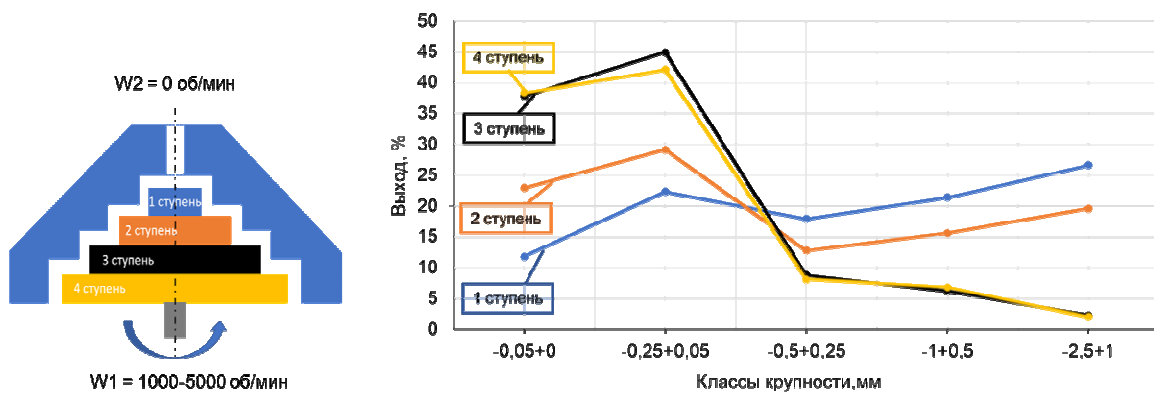


Рис. 3. Распределение измельченного материала по классам крупности при разном количестве ступеней на рабочих органах мельницы

Взаимосвязь окружной скорости вращения рабочих органов с эффективностью измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице

Из-за ступенчатой формы рабочих органов, с постепенным увеличением радиусов каждой последующей ступени, скорость движения подвергаемых разрушению частиц последовательно возрастает.

В таблице 2 отражено увеличение скорости столкновения частиц, подвергаемых разрушению, при повышении окружной скорости вращения нижнего рабочего органа в ступенчатой мельнице с неподвижным верхним рабочим органом.

Табл. 2. Значение скоростей движения разрушаемой частицы при увеличении окружной скорости нижнего рабочего органа

Частота оборотов, об/мин	1 ступень	2 ступень	3 ступень
1000	7,42 м/с	8,95 м/с	11,18 м/с
2000	14,44 м/с	17,94 м/с	22,39 м/с
3000	21,76 м/с	26,92 м/с	33,59 м/с
4000	29,09 м/с	35,89 м/с	44,79 м/с
5000	36,41 м/с	44,87 м/с	55,99 м/с
6000	43,73 м/с	53,84 м/с	67,19 м/с
7000	51,04 м/с	62,82 м/с	78,39 м/с

Окружная скорость вращения рабочих органов в центробежных ударных мельницах играет ключевую роль в их эффективности. В связи с этим, экспериментально были определены оптимальные значения окружных скоростей вращения рабочих органов лабораторной модели ступенчатой мельницы.

Прежде всего, были проведены эксперименты для определения зависимости эффективности измельчения рудных материалов от частоты вращения нижнего рабочего органа в диапазоне от 1000 до 6000 об/мин при неподвижном отражательном верхнем рабочем органе. Для измельчения использовался исходный рудный материал (кварц) с крупностью -2,5+1,6 мм.

Средние значения полученных результатов показаны на графике, представленного на рисунке 4.

Установлено, что при увеличении числа оборотов, начиная с 4000 об/мин, происходит повышение эффективности измельчения (выхода контрольного класса крупности -0,071 мм). Однако при превышении скорости вращения более 5000 об/мин дальнейшее увеличение эффективности измельчения практически не происходит. Это связано с массовым выносом материала сильными потоками воздуха, образующимися в рабочей камере мельницы. Таким образом, оптимальной частотой вращения нижнего рабочего органа является диапазон скорости вращения до 5000 оборотов в минуту.

