

## Моделирование и повышение эффективности работы дробильного оборудования

Н.В. ВАСИЛЬЕВА ✉, У.Ю. ГОЛЫШЕВСКАЯ и А.Е. СНЯТКОВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ [vasileva\\_nv@pers.spmi.ru](mailto:vasileva_nv@pers.spmi.ru)

**Ссылка для цитирования оригинальной статьи:** Vasilyeva, N.; Golyshevskaja, U.; Sniatkova, A. Modeling and Improving the Efficiency of Crushing Equipment. *Symmetry* 2023, 15, 1343. <https://doi.org/10.3390/sym15071343>

**Аннотация:** В последние десятилетия сохраняется потребность в энергоэффективных методах переработки минерального сырья. В будущем необходимость разработки энергоэффективных технологий для минеральной промышленности будет возрастать, учитывая истощение высококачественных ресурсов и жесткие экологические ограничения. Объектом данного исследования является дробильное оборудование. Оно представляет собой комплекс агрегатов, предназначенных для уменьшения фракции рудных и нерудных твердых материалов. Кроме того, оно предназначено для придания им симметричной формы с целью облегчения их транспортировки и последующего использования в производстве. Таким образом, актуальность использования дробилок на горно-обогатительных комбинатах очевидна, поэтому актуальным является и поиск путей оптимизации их работы и снижения энергопотребления. В данной статье представлен систематический обзор задачи повышения энергоэффективности дробильных агрегатов. Это достигается за счет изучения методов и результатов моделирования, автоматизации процессов дробления и измельчения, а также снижения износа деталей дробилок. На основе рассмотренных источников определены основные методы повышения эффективности дробильных агрегатов. Разработана математическая модель конусной дробилки. Погрешность моделирования составляет менее 6 %. На математической модели проведен имитационный эксперимент. Определены зависимости тока и мощности электропривода дробилки от производительности питателя, графики имеют симметричное положение относительно аппроксимирующей кривой ( $R^2 \approx 0,9$ ).

**Ключевые слова:** дробилка; энергоэффективность; моделирование.

## Modeling and Improving the Efficiency of Crushing Equipment

Natalia V. VASILYEVA ✉, Uliana Yu. GOLYSHEVSKAIA and Aleksandra E. SNIATKOVA

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ [vasileva\\_nv@pers.spmi.ru](mailto:vasileva_nv@pers.spmi.ru)

**Abstract:** Over the last few decades, the demand for energy-efficient mineral-processing methods has continued. The necessity to develop energy-efficient technologies for the mineral industry will increase in the future, considering the exhaustion of high-quality resources and severe environmental limitations. The subject of this study is crushing equipment. It is a complex of units designed to reduce the fraction of ore and non-metallic solid materials. It is also designed to make them more symmetrical in order to facilitate their transport and later use in production. Thus, the urgency of using crushers in mining and processing plants is clear, so it is relevant to find ways to optimize their operation and reduce energy consumption. This article presents a systematic review of the task of improving the energy efficiency of crushing units. This is achieved by studying modelling methods and results, the automation of crushing and grinding processes, and the wear reduction of crusher components. On the grounds of the reviewed sources, the main methods of increasing the efficiency of crushing units are identified. A mathematical model of the cone crusher was designed. The simulation error is less than 6 %. A simulation experiment was carried out on the mathematical model. The dependences of the current and power of the crusher electric drive on the feeder capacity are determined; the graphs have a symmetrical position relative to the approximating curve ( $R^2 \approx 0.9$ ).

**Keywords:** crusher; energy efficiency; modeling.

---

\* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

## 1. Введение

Мировая практика показывает, что в основе экономического развития лежит концепция эффективного функционирования. Важнейшим аспектом такого функционирования является рациональное использование энергетических ресурсов [1]. Нерациональное использование энергии приводит к экономическим потерям и исчерпанию энергетических ресурсов.

Минерально-сырьевой комплекс играет ведущую роль в экономике России, являясь фактором ее устойчивого развития. Неудивительно, что добывающие и перерабатывающие предприятия являются крупнейшими потребителями электроэнергии [2]. Ежегодно в стране измельчается более 3 млрд. т сырья. При этом потребляется более 70 млрд. кВтч электроэнергии, что составляет до 5 % от общего объема производства в стране. Для одного рудника доля энергопотребления на дробление может достигать 50 % от годового объема производства. В условиях тенденции роста цен на энергоносители за последние несколько лет большинство горнодобывающих компаний ориентируются на снижение энергопотребления с целью уменьшения себестоимости конечного продукта [3].

Процесс дробления широко используется в металлургической, строительной и горнодобывающей промышленности. Основным методом первичной подготовки сырья является дробление добытой руды. Дробление является первой и наиболее важной стадией подготовки сырья к дальнейшей переработке. От качества дробления зависит качество последующих стадий переработки (дробление, флотация, сгущение, сушка и т.д.). Основная цель этой стадии – разделение (раскрытие) содержащихся в минерале зерен различных минералов, которые в процессе образования тесно переплелись и срослись между собой. Поэтому чем полнее раскрываются минералы в процессе дробления, тем лучше и успешнее проходит последующее обогащение полезного ископаемого. Стадию дробления невозможно обойти стороной, поэтому повышение эффективности дробления является актуальной задачей промышленности. Существенным недостатком дробильных установок является их низкая энергоэффективность.

Характерной особенностью дробилок является их непрерывное функционирование. Необходимо поддерживать требуемую степень измельчения материала при постоянном контроле объема подаваемого материала.

Целью данной работы является разработка математической модели процесса дробления и установление зависимостей между основными технологическими параметрами машины.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Исследовать вопросы моделирования и автоматизации дробильного оборудования.
- Разработать математическую модель конусной дробилки.
- Выявить влияние производительности установки на ток и мощность привода дробилки.
- Выяснить условия проведения процесса дробления для обеспечения энергоэффективности.

Научная новизна заключается в нахождении зависимости тока и мощности дробилки от производительности питателя. Это послужит основой для исследования режимов работы и формирования требований к системе автоматического управления. В результате исследования установлено, что зависимость между током двигателя дробилки и ее производительностью имеет линейный характер. Определены параметры этой зависимости, оценена адекватность модели. Полученная математическая модель может быть использована для выбора оптимальных значений управляющих параметров с целью повышения эффективности дробления, а также для разработки автоматизированных систем управления процессом дробления.

## 2. Обзор

В целом существует три основных пути повышения энергоэффективности дробильного оборудования: моделирование, автоматизация и снижение износа.

### 2.1. Моделирование процесса дробления

Значительная экономия энергии может быть достигнута за счет совершенствования технологических процессов во всех отраслях промышленности, в том числе и в горнодобывающей. Совершенствование технологических процессов и, в частности, процессов дробления тесно связано с моделированием. Моделирование позволяет изучить закономерности процесса дробления для совершенствования методов расчета дробилок и проверки эффективности и адекватности разработанных автоматизированных систем управления [4].

