

На правах рукописи



Медведева Ксения Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И АНАЛИЗ РАБОТЫ
ОДНОВАЛКОВЫХ ДРОБИЛЬНЫХ МАШИН
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

Специальность

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (металлургического производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новокузнецк – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Никитин Александр Григорьевич

Официальные оппоненты: Лагунова Юлия Андреевна – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», профессор кафедры «Горные машины и комплексы», г. Екатеринбург

Голиков Николай Сергеевич – кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», доцент кафедры «Машиностроение», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», г. Белгород

Защита состоится 3 ноября 2020 г. в 13-00 часов в аудитории ЗП на заседании диссертационного совета Д 212.252.04 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 645007, Россия, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, СибГИУ.

Факс: 8(3843) 46-57-92,
E-mail: d212_252_04@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» <http://www.sibsiu.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета д.х.н., профессор



Горюшкин В.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Развитие металлургической промышленности страны тесно связано с ростом объемов используемого минерального сырья, являющегося исходным компонентом для различных технологических процессов, при этом должен соблюдаться соответствующий фракционный состав рудных и нерудных материалов. Для получения необходимого размера фракции сырья применяются различные агрегаты. Поскольку подавляющее большинство шихтовых материалов, используемых в металлургии, являются хрупкими, поставленная задача решается путем дробления исходных кусков большого размера.

Расход энергии на дробление минерального сырья при рудо- и углеподготовке для ведения металлургических процессов в мировом энергетическом балансе составляет более 5 %. Такой расход энергии в большей степени предопределен высокой энергоемкостью непосредственно процесса дробления, основанного на сжатии разрушаемых кусков. Существующие конструкции дробильных машин и способы дробления имеют ряд существенных недостатков: высокая энергоемкость, относительно низкая производительность процесса дробления, переизмельчение дробимого материала. Перспективным является совершенствование конструкций дробильных машин, основанное на реализации способов дробления высокой производительности, генерирующих в разрушаемых кусках сложное напряженное состояние посредством одновременно действующих нормальных и касательных напряжений. В связи с этим разработка научных, методологических основ создания новых конструкций дробильных машин и повышение эффективности существующих является важной и актуальной научно-практической задачей.

Степень разработанности темы исследования. Наибольший вклад в изучение теории и процессов дробления внесли П.В. Риттингер, В.А. Бауман, В.Л. Кирпичев, А. Кик, Ф. Бонд, П.А. Ребиндер, А. Гриффитс, С.Е. Андреев, Б.В. Клушанцев, Ю.А. Муйземнек, Л.А. Вайсберг и др.

Развитие теории дробления связано с уточнением закономерностей процесса разрушения рудных и нерудных материалов, а также с разработкой научных и методологических основ повышения производительности машин с минимальными удельными энергозатратами дробления, так как удельный расход энергии на единицу получаемой продукции является одним из основных технико-экономических показателей дробильных машин.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет».

Цель работы. Разработка конструкции и методов расчета одновалковых дробильных машин повышенной производительности, обеспечивающих создание в разрушаемом материале сложного напряженного состояния.

Задачи исследования:

1. Развить теоретические основы повышения производительности одновалковых дробильных машин при соблюдении условия формирования в разрушаемом материале сложного напряженного состояния.
2. Определить степень дробления в одновалковой дробильной машине с упором на валке и принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления.
3. Провести силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с наклонной щекой и с упором на валке для определения напряжений, возникающих в дробимом куске.
4. Спроектировать и изготовить опытно-экспериментальную установку дробильной машины повышенной производительности, позволяющую создать в дробимом материале сложное напряженное состояние, возникающее при совместном действии нормальных и

касательных напряжений, с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления.

5. Установить закономерности разрушения исходного материала и получаемого фракционного состава в процессе дробления при различной величине зазора между щекой и валком, оснащенным упором.

6. Определить влияние коэффициента трения между дробимым материалом и щекой в одновалковой дробилке с упором на валке на величину сил, действующих на дробимый кусок.

7. Провести сравнительный анализ производительности двух- и одновалковой дробилок, в том числе с упором на валке.

8. Разработать методику расчета установочной мощности привода одновалковой дробилки с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления.

Научная новизна:

1. Разработаны научные и методологические основы повышения производительности одновалковых дробильных машин посредством конструктивных решений, обеспечивающих принудительную подачу разрушаемого материала в зону дробления, и формирования в исходном куске сложного плоского напряженного состояния, при котором возникают нормальные и касательные напряжения.

2. Определена степень дробления, установлены и научно обоснованы закономерности влияния различных факторов на фракционный состав получаемого в процессе дробления материала для одновалковых дробильных машин с принудительной подачей разрушаемых кусков в зону дробления.

3. Установлено влияние коэффициента трения между дробимым материалом и щекой в одновалковой дробильной машине с упором на валке на величину сил, действующих на дробимый фрагмент.

4. Получено аналитическое выражение для расчета установочной мощности привода одновалковой дробильной машины с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработаны защищенные патентами конструкции одновалковых дробильных машин с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления, позволяющие увеличить производительность энергоэффективных одновалковых дробильных машин с гладкими валками (Патенты Российской Федерации на изобретения № 2583096 «Валковая дробилка», № 2603923 «Валковая дробилка»). Конструктивно обеспечено условие создания сложного напряженного состояния в разрушаемом теле во время работы одновалковой дробилки с принудительной подачей перерабатываемого материала в зону разрушения. Разработанная конструкция одновалковой дробильной машины с упором на валке рекомендована к промышленному внедрению в ООО «Регионстрой».

Результаты проведенного исследования используются в учебном процессе при подготовке обучающихся по направлению 15.03.02 – Технологические машины и оборудование.

Методология и методы исследования. В работе используются методы теоретического анализа с использованием классических положений евклидовой геометрии, законов механики разрушения и теории сопротивления материалов, а также экспериментальные методы.

Степень достоверности результатов обеспечена использованием апробированных методов исследования, сочетанием методов теоретического анализа, сходимостью данных физического моделирования и теоретических исследований.

На защиту выносятся:

1. Конструкция энергоэффективной одновалковой дробилки с упором на валке, в которой использование упора позволяет осуществлять принудительную подачу разрушаемого материала в зону дробления и обеспечить увеличение производительности.