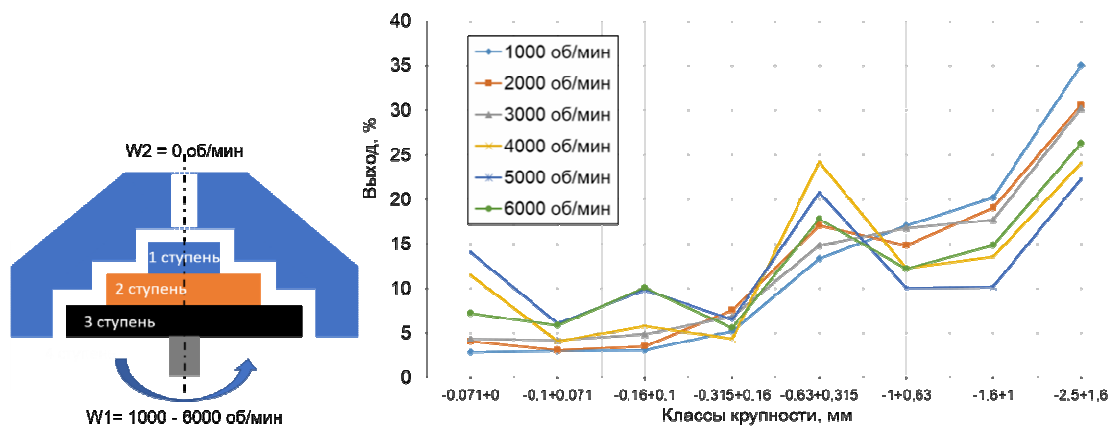


Рис. 4. Распределение продуктов измельчения при разной окружной скорости нижнего рабочего органа

Как уже отмечалось, особенностью ступенчатого измельчителя является форма противоположно вращающихся рабочих органов. Благодаря этому обеспечивается организация циркулирующих потоков частиц измельчаемой руды (рис. 5) на каждой ступени, что приводит к тому, что измельчаемые частицы подвергаются не только многократным ударным воздействиям, но и самоизмельчению за счет взаимодействия друг с другом. Для выявления влияния окружной скорости вращения рабочих органов на эффективность измельчения в лабораторной ступенчатой мельнице требуется определить оптимальное соотношение окружных скоростей противоположно вращающихся рабочих органов.



Рис. 5. Схема циркулирующих потоков в рабочей камере

В последующем ряде экспериментов была выявлена оптимальная частота вращения верхнего рабочего органа. С учетом условий максимального разрушения определено рациональное соотношение частот противоположно вращающихся верхнего и нижнего ступенчатых рабочих органов. На рисунке 6 представлены совокупные результаты при частоте вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего рабочего органа в диапазоне от 500 об/мин до 3000 об/мин.

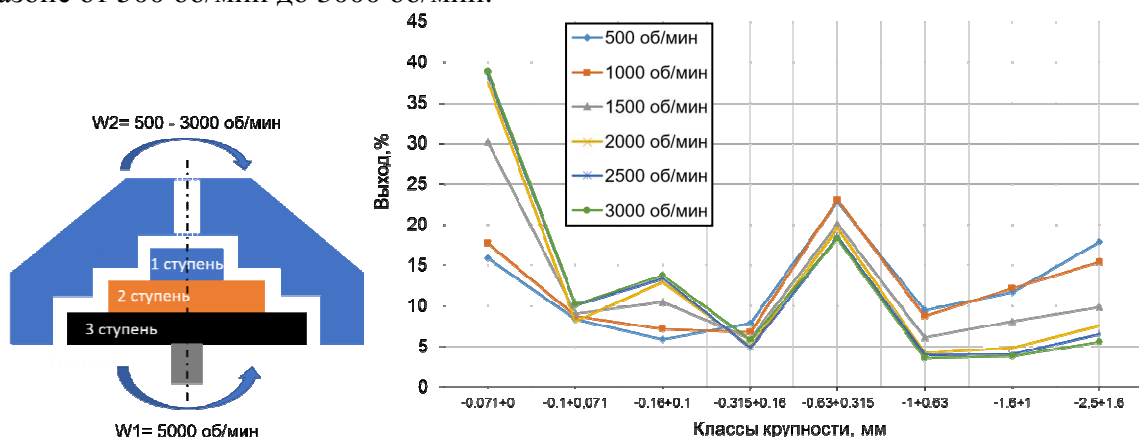


Рис. 6. Распределение измельченного материала при частоте вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего рабочего органа в диапазоне с 500 об/мин до 3000 об/мин

Из графика, представленного на рисунке 6, можно сделать вывод, что при частоте вращения верхнего отражательного рабочего органа более 2000 об/мин повышение эффективности работы ступенчатой мельницы практически не происходит. Это обусловлено

увеличением центробежной силы, достаточной для устойчивого прижима разрушаемых частиц к поверхности верхнего рабочего органа, а также отрицательным влиянием образующегося воздушного потока, который нарушает условия образования циркулирующих потоков измельчаемых частиц в рабочей зоне между вращающимися рабочими органами.