Исследование процесса дробления с помощью математических моделей является перспективным направлением, так как использование дробильных установок на предприятиях остается актуальным. Соответственно, актуальными остаются и способы оптимизации их работы, а также снижения энергопотребления.

Наиболее распространенным методом моделирования сыпучих материалов является метод дискретных элементов (МДЭ). При исследовании путей повышения энергоэффективности ряд авторов обращаются к моделированию МДЭ, так как он является мощным инструментом для расчета общей эффективности и распределения продукта в камере дробления. МДЭ позволяет получить более точное представление о различных параметрах процесса дробления, например, о том, как влияют на процесс дробления частицы различной плотности и формы [5].

Моделирование дробилок вряд ли возможно без определения основных параметров дробилок, что является необходимой основой для любой модели [6].

В книге «Проектирование и производство работ по обогащению полезных ископаемых» описаны стратегии математического моделирования отдельных процессов, которые впоследствии объединяются в комплексное предприятие по переработке минерального сырья. Эта работа имеет большое значение для проектирования систем управления технологическими процессами на обогатительных фабриках [7].

Каждая дробилка представляет собой сложный агрегат с большим числом параметров. Например, конусная дробилка представляется системой с шестью степенями свободы с двумя плоскостями симметрии. Предложены основные зависимости и формулы для математического описания конусной дробилки [8].

Моделирование щековой дробилки с помощью математических выражений также изучалось рядом исследователей. Например, в работе [9] моделирование рассматривается в контексте энергопотребления, а в работе [10] – в контексте кинематики процесса. В работе [11] предложена фундаментальная модель, которая служит универсальным инструментом для моделирования щековых дробилок. Соотношения, определенные в этой работе, пригодны для моделирования кинематики процесса, расхода, разрушения, производительности, мощности и давления.

Математические соотношения, описывающие поведение валковых дробилок, рассмотрены в работах [12, 13]. Наиболее полное исследование моделирования молотковой дробилки представлено в работах [14, 15]. По результатам моделирования можно оценить производительность, выходной размер, мощность и износ дробилки. В другой работе [16] проанализирован потенциал повышения энергоэффективности дробильного оборудования. Показано, что МДЭ-моделирование способствует разработке и внедрению новых технологий, снижающих энергопотребление дробилок. Авторы работы [17] предложили модели для пяти типов дробилок – щековых, конусных, гирационных, ударных и валковых. Авторы утверждают, что полученные ими модели полезны для прогнозирования таких ключевых показателей, как энергопотребление, размер продукта, производительность, износ оборудования. Кроме того, МДЭ моделирует влияние изменения условий загрузки и позволяет подобрать оптимальную скорость подачи материала в камеру дробления для повышения производительности и энергоэффективности [18]. В работе [13] на основе МДЭ была создана виртуальная машина измельчения (ВМ), которая способна связать каждый тип столкновения частиц и их энергию с вероятностью разрушения каждой конкретной частицы. Подобные исследования показывают, что МДЭ способна решать самые разнообразные задачи. В работе [19] представлена модель, учитывающая, что частицы материала имеют различную прочность. Этот аспект дает больше возможностей для применения модели дробилки в различных условиях. Существенным недостатком метода МДЭ является то, что он требует обширных знаний о свойствах материалов, а также мощного вычислительного оборудования, что может представлять определенные трудности для исследователей [20, 21].

В работе [22] рассмотрены следующие способы повышения качества и адекватности моделей:

1. Исследование связи характеристик материала с лабораторно измеренными свойствами частиц с учетом текстуры породы, изменчивости и размера частиц.
2. Учет геометрических особенностей условий нагружения в критериях возникновения разрушения и определения распределения размеров и формы потоков.
3. Постоянное уменьшение используемых допусков на размер частиц с тем, чтобы все крупные фракции продукта могли быть явно включены в модель.

4. Селективное разрушение и выброс должны быть включены в расчетную схему.
5. Включение воздушного потока, который для некоторых дробилок является необязательным.

Концепция «нечеткого моделирования» также применяется для моделирования дробильных установок. Такое моделирование опирается на нечеткую логику для связи между управляющими параметрами и выходным результатом. Нечеткая логика – это интеллектуальная система, для которой не характерны строгие стандарты. Нечеткая логика, по мнению авторов работы [23], идеально подходит для прогнозирования изменения размера частиц с учетом факторов, обусловленных нелинейными условиями при дроблении и сортировке. Новый подход к моделированию процесса дробления был предложен в работе [24]. Исследовалась способность адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS) моделировать скорость эксцентрика, положение замкнутых сторон и размер частиц на выходе из дробилки. Результаты исследования показали, что разработанная модель ANFIS способна имитировать работу конусной дробилки. Модель ANFIS также применима для моделирования и прогнозирования интенсивности износа [25].

## 2.2. Автоматизация процессов дробления

Многодисциплинарная оптимизация (МДО) в проектировании используется для решения задач проектирования, затрагивающих несколько дисциплин. Преимущество использования МДО заключается в том, что оптимальное общее решение, по сравнению с оптимальным решением, найденным путем последовательной оптимизации каждого решения, учитывает также взаимодействие между ними. Исследовано применение междисциплинарной оптимизации проектирования при моделировании процессов переработки минерального сырья, а именно процессов дробления и измельчения, и доказана ее эффективность [26].

Автоматизация любого технологического процесса, и в частности процесса дробления, предполагает создание системы, управляющей процессом без непосредственного участия человека или оставляющей за ним принятие наиболее важных решений. Таким образом, автоматизация процессов дробления позволяет повысить производительность и энергоэффективность за счет минимизации вмешательства человека в процесс и, соответственно, снижения количества ошибок.

На данном этапе полностью автоматизировать процессы дробления на предприятиях невозможно. Операторы по-прежнему оказывают существенное влияние на процесс, поэтому следует учитывать, что одним из ключевых аспектов потери контроля со стороны оператора является отсутствие глубоких знаний о динамике процесса. Следовательно, для того чтобы свести к минимуму ошибки в условиях ручного управления, данные с приборов должны быть представлены в понятном виде. Это обеспечит эффективное принятие решений и повысит общую эффективность [27].

В другой статье [28] была показана целесообразность внедрения автоматизированной системы управления на отраслевом уровне. Использование автоматизированной системы повысило производительность и улучшило качество конечной продукции. Кроме того, это привело к уменьшению количества остановок из-за перегрузки дробилок по току, высокого уровня в приемном бункере, низкого уровня в загрузочном бункере, смещения и т.д. Авторы установили, что при ручном управлении задержек на 55 % больше, чем при работе установки с автоматизированной системой (22 против 49).

Другое исследование [29] было направлено на изучение целесообразности внедрения дорогостоящей системы управления технологическими процессами в горнодобывающей промышленности. Было проведено обследование на 20 горнодобывающих предприятиях. Оно показало, что применение системы управления и контроля технологическим процессом приводит к увеличению производительности на 1-16 %, повышению извлечения до 1 % и многим другим одновременным преимуществам при измельчении и флотации. К ним относятся меньшее вмешательство оператора и срок окупаемости менее шести месяцев.