2. Результаты силового анализа процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с наклонной щекой и упором на валке, подтверждающие, что в дробимом куске возникает сложное напряженное состояние при совместном действии нормальных и касательных напряжений.

3. Результаты экспериментальных исследований закономерностей разрушения исходного материала и получаемого фракционного состава в процессе дробления при различной величине зазора между щекой и валком, оснащенным упором.

4. Результаты сравнительного анализа производительности двух- и одновалковой дробилок, в том числе с упором на валке.

5. Методика расчета установочной мощности привода одновалковой дробилки с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления.

Личный вклад автора состоит в критическом анализе литературных данных, планировании и проведении теоретических и экспериментальных исследований, создании конструкций одновалковых дробильных машин повышенной производительности, анализе, обработке и обобщении полученных результатов, формулировке основных выводов и положений, выносимых на защиту.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (металлургического производства) по пунктам: 1. Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; 3. Теоретические и экспериментальные исследования параметров машин и агрегатов; 5. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XIX Международной научно – технической конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2015 г.); Международной научно – практической конференции «Наукоёмкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (г. Новокузнецк, 2017 г.); XV, XVII Международных научно – технических конференциях «Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2017, 2019 г.).

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 3 статьях в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, а также в 1 статье в журнале, входящем в базу данных Scopus. По результатам работы получено 2 патента на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов и приложений. Изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 2 таблицы, список использованных источников из 80 наименований.

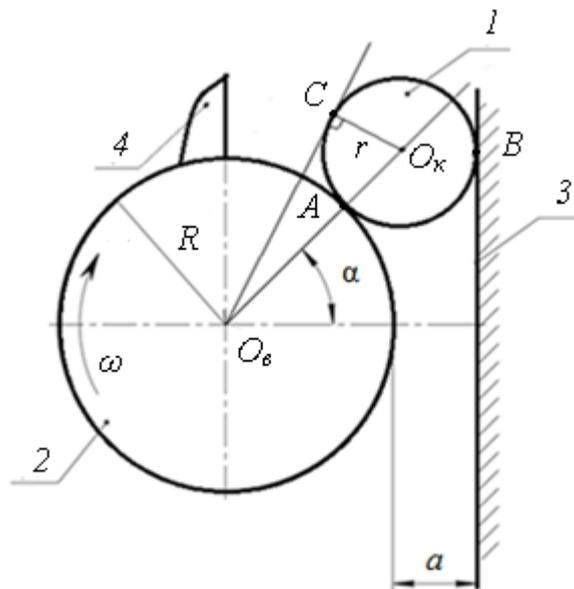
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи диссертационного исследования. Представлены научные положения, выносимые на защиту. Также описана теоретическая и практическая значимость работы, новизна полученных результатов исследования. Выбрано направление разработки конструкции и анализа работы одновалковой дробильной машины с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления, что является перспективным направлением развития современного металлургического машиностроения.

расположением неподвижной щеки при одинаковых углах захвата со стороны вала α , которое показало, что чем больше угол наклона щеки γ , тем больше степень дробления и, соответственно, выше производительность.

Более эффективным способом повышения производительности энергоэффективной валковой дробильной машины является такая ее конструкция, в которой на валке расположен упор, обеспечивающий принудительную подачу исходного куска в зону дробления (рисунок 2). Дробилка работает следующим образом: кусок дробимого материала 1 подается в зазор между приводным вращающимся валком 2 и неподвижной щекой 3, затягивается в него под действием вертикальной составляющей силы трения между валком и дробимым материалом, направленной в сторону зазора между валком 2 и неподвижной щекой 3, и дробится.

Однако при увеличении степени дробления угол захвата со стороны вала α увеличивается и это может привести к тому, что вертикальная составляющая силы трения между валком 2 и дробимым материалом 1 будет направлена в сторону, противоположную от зазора между валком 2 и неподвижной щекой 3, при этом будет происходить проскальзывание куска 1 по поверхности вала 2 без захватывания куска в зону дробления. В этом случае при дальнейшем вращении вала 2 упор 4 рабочей поверхностью соприкасается с куском 1 и начинает давить на кусок, при этом возникает сила, действующая на кусок и направленная в сторону зазора, за счет этого кусок принудительно подается в зону дробления и дробится.



1 – дробимый кусок; 2 – рабочий валок; 3 – неподвижная щека; 4 – упор
Рисунок 2 – Схема одновалковой дробильной машины с упором на валке

Для определения степени дробления в одновалковой дробильной машине с упором на валке при заданном размере зазора a между валком 2 и неподвижной щекой 3, необходимо определить максимальный размер куска, который может быть измельчен в ней:

(1)

где r – размер исходного куска, м; a – величина зазора между валком и неподвижной щекой, м.

Следовательно, степень дробления:

(2)

Угол захвата в одновалковой дробильной машине с упором на валке с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления не зависит от коэффициента трения

между валком и неподвижной щекой, а зависит только от геометрических параметров дробильной машины, что видно из формулы 2.

При расчете мощности привода машины и элементов конструкции на прочность основной исходной величиной являются силы технологического сопротивления, возникающие в процессе эксплуатации машины. С целью определения сил технологического сопротивления проведен силовой анализ рабочего процесса разрушения материала для одновалковой дробильной машины с упором на валке как с неподвижной вертикальной щекой, так и с наклонной.

В одновалковой дробильной машине с вертикальной щекой и с упором на валке в процессе захвата дробимого куса работает система валок – упор – кусок, которая движется совместно (рисунок 3), поэтому трение между валком и куском отсутствует.