Таким образом, оптимальное соотношение частоты вращения нижнего рабочего органа к верхнему установлено экспериментально в пределах 2,5:1 при частоте вращения нижнего органа до 5000 об/мин и верхнего отражательного органа до 2000 об/мин. Это соотношение создает необходимые условия для организации интенсивных динамических воздействий на разрушаемые частицы рудного материала в рабочей зоне при формировании стабильных циркулирующих потоков.

Зависимость эффективности измельчения рудных материалов в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице от параметров рабочей камеры и скорости воздушного потока в ней при разных окружных скоростях вращения рабочих органов мельницы

С целью повышения эффективности работы ступенчатой мельницы за счет определения её рациональных параметров с учетом влияния на процесс измельчения воздушного потока были проведены экспериментальные исследования по определению зависимости эффективности измельчения от скорости воздушного потока, который имеет тенденцию увеличения с ростом числа оборотов рабочих органов (верхнего и нижнего).

При экспериментальных исследованиях в лабораторной ступенчатой мельнице использовалась черносланцевая руда крупностью -2,5+1,6 мм.

В таблице 3 представлены значения скоростей воздушного потока при разной окружной скорости вращения верхнего рабочего органа в ступенчатой мельнице с наиболее рациональной частотой вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин.

Выход контрольного класса крупности -0,071 мм с частотой вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего рабочего органа в диапазон с 500 об/мин до 3000 об/мин представлен на рисунке 7.

Табл. 3. Значения скоростей воздушного потока при разной скорости вращения верхнего рабочего органа

Частота оборотов, об/мин	Скорость воздушного потока, м/с
500	8,22 м/с
1000	8,89 м/с
1500	9,14 м/с
2000	9,49 м/с
2500	10,11 м/с
3000	11,42 м/с

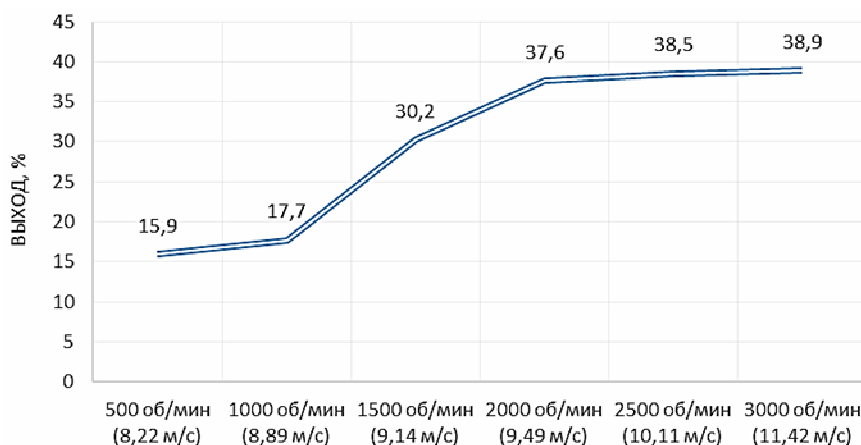


Рис. 7. Выход контрольного класса крупности -0,071 мм при разной окружной скорости верхнего рабочего органа

По полученным результатам, представленным на рисунке 7 установлено, что при увеличении числа оборотов начиная с 1500 об/мин происходит повышение измельчения, характеризующееся увеличением выхода класса крупности $-0,63+0,315$ мм. При 2000 об/мин повышения эффективности измельчения практически нет. Такой предел эффективности измельчения происходит из-за увеличения скорости воздушного потока в рабочей камере ступенчатой мельницы, который выносит из зоны измельчения неразрушенные частицы геоматериала. Таким образом, экспериментальным путем был определен предел скорости воздушного потока в рабочей камере лабораторной ступенчатой мельницы до 10 м/с, при превышении которого нарушаются условия образования циркулирования потоков измельчаемых частиц, вследствие чего эффективность измельчения снижается.