Другие авторы [30] занимались разработкой оптимальной системы управления и контроля для стадии дробления. Были предложены математические модели двух замкнутых представлений, названных идеальной и реальной системами.

Еще в одной предыдущей работе [31] было реализовано программное решение цифровой системы для дробилки, позволяющее интегрировать набор взаимосвязанных технологических агрегатов под управлением одного аппаратного блока в контроллере и SCADA-системы, установленной на посту оператора.

Наиболее важными функциями цифровой системы для дробилки являются непрерывный контроль состояния оборудования, механизмов дробилки и агрегатов в процессе работы и формирование сигналов для управления производительностью дробилки. В электронном виде ведется архив всех отказов и параметров работы дробилки. Эффективность разработанной системы доказана. Система обеспечивает значительное повышение удобства работы оператора за счет предоставления однопользовательского интерфейса для управления дробилкой с центральной операторской станции [14].

Другие исследования [32] были направлены на совершенствование управления параметрами конусной дробилки. Было предложено программное обеспечение автоматизированной системы управления процессом дробления каменных материалов. Разработанная система обеспечила значительное повышение удобства работы оператора. Это было достигнуто за счет предоставления оператору однопользовательского интерфейса для управления различными технологическими агрегатами с одного операторского места, а также дополнительной информации и сервисов [33].

В работе [34] была представлена методика управления технологическим процессом на основе вибрационных сигналов. Сигнал от оборудования обрабатывается методом время-частотного анализа и представляется в виде изображения. Затем он подается на вход нейронной сети, которая анализирует производственный процесс.

Предыдущие авторы представили новый подход к локальному обнаружению неисправностей во вращающихся машинах, основанный на получении вибросигналов и их обработке методом матричной факторизации матрицы спектрограмм [35].

Система автоматического управления не может эффективно работать без постоянного сбора данных с машины. Датчики являются неотъемлемой частью замкнутого контура управления, поскольку качество измерений напрямую влияет на эффективность работы системы управления. Лучшее качество измерений приводит к более точному управлению. В предыдущей работе [36] был представлен метод контроля уровня загрузочного бункера. Исследовался вопрос о нежелательных «шумах» датчика уровня. Предложен новый метод с изменяющейся во времени адаптивной оценкой состояния для улучшения контроля уровня с помощью ультразвукового датчика. Для контроля уровня был применен ПИ-регулятор, который выдает сигнал, а регулятор управляет скоростью подачи для поддержания оптимального уровня загрузки бункера. В работе [37] также изучалась вибрация. В своем эксперименте авторы использовали виброметр для измерения вибрации и цифровой шумомер для управления шумом.

Авторы исследования [38] предложили автоматическую систему управления технологическим процессом для щековой дробилки. Это позволит улучшить и интенсифицировать производственный процесс, сократив при этом вмешательство человека при решении проблем производственного процесса. В предлагаемой системе используется ультразвуковой датчик с регулируемой скоростью вращения двигателя для управления скоростью вибрации грохота, предшествующего дробилке, что позволяет регулировать скорость подачи. Это позволяет решить проблему перегрузки дробилки. Кроме того, над грохотом установлена электромагнитная планка для улавливания частиц железа, содержащихся в сырье. Таким образом, решается проблема вынужденной остановки процесса дробления, а также сокращается время технического обслуживания и снижаются затраты. Кроме того, бункеры для хранения конечного продукта были спроектированы таким образом, чтобы соответствовать суточной производительности дробилки. Уровень в бункере контролируется с помощью ультразвукового датчика, что решает проблему потери конечного продукта. Для тестирования полученной системы была разработана трехмерная модель. Результаты моделирования подтвердили преимущества, достигнутые за счет увеличения скорости подачи примерно на 1,5 % и количества конечного продукта примерно на 2,5 %.

### *2.3. Снижение износа дробильного оборудования*

Износ представляет собой фактор, оказывающий существенное влияние на энергопотребление, поскольку использование устаревшего оборудования не позволяет обеспечить высокую интенсивность и эффективность производства. Кроме того, преждевременный износ или выход из строя узлов и оборудования, используемого для измельчения руды, может привести к незапланированным простоям и, следовательно, к значительным убыткам для горнодобывающей промышленности.

Зависимость между износом, деформацией и энергопотреблением дробилки рассматривалась многими исследователями. Например, в работе [39] была определена зависимость между износом и энергозатратами при различных коэффициентах сжатия и скольжения:

$$w_i = \frac{E_i}{\left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)} \quad (1)$$

где  $w_i$  – индекс чистой производительности Бонда;  $E_i$  – энергозатраты;  $F_{80}$  – 80 % входящего продукта;  $P_{80}$  – 80 % получаемого продукта.

Предложенная исследователями зависимость может быть использована для приближенного определения минимального количества энергии, необходимого для измельчения выбранных материалов заданного размера [40].

Авторы статьи [41] сосредоточили внимание на повышении энергоэффективности дробилок путем изменения их конструктивных особенностей. По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

Не менее 60 % затрачиваемой работы рассеивается за счет перераспределения частиц.

Доля энергии упругой деформации увеличивается, а доля энергии перераспределения уменьшается при увеличении напряжения сжатия.

Энергия разрушения составляет менее 5 % от общей затрачиваемой энергии, и эта величина не зависит от сжимающего напряжения.

Энергия, рассеиваемая за счет перераспределения, в 14-30 раз превышает энергию разрушения.

Проведенное исследование позволило расширить фундаментальные знания об изменении микроструктуры горных пород при ограниченном дроблении. Полученные результаты могут быть использованы для разработки энергоэффективных конструкций дробилок [42-44].

Детали дробилок обычно изготавливаются из аустенитной марганцевой стали. Этот материал широко используется в промышленности по нескольким причинам. Аустенитная марганцевая сталь обладает высокой вязкостью и устойчивостью к сильным ударным нагрузкам. В предыдущей работе [45] исследовались стали с различным содержанием марганца – сталь Хадфилда (12 % Mn), которая является наиболее распространенной, и сталь с более высоким содержанием марганца (20 % Mn). В результате было установлено, что это нецелесообразно, поскольку при более высокой стоимости такая сталь не обладает существенно большей износостойкостью.

Исследователи во всем мире пытаются минимизировать износ оборудования, изготовленного из стали Хадфилда. Например, износ может быть уменьшен путем нанесения твердых покрытий Metco 1030A методом лазерной наплавки [46] или термохимической обработки стали [47]. Исследования подповерхностных микроструктур стали Хадфилда позволяют определить, какие детали щековой дробилки наиболее уязвимы [48].

Преждевременный износ деталей дробилки связан с тем, что через дробильное оборудование проходит и пустая порода. Авторами в работе [49] было установлено, что наибольший положительный эффект с точки зрения энергоэффективности дробления дает исключение пустой породы из цикла дробления.