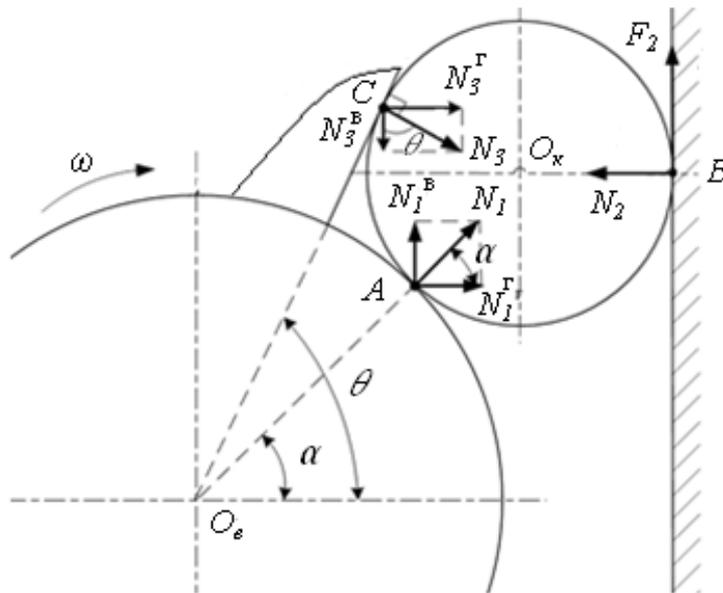


Рисунок 3 – Схема внешних сил, действующих на кусок дробимого материала в одновалковой дробильной машине с упором на валке с вертикальной щекой

Из рисунка 3 видно, что на кусок действуют силы N_1 , N_2 , N_3 , а также сила трения F_2 . Из анализа действия данных сил в вертикальной и горизонтальной плоскостях следует, что в одновалковой дробильной машине с упором на валке на кусок дробимого материала действуют как сжимающие внутренние силы, вызывающие в куске действие нормальных сжимающих напряжений, так и внутренний крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений, то есть в дробимом куске создается плоское сложное напряжённое состояние (рисунок 4), под действием которого происходит разрушение дробимого куса.

(3)

(4)

(5)

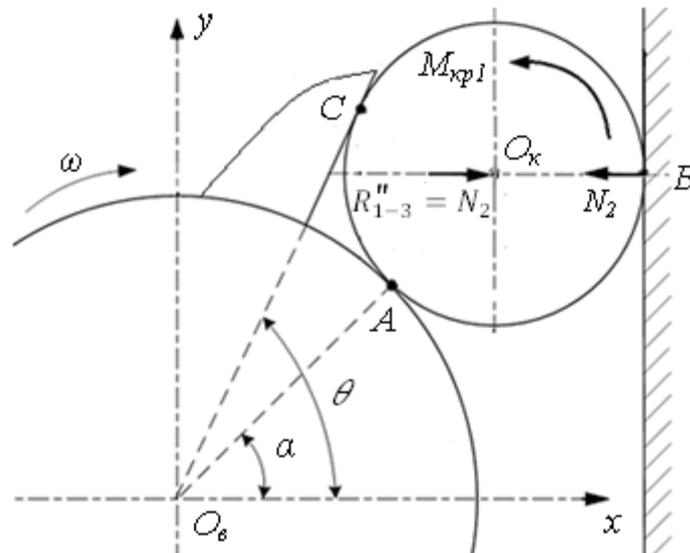


Рисунок 4 – Схема внутренних силовых факторов, действующих на кусок дробимого материала в одновалковой дробильной машине с упором на валке с вертикальной щекой

В процессе захвата дробимого куса в одновалковой дробильной машине с упором на валке с наклонной поверхностью щеки работает та же система валок – упор – кусок, что и для дробильной машины с вертикальной поверхностью щеки (рисунок 5).

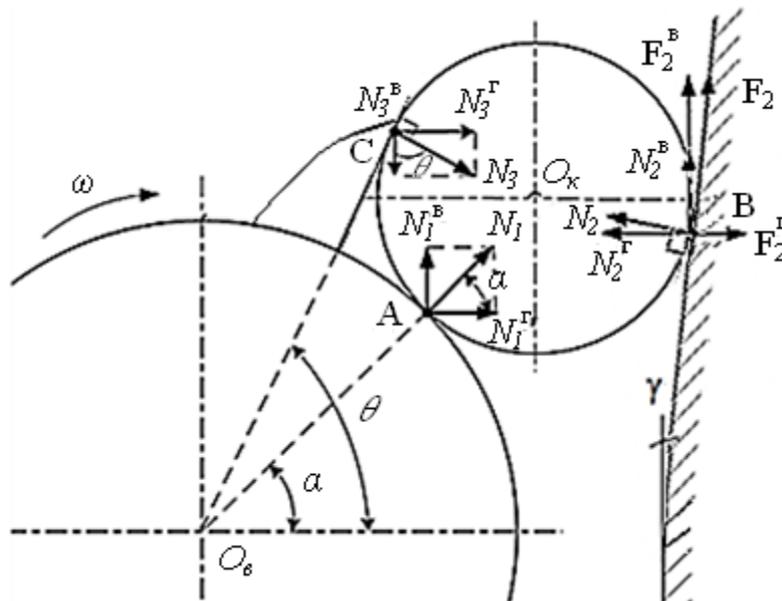


Рисунок 5 – Схема внешних сил, действующих на кусок дробимого материала в одновалковой дробильной машине с упором на валке с наклонной щекой

Анализ сил, действующих на кусок дробимого материала в процессе работы одновалковой дробильной машины с наклонной щекой и упором на валке, показал, что возникают как внутренние сжимающие силы, вызывающие в куске действие нормальных сжимающих напряжений, так и внутренний крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений (рисунок 6), аналогично силовой схеме, действующей при работе одновалковой дробилки с вертикальной щекой и упором на валке.

Таким образом, проведенный силовой анализ работы одновалковой дробильной машины с упором на валке как с вертикальной неподвижной щекой, так и с наклонной, показал, что при их работе выполняется условие создания в разрушаемом куске сложного

плоского напряженного состояния, за счет чего уменьшается расход энергии на дробление по сравнению с двухвалковыми дробильными машинами.