Формирование воздушного потока в рабочей камере мельницы зависит от скорости вращения и формы рабочих органов, а также от величины зазора между верхними и нижними рабочими органами. Последний фактор является наиболее важным. В целом, формирование воздушных потоков негативно сказывается на процессе измельчения, что заключается в нивелировании ударных нагрузок на частицы и выноса их из рабочей камеры измельчения.

Для исследования влияния зазоров между рабочими органами на эффективность измельчения в лабораторной центробежной ступенчатой мельнице были проведены экспериментальные исследования.

В лабораторной мельнице с возможностью регулировки высоты рабочей камеры (зазора между рабочими органами) подвергались измельчению пробы черносланцевой руды крупностью $+2,5-1,6$ мм (рис. 8).

Выход контрольного класса крупности $-0,071$ мм при разных значениях зазора, в диапазоне от 12 мм до 22 мм, представлен на рисунке 9.

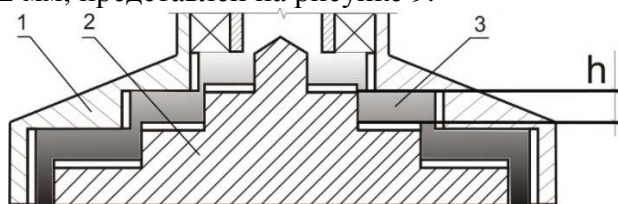


Рис.8. Общий вид лабораторной ступенчатой мельницы: 1 – верхний рабочий орган; 2 – нижний рабочий орган; 3 – рабочая камера; h – регулируемый зазор рабочей камеры

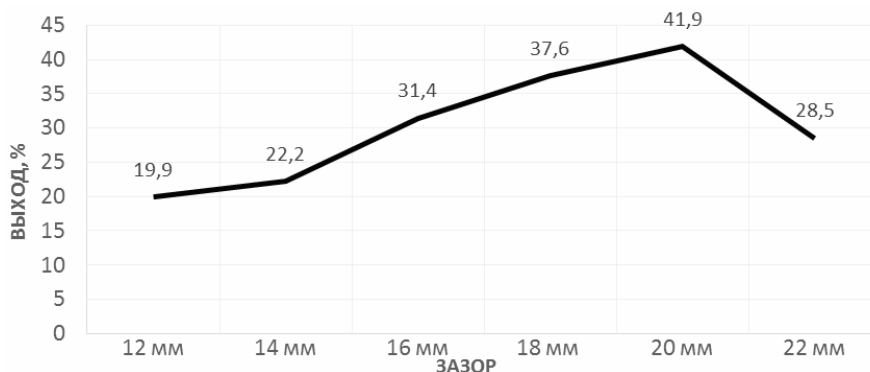


Рис. 9. Выход контрольного класса крупности $-0,071$ мм при разном зазоре рабочей камеры ступенчатой мельницы

При каждом значении зазора экспериментальным путем определялись наиболее эффективные показатели измельчаемости проб в зависимости от скорости вращения верхнего рабочего органа при постоянной частоте вращения нижнего рабочего органа 5000 об/мин (наиболее рациональное рабочее значение для измельчителя).

В таблице 4 представлены значения скоростей воздушного потока при разных зазорах рабочей камеры и при разных значениях числа оборотов вращения верхнего рабочего органа. Число оборотов вращения верхнего рабочего органа определялось тахометром АТТ-6001, скорость вращения регулировалась изменением напряжения питания электродвигателя с помощью ЛАТРа.

Табл. 4. Значения скоростей воздушного потока при разных зазорах

Зазор, мм	Скорость воздушного потока, м/с	Частота оборотов, об/мин
12	8,35	400
14	10,1	550
16	10,28	1400
18	9,49	2000
20	9,96	2550
22	10,38	2900

По результатам, приведенным на рисунке 9 видно, что наибольшее значение эффективности измельчения достигается при зазоре рабочей камеры до 20 мм, при этом, суммарные скорости формирующихся в рабочей полости воздушных потоков при всех испытанных значениях зазора близки к значению 10 м/с. При зазоре более 20 мм эффективность измельчения резко падает за счет того, что увеличивается рабочая камера измельчения (при конструктивных параметрах рабочих органов высоты и ширины ступеней), вследствие которого формирующие воздушные потоки оказывают наибольшее негативное воздействие, нивелируя динамические воздействия и вынося их из рабочей зоны измельчения недоизмельченные материалы.