Еще одним эффективным способом минимизации износа дробилок является их адекватный подбор. Под адекватным подбором следует понимать использование конкретной дробилки для решения определенной задачи. Установлено, что характеристики формы конечного продукта играют важную роль в работе оборудования. Таким образом, в зависимости от желаемой формы конечного продукта зависит и тип используемой дробилки. Например, щековые дробилки используются для получения конечных продуктов лопастной и дисковой формы [50].

На износ оборудования влияют как условия эксплуатации, так и человеческий фактор. Авторы статьи [51] предложили для этой задачи двухцелевую оптимизационную модель, учитывающую влияние подготовки рабочей силы и износа оборудования.

Интенсивность отказов увеличивается по мере старения и износа дробилки [52], поэтому диагностика и прогнозирование неисправностей являются необходимыми действиями для оценки состояния оборудования и оптимизации его использования. В работе [53] для диагностики были

предложены анализы, основанные на физических моделях, наукоёмких моделях и моделях искусственного интеллекта.

Несмотря на большое количество исследований по теме повышения энергоэффективности дробилок, остается ряд нерешенных научных проблем [54].

Большинство трудностей носит экспериментальный характер моделирования дробилок. То есть возникают трудности при проведении экспериментов из-за недостатка данных о свойствах горных пород и невозможности проведения исследований на реальном оборудовании на предприятиях. Например, влияние текстуры, прочности и хрупкости горных пород на мощность, потребляемую дробилками, требует дополнительного изучения [55, 56]. Кроме того, еще не до конца изучена задача преобразования электроэнергии, затрачиваемой на дробление и измельчение горных пород, в тепловую энергию [57].

Дальнейших исследований требуют и методы предварительной подготовки руды для повышения энергоэффективности процессов дробления. Это необходимо, поскольку большинство разработанных в последнее время методов (микроволновая, ультразвуковая и электрическая дезинтеграция) сами по себе являются наукоёмкими, и общее потребление энергии не может быть существенно снижено [58,59].

Сталь Хадфилда была найдена во второй половине XIX века, и до сих пор большинство деталей дробилок изготавливается из нее. Многие исследователи пытались изобрести сталь, менее подверженную износу. Однако найти износостойкую сталь, которую было бы целесообразно использовать, до настоящего времени не удалось. Это объясняется тем, что сложные условия эксплуатации создают трудности при выборе материала, поскольку значения твердости сталей не раскрывают характера их износостойкости [60]. Однако в настоящее время ведутся исследования, связанные с использованием бейнитной стали без карбида в качестве альтернативного материала, который может быть использован при производстве деталей дробильного оборудования [61, 62].

### 3. Методы

Совершенствование технологических и дробильных процессов, в частности, напрямую связано с моделированием. Таким образом, важно изучить закономерности между параметрами технологических процессов. Это даст возможность усовершенствовать методы расчета различного оборудования и т.д. Ключевой задачей при моделировании рудоподготовки является определение математической связи между гранулометрическими характеристиками питания и продукции. Для получения качественного решения необходимо учесть все факторы, влияющие на процесс. Моделирование необходимо для изучения процесса с точки зрения оптимального управления. Гранулометрический состав материала конечной стадии дробления зависит от ряда факторов: прочности и крупности породы и износа конусов дробилки. На рис. 1 показана камера дробления конусной дробилки.

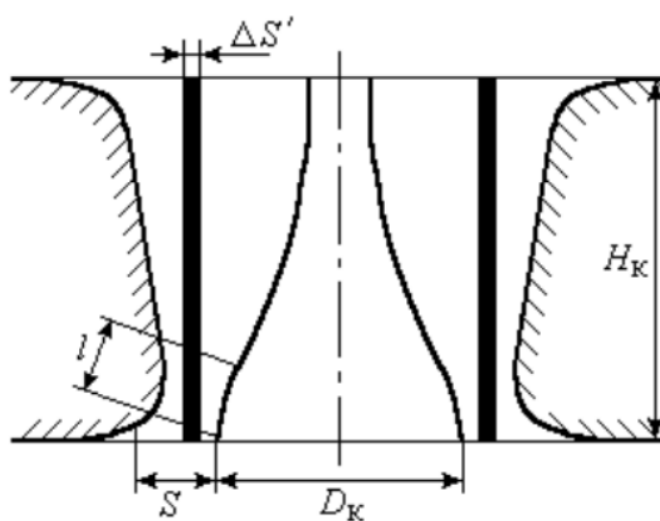


Рис. 1. Камера дробления конусной дробилки

В данной работе в качестве управляющих параметров используются ширина разгрузочной щели  $S$  и мощность входного материального потока дробилки  $\hat{Q}$ . Управляемыми параметрами являются потребляемая при дроблении мощность электропривода  $N$ , ток электропривода  $I$  и производительность выходного потока дробилки  $Q$ . Уравнение материального баланса конусной дробилки в отклонениях будет иметь вид:

$$\frac{d\Delta M}{dt} = \Delta \hat{Q} - \Delta Q \quad (2)$$

где  $\Delta \hat{Q}$ ,  $\Delta Q$  – прирост производительности входного и выходного материальных потоков дробилки;  $\Delta M = \gamma \Delta V$  – прирост объема материала  $V$  в камере дробления.

Прирост объема материала (рис. 1) составляет

$$\Delta V = \pi D_K H_K \Delta S \quad (3)$$

Изменение производительности конусной дробилки:

$$\Delta Q = 60 \mu n l \Delta V_B, \quad (4)$$

где  $\mu = 0,3 \div 0,65$  – коэффициент разрыхления;  $n$  – частота вращения привода;  $\Delta V_B = \frac{\pi D_K}{\Delta S}$  изменение объема разгружаемого материала при изменении величины  $\Delta S$  разгрузочного отверстия;  $l$  – длина параллелизма. Из уравнения (4) получаем:

$$\Delta S = \frac{1}{60 \mu n \pi D_K l} \Delta Q \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), получаем:

$$\Delta V = \frac{H_K}{60 \mu n l} \Delta Q \quad (6)$$

Из (2) и (6) получим

$$\Delta M = \frac{H_K}{60 n l} \Delta Q \quad (7)$$

Уравнение (2) с учетом (7) примет вид

$$\frac{H_K}{60 n l} \frac{d\Delta Q}{dt} + \Delta Q = \Delta \hat{Q} \quad (8)$$

Из (8) можно получить передаточную функцию конусной дробилки:

$$W_1^K(s) = \frac{Q(s)}{\hat{Q}(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (9)$$

Передаточная функция конусной дробилки с учетом времени запаздывания  $\tau_1$  и  $\tau_2$  будет иметь вид

$$W_1^K(s) = \frac{Q(s)}{\hat{Q}(s)} = \frac{e^{-s(\tau_1 + \tau_2)}}{Ts + 1} \quad (10)$$

где постоянная времени  $T = H_K / 60 n l$ .