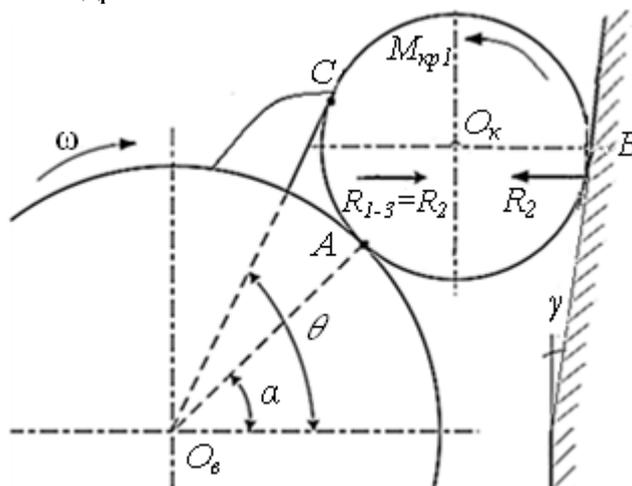


Рисунок 6 – Схема внутренних силовых факторов, действующих на кусок дробимого материала в одновалковой дробильной машине с упором на валке с наклонной щекой

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на спроектированной и изготовленной опытно-экспериментальной установке, которая представляет собой одновалковую дробильную машину с упором на валке (рисунок 7).



Рисунок 7 – Опытно-экспериментальная установка одновалковой дробильной машины с упором на валке

Дробильная машина работает следующим образом. В зависимости от требуемой крупности фракции исходного и конечного продукта дробления устанавливается зазор между валком и неподвижной щекой с помощью регулировочных болтов. Дробимый материал подается в зазор, а готовый продукт поступает в приемный контейнер, находящийся под выходной щелью (зазор между валком и неподвижной щекой). Для измерения величины силы, необходимой для дробления материала, в силовую схему одновалковой дробилки с упором на валке был встроен динамометр.

На универсальной испытательной машине УИМ-20 (пресс Амслера) с максимальной силой нагружения 20 т (200 кН) испытывали образцы сферической формы из смеси цемента (ПЦ300), песка и воды для определения их предела прочности при сжатии. При разрушении десяти образцов получены следующие значения: сила, действующая на образец при его разрушении $N = 7,7 \div 8,1$ кН, при этом среднее значение силы $N_{\phi} = 7,88$ кН, а предел прочности $= 6,4$ МПа, тогда $= 0,5 = 3,2$ МПа.

В процессе испытаний на одновалковой дробильной машине с упором на валке было разрушено по десять образцов сферической формы с величиной зазора между валком и неподвижной щекой равной 26 мм, 20 мм, 13 мм. При проведении экспериментов высота упора устанавливалась равной величине зазора между валком и неподвижной щекой. Также были сняты показания с индикатора динамометра. Значения средней величины силы, при которой произошло разрушение образца, при величине зазора 26 мм $N_{cp} = 4,8$ кН; при величине зазора 20 мм $N_{cp} = 5,2$ кН; при величине зазора 13 мм $N_{cp} = 5,7$ кН.

Из анализа результатов эксперимента следует, что с уменьшением величины зазора сила, при которой происходит разрушение первоначально заданного размера материала, увеличивается (рисунок 8).

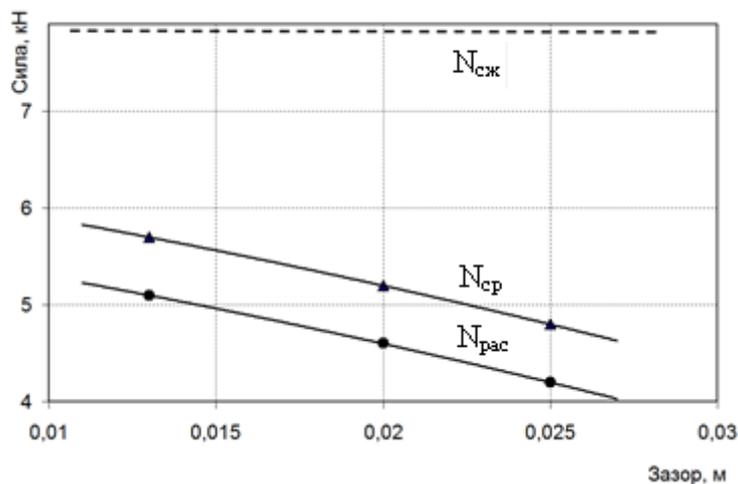


Рисунок 8 – График зависимости расчетной и средней экспериментальной величины сил, при которых произошло разрушение образцов от выбранной величины зазора

Это положение согласуется с расчетными значениями величины силы $N_{рас}$ (6), при этом расхождение экспериментальных данных с расчетными составляет меньше 14 %.

(6)

где для упрощения записи принимаем:

Результаты экспериментов показали, что требуемая величина силы N_{cp} для разрушения в одновалковой дробильной машине с упором на валке на 30 – 40 % меньше величины силы, необходимой для дробления сжатием.

При дроблении образцов сферической формы диаметром 40 мм, изготовленных из цементно-песчаной смеси (1:2), в одновалковой дробилке с упором на валке с установленным зазором между вращающимся валком и неподвижной щекой 26 мм, разрушение происходит следующим образом (рисунок 9):

- глобальное разрушение образца происходит по плоскости действия максимальных касательных напряжений и образец разрушается на два фрагмента (рисунок 9 а);
- после этого проваливается нижняя часть образца (рисунок 9 б), при этом верхняя часть находится некоторое время в заклиненном состоянии;
- затем верхняя часть образца под действием упора проскальзывает по щеке и проходит в зазор между валком и щекой (рисунок 9 в).

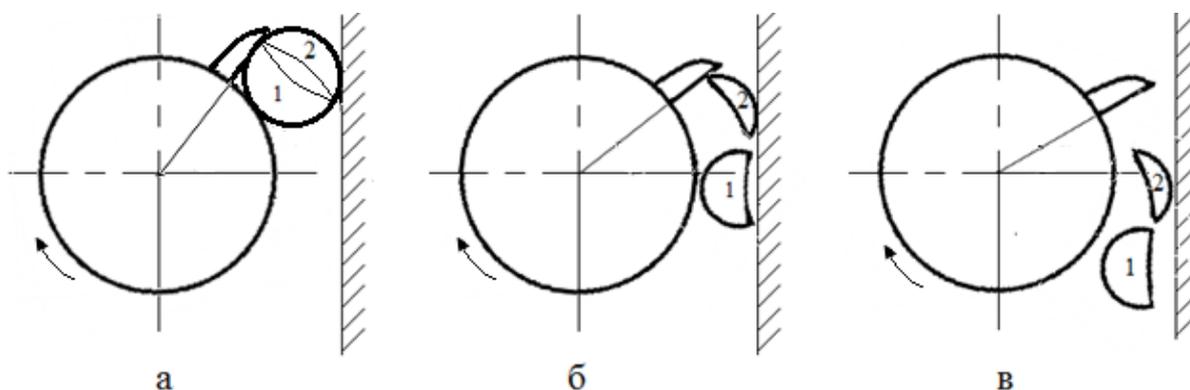


Рисунок 9 – Схема разрушения образца в одновалковой дробильной машине с упором на валке с установленным зазором между валком и щекой 26 мм