Таким образом, экспериментальным путем были определены оптимальные параметры рабочей камеры (зазоры между рабочими органами) лабораторной ступенчатой мельницы. При зазоре 20 мм образуются наиболее рациональные условия для циркулирования потоков измельчаемых частиц в зоне измельчения, с учетом формирующихся воздушных потоков. При этом, не исключено, что для измельчения менее крепких и крупных рудных материалов, наиболее рациональное значение зазора между рабочими органами может меняться при тех или иных режимах работы мельницы (окружной скорости рабочих органов).

Выводы

Для эффективной эксплуатации центробежной мельницы со ступенчатыми рабочими органами важно определить ее оптимальные конструктивные и рабочие параметры, такие как количество ступеней на рабочих органах мельницы, их радиус и частота вращения. Эти параметры влияют на скорость столкновения частиц в момент удара об отражатель, которая определяет эффективность процесса измельчения.

Полученными результатами экспериментальных исследований на рудных образцах кварц-жильного типа установлено, что эффективность измельчения в центробежной ступенчатой мельнице достигается в трехступенчатом варианте мельницы, так как размер разрушаемых частиц при заданных параметрах динамического воздействия достигает такой крупности, что установка дополнительных ступеней не приводит к существенному повышению эффективности разрушения. Таким образом, для данной руды наиболее оптимальным является трехступенчатый вариант мельницы. Также было установлено оптимальное соотношение частоты вращения нижнего рабочего органа к верхнему, и оно составило 2,5:1 при частоте вращения нижнего органа 5000 об/мин и верхнего отражательного органа 2000 об/мин. Это соотношение создаёт наиболее оптимальные условия для организации интенсивных динамических воздействий на разрушаемые частицы рудного материала в рабочей зоне при формировании стабильных циркулирующих потоков внутри рабочей зоны мельницы.

Также была установлена зависимость эффективности измельчения в ступенчатой мельнице от скорости воздушного потока, образующегося в рабочей камере мельницы, который имеет тенденцию увеличения с ростом числа оборотов рабочих органов (верхнего и нижнего). Было установлено значение критической скорости воздушного потока, при превышении которого нарушаются условия образования циркулирования потоков измельчаемых частиц, вследствие чего эффективность измельчения снижается. Формирование воздушного потока в рабочей камере мельницы зависит от скорости вращения

и формы рабочих органов, а также от величины зазора между верхними и нижними рабочими органами. Последний фактор является наиболее важным, при этом, не исключено, что для измельчения менее крепких и крупных рудных частиц наиболее рациональное значение зазора между рабочими органами может меняться при тех или иных режимах работы мельницы (окружной скорости рабочих органов).

В целом, формирование воздушных потоков негативно сказывается на процессе измельчения, что заключается в нивелировании ударных нагрузок на частицы и выноса их из рабочей камеры измельчения.

Заключение

При испытании рудных образцов кварц-жильного типа исходной крупностью -2,5+1,6 мм на лабораторной модели центробежной ступенчатой мельницы многократного ударного действия установлены зависимости эффективности измельчения от ее рабочих параметров. На основе данных зависимостей определены рациональные конструктивно-режимные параметры мельницы: количество ступеней 3 шт.; частота оборотов нижнего рабочего органа 5000 об/мин и верхнего 2000 об/мин; зазор между рабочими органами 20 мм.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0022, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800089-2) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН грант №13.ЦКП.21.0016.