Оценим степень изменения производительности при изменении разгрузочного отверстия дробилки  $\Delta S$ . Поскольку

$$\Delta \hat{Q} = \frac{\gamma}{t_z} \Delta V \quad (11)$$

То, учитывая (5), имеем:

$$\Delta\hat{Q} = \frac{\pi D_K H_K \gamma}{t_z} \Delta S \quad (12)$$

где  $t_z$  – время заполнения камеры дробления исходным материалом,  $\gamma$  – удельная плотность руды. Подставляя (12) в (2), получаем:

$$\frac{H_K}{60nl} \frac{d\Delta Q}{dt} + \Delta Q = \frac{\pi D_K H_K \gamma}{t_z} \Delta S$$

$$\Delta Q_{\Pi} = \frac{\gamma}{t_z} \Delta V \quad (13)$$

Если опустить знак приращения  $\Delta$ , то получается:

$$(T_K + 1)Q(s) = K_K S(s) \quad (14)$$

где  $K_K = \pi D_K H_K \gamma / t_z$ . Таким образом, получаем передаточную функцию конусной дробилки по  $S$ - $Q$  каналу с учетом времени запаздывания:

$$W_2^K(s) = \frac{Q(s)}{S(s)} = \frac{K_K e^{-s\tau_1}}{T_s + 1} \quad (15)$$

где  $K_N = \frac{n\sigma^2}{120\gamma E}$ ,  $\sigma$  – твердость материала,  $e$  – коэффициент полезного действия.

Структурная модель конусной дробилки представлена на рис. 2.

Предлагаемая модель основана на передаточных функциях, рассчитанных с учетом основных параметров руды и характеристик дробилки. Для моделирования использовалась программа Simulink.

В результате моделирования были получены следующие значения:

- Мощность двигателя  $N = 134,2$  кВт (отклонение от требуемой = 1,6 %).
- Ток двигателя  $I = 203,8$  А (отклонение от требуемого = 1,9 %).
- Производительность  $Q = 63,39$  т/ч (отклонение от требуемой = 5,6 %).

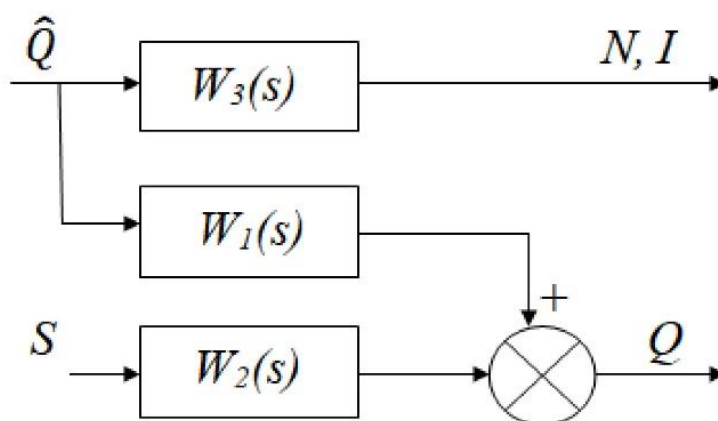


Рис. 2. Структурная модель конусной дробилки

В целом, с учетом полученной погрешности моделирования (максимальная погрешность не превышает 6 %), модель можно считать адекватной.

#### 4. Результаты

На математической модели был проведен имитационный эксперимент. Оценивались ток и мощность двигателя при изменении производительности дробилки от 40 до 80 т/ч при номинальном режиме 65 т/ч. Результаты эксперимента приведены в табл. 1 и на рис. 3 и 4.

Таблица 1

Результаты имитационного эксперимента

№.	Производительность дробилки, т/ч	Ток двигателя, А	Мощность двигателя, кВт
1	40	119,9	185,5
2	42	122,0	183,0
3	44	121,6	188,1
4	46	122,4	185,6
5	48	124,5	192,6
6	50	127,9	192,0
7	52	130,0	191,3
8	54	130,9	190,6
9	56	129,2	191,9
10	58	132,6	201,1
11	60	132,2	200,4
12	62	131,7	197,7
13	64	131,2	197,0
14	66	136,1	204,3
15	68	131,6	205,6
16	70	132,4	209,0
17	72	134,6	210,3
18	74	134,1	205,4
19	76	139,1	208,8
20	78	141,3	205,9
21	80	138,0	209,3