На рисунке 10 представлена фотография разрушенного образца сферической формы, подтверждающая теоретический вывод о том, что в одновалковой дробильной машине с упором на валке помимо сжимающих усилий действует и внутренний крутящий момент, который создает действие касательных напряжений. Таким образом, экспериментально подтверждено, что в одновалковой дробилке с упором на валке в процессе дробления возникает сложное напряженное состояние и разрушение образца происходит по плоскости действия максимальных касательных напряжений.



Рисунок 10 – Образец сферической формы после разрушения в одновалковой дробильной машине с упором на валке с установленным зазором между валком и щекой 26 мм

Проведенный ситовый анализ размеров фрагментов готового продукта изотропного материала, полученного на одновалковой дробильной машине с упором на валке (рисунок 11), результаты которого представлены на рисунке 12, показал, что чем больше величина зазора между валком и неподвижной щекой, тем крупнее размер фракции готового продукта и меньше переизмельчение.



Рисунок 11 – Результаты разрушения образцов в одновалковой дробилке с упором на валке с зазором между валком и щекой 20 мм, 13 мм и 10 мм соответственно

При дроблении образцов сферической формы диаметром 40 мм в одновалковой дробилке с упором на валке с установленным зазором между вращающимся валком и неподвижной щекой 10 мм при их разрушении нарушается аддитивность процесса, из-за чего происходит значительное переизмельчение фрагмента. Таким образом установлено, что при

степени дробления в одновалковой дробильной машине с упором на валке, равной 4 и более, для производства готовой продукции заданного размера понадобится несколько стадий.

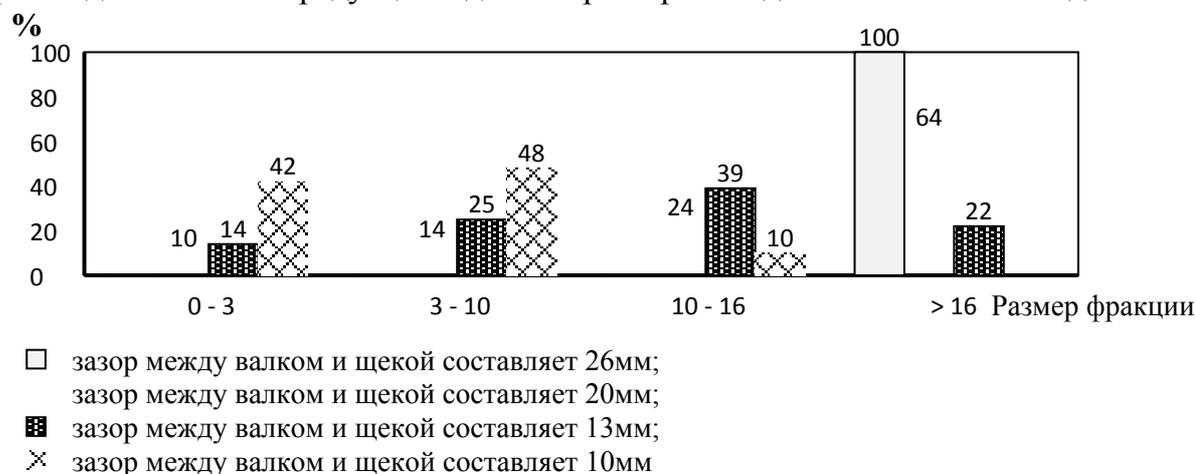


Рисунок 12 – Результаты анализа процентного содержания кусков по массе для изотропного материала

Следует отметить, что все эксперименты проводились на дробильной машине с диаметром вала, равным 180 мм, а диаметр образцов – 40 мм. Для разрушения кусков такого размера в двухвалковой дробильной машине со степенью дробления 3 диаметр валков должен быть равен 650 мм. Таким образом, одновалковая дробильная машина с упором на валке не только энергоэффективна по сравнению с двухвалковой дробильной машиной, но и имеет значительно меньшие габариты.

Все сказанное выше относилось к разрушению изотропных материалов. Однако дроблению подлежат также и анизотропные материалы. Один из подобных материалов является исходным для последующего дробления: куски ферросплава ФС75, зерна которого имеют пластинчатую форму и располагаются в параллельных плоскостях.

На рисунке 13 приведены результаты экспериментов по разрушению кусков ферросплава на одновалковой дробильной машине с упором на валке, на которых видно влияние различной величины зазора между валком и щекой на фракционный состав готового продукта.



Рисунок 13 – Результаты разрушения образцов ферросплава в одновалковой дробилке с упором на валке с зазором между валком и щекой 26 мм, 20 мм и 13 мм соответственно

Проведен ситовый анализ размеров фрагментов готового продукта анизотропного материала, полученного на одновалковой дробилке с упором на валке, результат которого представлен на рисунке 14. Он показал, что чем больше величина зазора между валком и неподвижной щекой, тем крупнее размер фракции готового продукта и меньше переизмельчение, аналогично результатам дробления изотропного материала.

Однако следует отметить следующие особенности дробления анизотропного материала: во-первых, при разрушении данного материала в дробильной машине с установленным

зазором 26 мм первичное глобальное разрушение происходит не по плоскости наименьшего сопротивления, а по плоскости действия максимальных касательных напряжений. Во-вторых, из сравнения полученных кусков готового продукта следует, что переизмельчение анизотропного материала больше, чем изотропного материала.