Список литературы

1. Хопунов Э.А. Новые аспекты избирательного разрушения минерального сырья // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 130-138.
2. Handbook of Powder Technology / Edited by Agba D. Salman, Mojtaba Ghadiri, Michael Hounslow. – Publ. house «Elsevier Science», 2007, vol. 12. – 229 p.
3. Ballantyne G.R., Powell M.S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores // Minerals Engineering. 2014, vol. 65, pp. 109-114. doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017.
4. Lomovskiy I., Bychkov A., Lomovsky O., Skripkina T. Mechanochemical and size reduction machines for biorefining // Molecules. 2020, vol. 25, no. 22, pp. 5345. doi.org/10.3390/molecules25225345.
5. Neikov O.D. Mechanical crushing and grinding. Handbook of non-ferrous metal powder. – Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 2009. – 621 p.
6. Dey S.K., Dey S., Das A. Comminution features in an impact hammer mill // Powder technology. 2013, vol. 235, pp. 914-920. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.12.003.
7. Мурог В.Ю. Помольно-классифицирующие мельницы дезинтеграторного типа // Химия и технология неорганических веществ: Труды БГТУ – Минск: БГТУ, 2008. – Вып. XVI. – С. 113-117.
8. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под. ред. О.С. Богданова. – М.: Изд-во «Недра», 1982. – 366 с.
9. Уракаев Ф.Х., Шумская Л.Г., Кириллова Е.А., Кондратьев С.А. Совершенствование технологии тонкого измельчения техногенного сырья на основе его дозированного стадийного разрушения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 5. – С. 165-175.
10. Протасов Ю.И. Теоретические основы механического разрушения горных пород. – М.: Изд-во «Недра», 1985. – 242 с.
11. Патент № 2416463 РФ. Центробежный измельчитель с кольцевыми отбойными элементами / А.И. Матвеев, В.Р. Винокуров. – Заявка № 2009122706/21 от 15.06.2009; опубл. 20.04. 2011, Бюл. №11.
12. Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Экспериментальные исследования дезинтеграции геоматериалов в измельчителе многократного динамического воздействия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 11. – С. 370-372.
13. Матвеев А.И., Винокуров В.Р. Особенности измельчения геоматериалов в центробежных аппаратах многократного динамического воздействия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 11. – С. 201-203.

References

1. Hopunov E.A. New aspects of selective destruction of mineral raw materials // News of higher educational institutions. Mining Journal. 2013, no. 6, pp. 130-138.
2. Handbook of Powder Technology / Edited by Agba D. Salman, Mojtaba Ghadiri, Michael Hounslow. – Publ. house «Elsevier Science», 2007, vol. 12. – 229 p.

3. Ballantyne G.R., Powell M.S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores // Minerals Engineering. 2014, vol. 65, pp. 109-114. doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017.
4. Lomovskiy I., Bychkov A., Lomovsky O., Skripkina T. Mechanochemical and size reduction machines for biorefining // Molecules. 2020, vol. 25, no. 22, pp. 5345. doi.org/10.3390/molecules25225345.
5. Neikov O.D. Mechanical crushing and grinding. Handbook of non-ferrous metal powder. – Elsevier: Amsterdam, the Netherlands, 2009. – 621 p.
6. Dey S.K., Dey S., Das A. Comminution features in an impact hammer mill // Powder technology. 2013, vol. 235, pp. 914-920. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.12.003.
7. Murog V.Yu. Grinding and classifying mills of disintegrator type // Chemistry and technology of inorganic substances: Proceedings of BSTU. – Minsk: BSTU, 2008. – Vol. XVI. – P. 113-117.
8. Handbook of ore dressing. Preparatory processes / Under ed. O.S. Bogdanov. – M.: Publ. house “Nedra”, 1982. – 366 p.
9. Urakaev F.K., Shumskaya L.G., Kirillova E.A., Kondrat’ev S.A. Improvement of fine milling technology for mining waste based on proportioned stage-wise disintegration // Journal of Mining Science. 2020, vol. 56, no. 5, pp. 828-837.
10. Protasov Yu.I. Theoretical foundations of mechanical destruction of rocks. – M.: Publ. house “Nedra”, 1985. – 242 p.
11. Patent №2416463 RU. Centrifugal shredder with ring fender elements / A.I. Matveev, V.R. Vinokurov. – Application No. 2009122706/21 from 15.06.2009; publ. 20.04. 2011, Bull. No. 11.
12. Matveev A.I., Vinokurov V.R. Experimental studies of the disintegration of geomaterials in a grinder of multiple dynamic impact // Mining Information and Analytical Bulletin. 2007, no. 11, pp. 370-372.
13. Matveev A.I., Vinokurov V.R. Features of crushing geomaterials in centrifugal devices of multiple dynamic impact // Mining information and analytical bulletin. 2011, no. 11, pp. 201-203.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Матвеев Андрей Иннокентьевич – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых	Matveev Andrey Innokentievich – doctor of technical sciences, senior researcher, chief researcher of the mineral processing laboratory
Винокуров Василий Романович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых	Vinokurov Vasily Romanovich – candidate of technical sciences, researcher at the mineral processing laboratory
vaviro@mail.ru	

Получена 25.06.2024