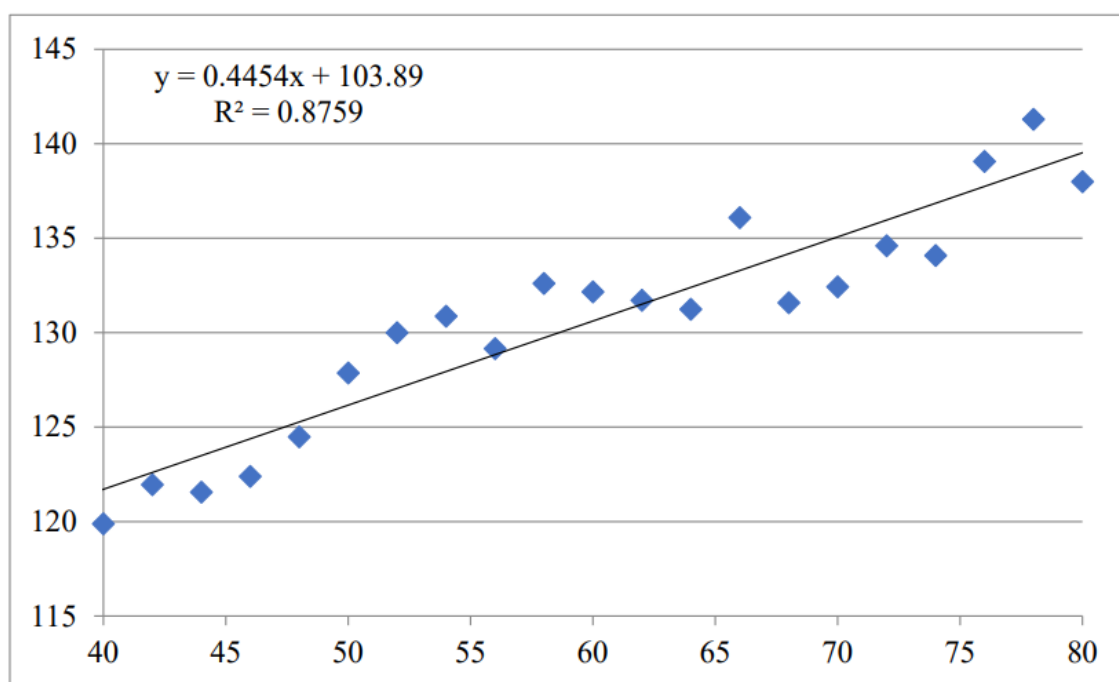


Рис. 3. Зависимость тока привода дробилки от мощности питания

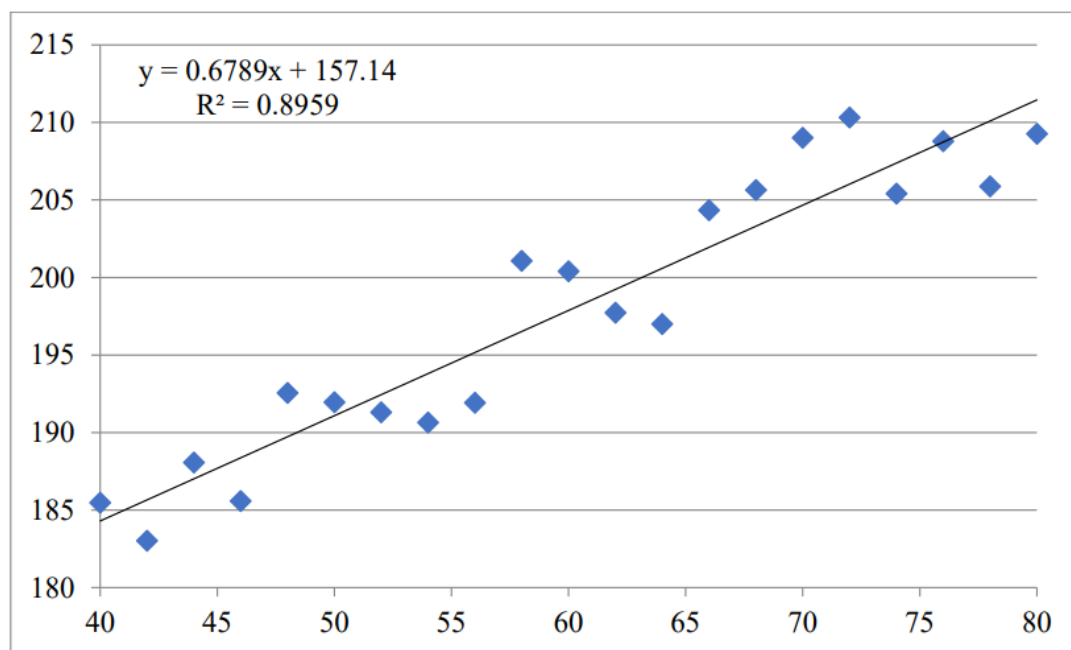


Рис. 4. Зависимость мощности электропривода дробилки от мощности питания

Эксперимент наглядно иллюстрирует зависимость нагрузки на электродвигатель дробилки от производительности питающего конвейера (чем больше руды подается в камеру дробления, тем выше ток и мощность, потребляемая приводом конусной дробилки). Коэффициент детерминации равен  $R^2 \approx 0,9$ .

## 5. Обсуждение

Зависимость тока привода дробилки от производительности питателя (рис. 3) представляет собой линейную функцию  $y = 0,4454x + 103,89$ . Эта зависимость является функциональной с  $R^2 = 0,8759$ , при этом каждому значению производительности питателя соответствует определенное значение тока привода дробилки.

Зависимость тока привода дробилки от производительности питателя (рис. 3) представляет собой линейную функцию  $y = 0,4454x + 103,89$ . Эта зависимость является функциональной с  $R^2 = 0,8759$ , при этом каждому значению производительности питателя соответствует определенное значение тока привода дробилки.

В соответствии с техническим заданием величина тока дробилки не должна превышать 138 А. Поэтому максимально допустимая производительность установки не должна превышать 76,5 т/ч.

Зависимость мощности привода дробилки от производительности питателя также подчиняется линейному принципу  $y = 0,6789x + 157,14$ . Эта зависимость является функциональной с  $R^2 = 0,8959$ , при этом каждому значению производительности питателя соответствует определенное значение мощности электропривода дробилки.

Анализ графиков (рис. 3 и 4) показывает симметричное расположение экспериментальных результатов относительно аппроксимирующей прямой. Это свидетельствует о том, что в разработанной модели отсутствует систематическая погрешность, а результаты расчетов имеют случайный характер. По результатам проведенных экспериментов были сделаны следующие выводы:

1. С увеличением производительности питателя увеличивается производительность дробилки и мощность двигателя дробилки, потребляемая в процессе дробления.
2. Изменение производительности питателя одинаково влияет как на саму дробилку, так и на мощность двигателя дробилки.
3. Установлено, что производительность агрегата не должна превышать 76,5 т/ч при номинальном значении 65 т/ч.

Предложенная математическая модель может быть использована для выбора оптимальных значений управляющих параметров с целью повышения эффективности дробления, а также при построении автоматизированных систем управления процессом дробления.

## 6. Выводы

1. В данной статье были подробно рассмотрены трудности, связанные с процессом дробления, в частности те, которые связаны с увеличением энергопотребления и снижением КПД. Можно сказать, что задача повышения энергоэффективности дробилок является актуальной на сегодняшний день. Научные достижения по теме исследования были разделены на различные аспекты, каждый из которых был подробно рассмотрен. В ходе анализа научные исследования выявили нерешенные задачи. Можно выделить следующие цели, решение которых приведет к повышению энергоэффективности дробилок:

- Повышение производительности установки. Это включает в себя совершенствование конструкций камеры дробления, рабочих органов и приводов, повышение условий удаления дробленой руды с выхода, обеспечение непрерывной подачи сырья, повышение коэффициента заполнения камеры дробления, сокращение времени простоев и уменьшение количества поломок.
  - Повышение надежности конструкции – увеличение надежности и долговечности конструктивных узлов и повышение эффективности защиты рабочих органов.
2. На основе анализа приведенной ниже информации можно сделать следующие выводы:
- Энергосбережение является одной из важнейших задач в управлении горными предприятиями.
  - Процессы дробления характеризуются повышенным удельным энергопотреблением.
  - Оборудование и производство в целом требуют реконструкции.
  - Необходима также разработка и внедрение энергосберегающих процессов.
  - Очевидна необходимость внедрения автоматизированных систем управления.
  - Несмотря на большое количество исследований, направленных на решение задачи низкой энергоэффективности дробилок, комплексного решения обозначенной проблемы не существует.
  - Внедрение технологий по снижению энергопотребления дробилок носит бессистемный характер. Разработанные методы применяются только локально.

3. Разработана математическая модель конусной дробилки, основанная на уравнениях материального баланса. Погрешность моделирования не превышает 6 %. На имитационной модели проведена серия экспериментов. Найдены зависимости тока электропривода дробилки и мощности электропривода от производительности питателя. Показано, что эти зависимости являются линейными. Коэффициент детерминации составляет  $R^2 \approx 0,9$ . Анализ графиков (рис. 3 и 4) демонстрирует симметричное расположение экспериментальных результатов относительно аппроксимирующей прямой. Это означает, что модель не имеет систематической погрешности, а результаты случайны. Установлено, что максимально допустимая производительность установки не должна превышать 76,5 т/час.