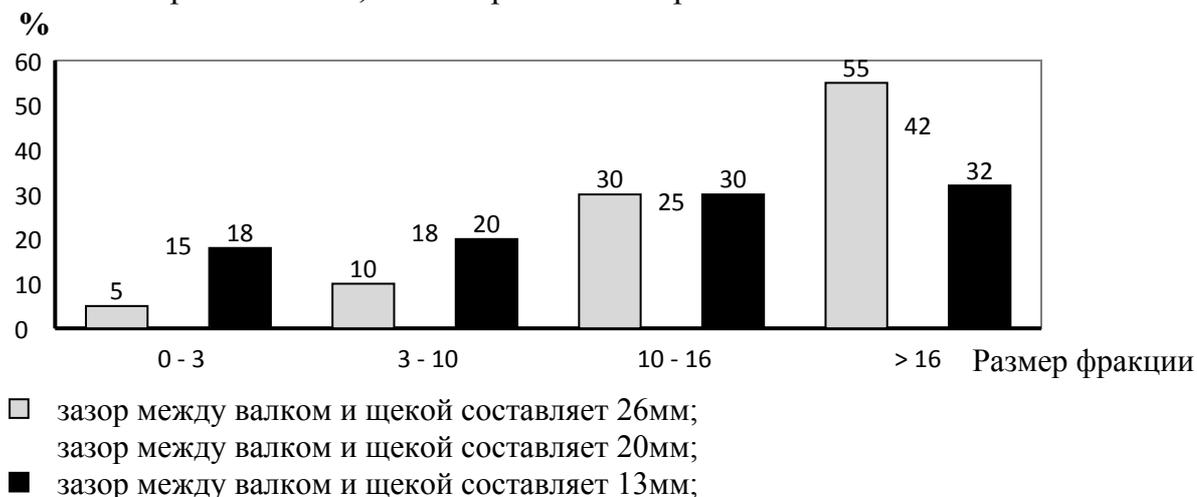


Рисунок 14 – Результаты анализа процентного содержания кусков по массе для анизотропного материала

Выше сказанное обусловлено тем, что в процессе прохождения раздробленных первично фрагментов через зону дробления, они по мере уменьшения зазора разрушаются по плоскостям наименьшего сопротивления.

В четвертой главе приведен анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине, который зависит от многих параметров. Так как этот процесс мало изучен, возникает необходимость разработки методов расчета параметров дробилок, непосредственно влияющих на их производительность и энергоэффективность.

При тонком дроблении, когда фракция готового продукта составляет менее 2 мм, целесообразно использовать энергоэффективные одновалковые дробилки, у которых для повышения производительности неподвижная щека выполнена наклонной, анализ работы которых показал, что увеличение коэффициента трения между валком и дробимым куском и уменьшение коэффициента трения между неподвижной щекой и дробимым куском приводит к возможности увеличения угла наклона неподвижной щеки, при этом увеличивается степень дробления и, соответственно, производительность одновалковой дробилки с наклонной щекой.

Разработан метод расчета количества упоров на валке (рисунок 15), обеспечивающий гарантированный захват исходного куска в зону разрушения одновалковой дробильной машины с упором на валке. На валке следует располагать максимально возможное количество упоров, так как её производительность определяется количеством разрушенных исходных кусков дробимого материала за один оборот валка. Количество упоров на валке ограничено двумя факторами: во-первых, размером исходного куска, во-вторых, скоростью вращения валка. Расстояние между упорами должно быть больше размера дробимого куска, чтобы кусок касался образующей поверхности валка в процессе поворота валка. Расчет количества упоров ведется по этому расстоянию:

(7)

где диаметр валка, м; расстояние, необходимое для того, чтобы кусок из питателя достиг образующей поверхности валка до встречи с рабочей поверхностью последующего упора, м; ширина упора, м.

Проведен сравнительный анализ производительности двухвалковых, одновалковых и одновалковых с упором на валке дробильных машин. В двухвалковой дробильной машине

расчет производительности основан на условии, при котором за один оборот валка из зоны дробления выходит готовый материал в объеме, равном площади, образованной зазором между валком и рабочей частью длины валка, умноженном на длину окружности валка.

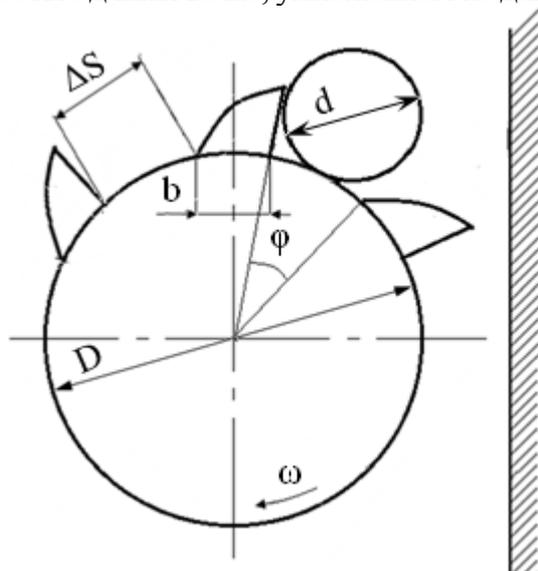


Рисунок 15 – Схема расчета количества упоров на валке

При заданной величине зазора между валками, который определяется размером фракции готового продукта, увеличение размера дробимого исходного куска, а, значит и степени дробления, при прочих равных условиях ведет к увеличению производительности дробильной машины (8), при этом для твердых материалов, таких, например, как ферросплавы, степень дробления задается в пределах 3 – 5.

Производительность двухвалковой дробильной машины:

(8)

Расчет производительности одновалковой дробильной машины основан на том же условии, что и для двухвалковой дробилки.

Производительность одновалковой дробильной машины рассчитывается по выражению:

(9)

Из анализа уравнения (9) следует, что производительность одновалковой дробильной машины должна быть в два раза больше производительности двухвалковой дробильной машины, но так как степень дробления в одновалковой дробильной машине примерно в три раза меньше, чем в двухвалковой, то, следовательно, производительность одновалковой дробильной машины составляет около 68 % от производительности двухвалковой дробильной машины.

Производительность одновалковой дробильной машины с упором на валке определяется из выражения, аналогичного (9), однако, учитывая, что в ней количество разрушаемых исходных кусков за один оборот валка соответствует числу упоров, расположенных на валке, в выражение расчета производительности следует ввести поправочный коэффициент K , учитывающий количество исходных кусков, разрушаемых за один оборот валка:

(10)

Таким образом, формула расчета производительности одновалковых дробильных машинах с упором на валке имеет следующий вид:

(11)

Сравнение производительности одновалковых дробильных машин с упором на валке и двухвалковых дробилок производится с учетом следующих характеристик:

1) степень дробления в обеих дробильных машинах одинаковая и равна 3, то есть размеры исходного разрушаемого куска и величина зазора одинаковые;

2) длина валка и число оборотов одинаковые;

3) коэффициент разрыхления для двухвалковой дробильной машины принимается равным 0,4, а для одновалковой дробильной машины с упором на валке – равным 1, так как разрыхление материала в ней происходит в процессе забора материала из питателя и учитывается при расчете количества упоров;

4) поправочный коэффициент рассчитывается для каждого конкретного случая. Например, для дробильной машины, имеющей следующие характеристики: $D = 1000$ мм; $d = 100$ мм; $b = 30$ мм и $n = 60$ об/мин, что соответствует линейной скорости 3,14 м/с, поправочный коэффициент равен 0,2.

Сравнение полученных результатов при анализе уравнений производительности двухвалковых, одновалковых и одновалковых с упором на валке дробильных машин показывает, что производительность двухвалковых и одновалковых с упором на валке дробилок больше примерно на 30 %, чем у одновалковой дробильной машины.

Определено, что при постоянстве силы, приложенной со стороны упора к дробимому куску, с уменьшением коэффициента трения между щекой и дробимым материалом происходит увеличение сил, действующих на дробимый кусок со стороны валка и щеки. Этим достигается уменьшение расхода энергии на дробление при прочих равных условиях, что уменьшает энергоемкость работы одновалковой дробилки с принудительной подачей материала в зону дробления.

Проведены теоретические исследования зависимости силы разрушения дробимого материала от различных технологических параметров (рисунок 16).

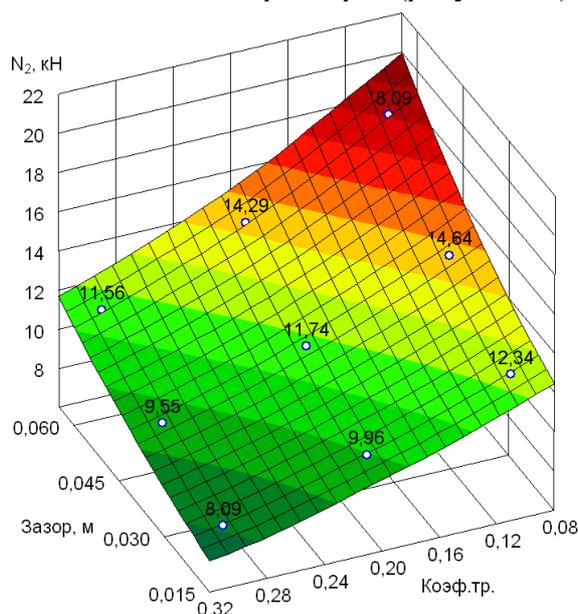


Рисунок 16 – Зависимость величины силы разрушения дробимого материала N_2 от величины зазора между валком и щекой и коэффициента трения дробимого материала о щеку

На рисунке 16 показаны результаты многовариантных расчетов, выполненных для дробильной машины с упором на валке, имеющей конструктивные параметры: диаметр валка – 1 м, длина валка – 0,5 м, скорость вращения 3,14 м/с, число упоров 6, размеры кусков 0,1 м, демонстрирующие зависимость силы, необходимой для разрушения, от величины зазора дробильной машины и коэффициента трения между щекой и дробимым материалом.

Анализ полученных результатов показывает, что снижение коэффициента трения от 0,3 до 0,1 приводит к росту силы в 1,5 – 1,6 раза. Увеличение зазора в три раза приводит к росту силы в 1,4 раза.

Необходимая установленная мощность $W_{прив}$ привода одновалковой дробильной машины с упором на валке складывается из затрат мощности, определяемых суммой потерь мощности на дробление материала, на преодоление силы трения между куском и щекой, а также затрат мощности на трение в опорных подшипниках валка, то есть на преодоление всех сопротивлений при работе машины:

(12)

где W_1 , W_2 и W_3 – мощности, расходуемые на дробление материала, на преодоление силы трения между куском и щекой и преодоление силы трения в подшипниках соответственно; η – КПД передачи.

Таким образом, подставив в уравнение (12) развернутые формулы мощностей, получаем установочную мощность привода:

(13)

где n – число оборотов валка; L_k – коэффициент, учитывающий, сколько дробимых кусков приходится на длину валка; f_2 – коэффициент трения между неподвижной щекой и куском; R – радиус валка, м; a – величина зазора между неподвижной щекой и валком, м; f_3 – коэффициент трения в подшипнике; d_g – диаметр цапфы валка, м.

Из совместного анализа уравнений величины силы при действии максимальных касательных напряжений и формулы установленной мощности привода одновалковой дробильной машины с упором на валке следует, что мощность привода зависит от следующих параметров:

- прочностных свойств и размеров дробимого материала;
- диаметра и длины валка;
- коэффициентов трения между дробимым куском и щекой, а также трения в подшипнике;
- диаметра цапфы валка.

Полученная формула позволяет рассчитывать мощность привода одновалковой дробильной машины с упором на валке на стадии проектирования.

Проведена опытно-промышленная апробация в условиях предприятия металлургической отрасли Кузбасса – ООО «Регионстрой» конструкции одновалковой дробильной машины с упором на валке, использование которого позволяет осуществлять принудительную подачу разрушаемого материала в зону дробления. Разработанная конструкция одновалковой дробильной машины с упором на валке рекомендуется к промышленному внедрению для дробления ферросплавов, металлургических шлаков, кокса.

Результаты диссертационной работы внедрены в Сибирском государственном индустриальном университете и используются в учебном процессе для выполнения курсовых проектов, выпускных квалификационных работ студентами направления 15.03.02 – Технологические машины и оборудование.