4. Полученная математическая модель может быть использована для оптимизации управляющих параметров с целью повышения эффективности дробления и разработки автоматизированных систем управления процессом дробления.

**Вклад авторов:** концептуализация, Н.В.; методология, Н.В.; программное обеспечение, А.С.; валидация, У.Г. и А.С.; курирование данных, У.Г.; написание – подготовка первоначального варианта, Н.В.; написание – рецензирование и редактирование, Н.В. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

**Финансирование:** Данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Заявление о доступности данных:** Данные, полученные авторами, полностью приведены в статье.

**Конфликты интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Matveev, A.I.; Lebedev, I.F.; Vinokurov, V.R.; Lvov, E.S. Scientific experimental bases for dry beneficiation of mineral ores. *J. Min. Inst.* 2022, 256, 613–622. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.90>
2. Koteleva, N.I.; Khokhlov, S.V.; Frenkel, I.V. Digitalization in Open-Pit Mining: A New Approach in Monitoring and Control of Rock Fragmentation. *Appl. Sci.* 2021, 11, 10848. <https://doi.org/10.3390/app112210848>
3. Matrokhina, K.V.; Trofimets VYa Mazakov, E.B.; Makhovikov, A.B.; Khaykin, M.M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *J. Min. Inst.* 2023, 259, 112–124. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.3>

4. Efimov, D.A.; Gospodarikov, A.P. Technical and technological aspects of the use of reuleaux triangular profile rolls in crushing units in the ore processing plant. *Min. Inf. Anal. Bull.* 2022, 10–12, 117–126. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_102\\_0\\_117](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_102_0_117)
5. Davoodi, A.; Asbjörnsson, G.; Hulthén, E.; Evertsson, M. Application of the Discrete Element Method to Study the Effects of Stream Characteristics on Screening Performance. *Minerals* 2019, 9, 788. <https://doi.org/10.3390/min9120788>
6. Zhukovskiy, Y.L.; Korolev, N.A.; Malkova, Y.M. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque. *J. Min. Inst.* 2022, 256, 686–700. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.91>
7. Gupta, A.; Yan, D. *Mineral Processing Design and Operation*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2006. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51636-7.X5000-1>
8. Evertsson, C.M. Modelling of flow in cone crushers. *Miner. Eng.* 1999, 12, 1479–1499. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00136-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00136-3)
9. Legendre, D.; Zevenhoven, R. Assessing the energy efficiency of a jaw crusher. *Energy* 2014, 74, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.036>
10. Oduori, M.F.; Mutuli, S.M.; Munyasi, D.M. Analysis of the single toggle jaw crusher kinematics. *J. Eng. Des. Technol.* 2015, 13, 213–239. <https://doi.org/10.1108/JEDT-01-2013-0001>
11. Johansson, M.; Bengtsson, M.; Evertsson, M.; Hulthén, E. A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. *Miner. Eng.* 2017, 105, 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.012>
12. Soni, S.K.; Shukla, S.C.; Kundu, G. Modeling of particle breakage in a smooth double roll crusher. *Int. J. Miner. Process.* 2009, 90, 97–100. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.007>
13. Li, Y.-W.; Zhao, L.-L.; Hu, E.-Y.; Yang, K.-K.; He, J.-F.; Jiang, H.-S.; Hou, Q.-F. Laboratory-scale validation of a DEM model of a toothed double-roll crusher and numerical studies. *Powder Technol.* 2019, 356, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.010>
14. Sinnott, M.D.; Cleary, P.W. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 2—Impact crushers. *Miner. Eng.* 2015, 74, 163–177. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.017>
15. Yungmeyster, D.A.; Brichkin, V.N.; Isaev, A.I. Design and process parameters of an air hammer for oversize reduction. *Obogashchenie Rud* 2019, 2019, 3–7. <https://doi.org/10.17580/or.2019.02.01>
16. Napier-Munn, T. Is progress in energy-efficient comminution doomed? *Miner. Eng.* 2015, 73, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.06.009>
17. Cleary, P.W.; Sinnott, M.D. Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1—Compression crushers. *Miner. Eng.* 2015, 74, 178–197. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.021>
18. Davoodi, A.; Bengtsson, M.; Hulthén, E.; Evertsson, C.M. Effects of screen decks' aperture shapes and materials on screening efficiency. *Miner. Eng.* 2019, 139, 105699. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.026>
19. Morrison, R.D.; Cleary, P.W. Towards a virtual comminution machine. *Miner. Eng.* 2008, 21, 770–781. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.06.005>
20. Atta, K.T.; Euzébio, T.; Ibarra, H.; Moreira, V.S.; Johansson, A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model. *IFAC-PapersOnLine* 2019, 52, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154>
21. Boikov, A.; Savelev, R.; Payor, V.; Potapov, A. Universal Approach for DEM Parameters Calibration of Bulk Materials. *Symmetry* 2021, 13, 1088. <https://doi.org/10.3390/sym13061088>
22. Cleary, P.W. Large scale industrial DEM modelling. *Eng. Comput.* 2004, 21, 169–204. <https://doi.org/10.1108/02644400410519730>
23. Cleary, P.W.; Delaney, G.W.; Sinnott, M.D.; Cummins, S.J.; Morrison, R.D. Advanced comminution modelling: Part 1—Crushers. *Appl. Math. Model.* 2020, 88, 238–265. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.06.049>
24. Abuhasel, K.A. Optimization and Simulation of Operation Performance in Crushing Plants Using Fuzzy Modelling. *J. Syst. Sci. Syst. Eng.* 2019, 28, 766–780. <https://doi.org/10.1007/s11518-019-5430-z>
25. Abuhasel, K.A. Machine learning approach to handle data driven model for simulation and forecasting of the cone crusher output in the stone crushing plant. *Comput. Intell.* 2020, 37, 1098–1110. <https://doi.org/10.1111/coin.12338>
26. Azizi, A.; Rooki, R.; Mollayi, N. Modeling and prediction of wear rate of grinding media in mineral processing industry using multiple kernel support vector machine. *SN Appl. Sci.* 2020, 2, 1469. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03212-0>
27. Bhadani, K.; Asbjörnsson, G.; Hulthén, E.; Evertsson, M. Application of multi-disciplinary optimization architectures in mineral processing simulations. *Miner. Eng.* 2018, 128, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.08.029>
28. Asbjörnsson, G.; Tavares, L.M.; Mainza, A.; Yahyaei, M. Different perspectives of dynamics in comminution processes. *Miner. Eng.* 2021, 176, 107326. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107326>
29. Leiva, C.; Arcos, K.; Poblete, D.; Serey, E.; Torres, C.; Ghorbani, Y. Design and Evaluation of an Expert System in a Crushing Plant. *Minerals* 2018, 8, 469. <https://doi.org/10.3390/min8100469>
30. Bouffard, S.C. Benefits of process control systems in mineral processing grinding circuits. *Miner. Eng.* 2015, 79, 139–142. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.06.006>
31. Bashaleishvili, D.I. An optimal crusher control: Its design. *Autom. Remote Control* 2006, 67, 54–64. <https://doi.org/10.1134/S0005117906010036>
32. Ostroukh, A.; Kuffinova, N.; Pronin, C.; Vasiliev, Y.E.; Barinov, K.A. Crushing and screening digital system. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2021, 1159, 012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1159/1/012090>
33. Shestakov, A.K.; Petrov, P.A.; Nikolaev, M.Y. Automatic System for Detecting Visible Emissions in a Potroom of Aluminum Plant Based on Technical Vision and a Neural Network. *Metallurgist* 2023, 66, 1308–1319. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01445-z>
34. Ostroukh, A.; Surkova, N.; Varlamov, O.O.; Chernenky, V.; Baldin, A. Automated process control system of mobile crushing and screening plant. *J. Appl. Eng. Sci.* 2018, 16, 343–348. <https://doi.org/10.5937/jaes16-15586>
35. Liao, Y.; Ragai, I.; Huang, Z.; Kerner, S. Manufacturing process monitoring using time-frequency representation and transfer learning of deep neural networks. *J. Manuf. Process.* 2021, 68, 231–248. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.046>
36. Wodecki, J.; Kruczek, P.; Bartkowiak, A.; Zimroz, R.; Wylomańska, A. Novel method of informative frequency band selection for vibration signal using Nonnegative Matrix Factorization of spectrogram matrix. *Mech. Syst. Signal Process.* 2019, 130, 585–596. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.05.020>