В приложении приведены справки использования результатов работы в промышленности и в учебном процессе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны запатентованные новые конструкции одновалковых дробильных машин повышенной производительности, обеспечивающие принудительную подачу разрушаемого материала в зону дробления посредством упоров, расположенных на валке и разрушающие перерабатываемый материал за счет создания в исходном куске сложного напряженного состояния.

2. Определено условие захвата исходного дробимого куска в одновалковой дробильной машине с наклонной неподвижной щекой, установлено что, чем больше коэффициент трения между куском и валком и чем меньше коэффициент трения между куском и неподвижной щекой, тем больше допустимый угол захвата. Определена степень дробления в одновалковой дробильной машине новой конструкции, оборудованной вертикальной неподвижной щекой и упором, установленным на валке, обеспечивающим принудительную подачу разрушаемого материала в зону дробления.

3. Проведенный силовой анализ работы одновалковой дробильной машины с упором на валке, с вертикальной и с наклонной неподвижными щеками, показал, что при их работе выполняется условие создания в разрушаемом куске сложного плоского напряженного состояния, при котором в куске возникают как нормальные, так и касательные напряжения, обеспечивающие уменьшение расхода энергии на дробление по сравнению с двухвалковыми дробилками.

4. На основе результатов исследований на опытно-экспериментальной установке дробильной машины установлено, что на дробимый материал помимо нормальных сжимающих напряжений действуют касательные напряжения, формирующие сложное напряженное состояние, о чем свидетельствует характер разрушения образцов и меньшая на 30 – 40 % (в зависимости от величины зазора между валком и неподвижной щекой) требуемая сила для разрушения в одновалковой дробилке с упором на валке по сравнению с силой дробления сжатием.

5. Установлены закономерности влияния величины зазора между щекой и валком, оснащенным упором, на фракционный состав материала, получаемого в процессе дробления. Экспериментально определено, что при степени дробления 4 и более нарушается аддитивность процесса, при этом увеличивается доля переизмельченной фракции.

6. Выявлено влияние коэффициента трения между дробимым материалом и щекой в одновалковой дробильной машине с упором на валке на величину сил, действующих на дробимый кусок. Установлено, что снижение коэффициента трения приводит к увеличению сил, действующих на разрушаемый кусок со стороны валка и неподвижной щеки.

7. Установлено, что производительность одновалковой дробильной машины с упором на валке соизмерима с производительностью двухвалковой дробильной машины (при меньших размерах и металлоемкости первой) и больше производительности энергоэффективной одновалковой дробильной машины примерно на 30 %.

8. Разработана методика расчета установочной мощности привода одновалковой дробилки с принудительной подачей разрушаемого материала в зону дробления, позволяющая рассчитывать мощность привода на стадии проектирования.

9. Результаты теоретических и экспериментальных исследований и конструктивные решения, обеспечивающие повышение производительности одновалковых дробильных машин, внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и приняты к внедрению на промышленном предприятии металлургической отрасли Кузбасса – ООО «Регионстрой».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях, входящих в Web of Science или Scopus:

1. Nikitin, A. G. Diagnosis of the rock crushing model to increase the efficiency of one-roll crusher operation. / A. G. Nikitin, S. A. Laktionov, K. S. Medvedeva // IOP Conference Series: Earth and Environment Science. – 2017. – Vol. 84. – [012033, 5 p.].

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

Министерства образования и науки РФ:

2. Никитин, А. Г. Определение мощности привода одновалковой дробилки / А. Г. Никитин, С. А. Лактионов, К. С. Медведева // Вестник машиностроения. – 2016. – № 1. – С. 85–86.

3. Влияние коэффициента трения между дробимым материалом и щекой в одновалковой дробилке на энергоемкость процесса дробления / А. Г. Никитин, Ю. А. Епифанцев, К. С. Медведева, П. Б. Герике // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 10. – С. 846–848.

4. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке / А. Г. Никитин, Ю. А. Епифанцев, К. С. Медведева, П. Б. Герике // Известия вузов. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 303–307.

Патенты на изобретение:

5. Патент № 2583096 Российская Федерация, МПК В02С4/12. Валковая дробилка : № 2014152781/13 : заявл. 24.12.2014 : опубл. 10.05.2016 / Никитин А. Г., Люленков В. И., Баженов И. А., Медведева К. С.; патентообладатель Сибирский государственный индустриальный университет. – Бюл. № 13.

6. Патент № 2603923 Российская Федерация, МПК В02С4/12. Валковая дробилка : № 2015145054/13 : заявл. 20.10.2015 : опубл. 10.12.2016 / Никитин А. Г., Лактионов С. А., Баженов И. А., Медведева К. С.; патентообладатель Сибирский государственный индустриальный университет. – Бюл. № 34.

Научные статьи, опубликованные в периодических изданиях и труды научно-практических конференций:

7. Никитин, А. Г. Определение степени дробления материала в одновалковой дробилке с упором на валке / А. Г. Никитин, К. С. Медведева, В. А. Титов // Металлургия: технологии, инновации, качество : труды XIX Международной научно-практической конференции, 15–16 декабря 2015 г. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2015. – Ч. 1. – С. 371–372.

8. Никитин, А. Г. Энергосберегающая технология дробления хрупкого материала в одновалковой дробилке / А. Г. Никитин, К. С. Медведева // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XV международной научно-технической конференции. – Екатеринбург. – 2017. – С. 201 – 204.

9. Никитин, А. Г. Диагностирование режимов дробления горных пород для повышения эффективности работы одновалковой дробилки / А. Г. Никитин, С. А. Лактионов, К. С. Медведева // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – № 3. – С. 311–313.

10. Никитин, А. Г. Экспериментальное определение фракционного состава материала, разрушаемого в одновалковой дробилке с упором на валке / А. Г. Никитин, К. С. Медведева // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XV международной научно-технической конференции, 4–5 апреля 2019 г. – Екатеринбург, 2019. – С. 201–204.

Подписано в печать

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,22. Уч. изд. л. 1,37. Тираж 100 экз. Заказ № 127

Сибирский государственный индустриальный университет.

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42