37. Itävuori, P.; Hulthén, E.; Vilkkio, M. Feed-hopper level estimation and control in cone crushers. *Miner. Eng.* 2017, 110, 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.04.010>
38. Kamarullah, K.; Susanto, H. Analysis of Vibration and Noise on Vibrating Screen at Pt. Mifa Bersaudara. *Int. J. Mater.* 2022, 9, 12–16. <https://doi.org/10.46300/91018.2022.9.3>
39. Elgendi, E.O.; Shawki, K. Automated process control system of Jaw crusher production. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 2128, 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2128/1/012034>
40. Terva, J.; Kuokkala, V.-T.; Valtonen, K.; Siitonen, P. Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing. *Wear* 2018, 398–399, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.004>
41. Wang, P.; Arson, C. Energy distribution during the quasi-static confined comminution of granular materials. *Acta Geotech.* 2018, 13, 1075–1083. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0622-5>
42. Turyshcheva, A.; Voytyuk, I.; Guerra, D. Estimation of electricity generation by an electro-technical complex with photoelectric panels using statistical methods. *Symmetry* 2021, 13, 1278. <https://doi.org/10.3390/sym13071278>
43. Kochnev, A.A.; Kozyrev, N.D.; Kochneva, O.E.; Galkin, S.V. Development of a comprehensive methodology for the forecast of effectiveness of geological and technical measures based on machine learning algorithms. *Georesursy* 2020, 22, 79–86. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.79-86>
44. Shishkin, E.V.; Kazakov, S.V. Energy-efficient equipment for disintegration of extremely strong materials. *Gorn. Zhurnal* 2021, 11, 53–59. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.11.07>
45. Machado, P.; Pereira, J.; Sinatora, A. Abrasion wear of austenitic manganese steels via jaw crusher test. *Wear* 2021, 476, 203726. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203726>
46. Teixeira, M.F.; Pacheco, J.T.; da Silva, L.J.; Rabelo, A.; Pereira, M.; Niño, C.E. Wear resistance of a Metco 1030A hard coating deposited on Hadfield steel by laser cladding for ore comminution application. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, 112, 1873–1884. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06415-2>
47. Dalai, R.; Das, S.; Das, K. Effect of thermo-mechanical processing on the low impact abrasion and low stress sliding wear resistance of austenitic high manganese steels. *Wear* 2018, 420–421, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.013>
48. Machado, P.; Pereira, J.; Sinatora, A. Subsurface microstructural dynamic recrystallization in multiscale abrasive wear. *Wear* 2021, 486–487, 204111. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204111>
49. Ballantyne, G.R.; Powell, M.S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. *Miner. Eng.* 2014, 65, 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017>
50. Kamani, M.; Ajalloeian, R. The effect of rock crusher and rock type on the aggregate shape. *Constr. Build. Mater.* 2019, 230, 117016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117016>
51. Mehdizadeh, E.; Niaki, S.T.A.; Hemati, M. A bi-objective aggregate production planning problem with learning effect and machine deterioration: Modeling and solution. *Comput. Oper. Res.* 2018, 91, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.001>
52. Sinha, R.S.; Mukhopadhyay, A.K. Failure rate analysis of Jaw Crusher: A case study. *Sādhanā* 2019, 44, 17. <https://doi.org/10.1007/s12046-018-1026-4>
53. Liu, C.; Cichon, A.; Królczyk, G.; Li, Z. Technology development and commercial applications of industrial fault diagnosis system: A review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021, 118, 3497–3529. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08047-6>
54. Aleksandrova, T.N. Complex and deep processing of mineral raw materials of natural and technogenic origin: State and prospects. *J. Min. Inst.* 2022, 256, 503–504.
55. Comakli, R.; Cayirli, S. A correlative study on textural properties and crushability of rocks. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2018, 78, 3541–3557. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1357-8>
56. Kahraman, S.; Toraman, O.Y.; Cayirli, S. Predicting the strength and brittleness of rocks from a crushability index. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2017, 77, 1639–1645. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1012-9>
57. Zhang, Z.X.; Ouchterlony, F. Energy Requirement for Rock Breakage in Laboratory Experiments and Engineering Operations: A Review. *Rock Mech. Rock Eng.* 2022, 55, 629–667. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02687-6>
58. Singh, V.; Dixit, P.; Venugopal, R.; Venkatesh, K.B. Ore pretreatment methods for grinding: Journey and prospects. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 2018, 40, 1–15. <https://doi.org/10.1080/08827508.2018.1479697>
59. Boikov, A.V.; Payor, V.A. The Present Issues of Control Automation for Levitation Metal Melting. *Symmetry* 2022, 14, 1968. <https://doi.org/10.3390/sym14101968>
60. Valtonen, K.; Ojala, N.; Haiko, O.; Kuokkala, V.-T. Comparison of various high-stress wear conditions and wear performance of martensitic steels. *Wear* 2019, 426–427, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.006>
61. Garmeh, B.; Kasiri-Asgarani, M.; Amini, K.; Ghayour, H. Analysis of Hadfield Scrap Shredder Hammer Fracture and replacing it with Carbide-free Nano-Bainitic Steel. *Eng. Fail. Anal.* 2019, 109, 104230. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104230>
62. Varela, L.B.; Tressia, G.; Masoumi, M.; Bortoleto, E.M.; Regattieri, C.; Sinatora, A. Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur? *Eng. Fail. Anal.* 2021, 122, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105295>