



На правах рукописи

Стожков Дмитрий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ
ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ И ДРОБЛЕНИЯ
ЗАБАЛАНСОВЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО
«Уральский государственный горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент **Потапов Валентин Яковлевич**

Официальные оппоненты:

Никитин Александр Григорьевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный индустриальный университет», директор института
машиностроения и транспорта

Шемякин Владимир Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «НПК
«Техноген»».

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург).

Защита состоится 19 февраля 2020 г. в 13-30 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.280.03 на базе ФГБОУ ВО «Уральский
государственный горный университет» в зале заседаний Ученого совета по
адресу: 620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте
– <http://www.ursmu.ru> ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный
университет».

Автореферат диссертации разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

М. Л. Хазин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Измельчительное и сепарационное оборудование является основным оборудованием при подготовке горных пород к обогащению. Вовлечение в переработку бедных сульфидных руд приводит к существенному увеличению объемов переработки горной массы не содержащей полезного ископаемого и, соответственно, росту материальных и энергетических затрат. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий, использующих дробильно-размольное оборудование, невозможно без разработки конструкций сепараторов для предварительного разделения горных пород, которые существенно уменьшают объемы переработки. Промышленных сепараторов использующих тепловой пробой бедной сульфидной руды в настоящее время нет. Тепловой пробой сопровождается существенным уменьшением прочностных характеристик кусков руды что, соответственно, в дальнейшем приводит к снижению энергозатрат на дробление и измельчение и росту эффективности работы дробильно-размольного оборудования. В последнее время существенно выросла стоимость энергоносителей, что увеличило затраты горных предприятий на производство продукции.

В связи с этим работа, направленная на разработку оборудования, обеспечивающего снижение энергозатрат и уменьшение материалоемкости при измельчении бедных сульфидных руд, является актуальной.

Степень научной разработанности темы исследований.

Проблемам повышения эффективности оборудования для разрушения горных пород посвящены научные работы Ревнивцева В. И., Чантурия В. А., Новика Г. Я., Викторова С. Д., Зильбершмидта М. Г., Кузьмина В. А., Бунина И. Ж., Лунина В. Д., Котова Ш. А., Нистратова В. Ф., Гончарова С. А., Бруева В. Л., Вайсберга Л. А. и др. Решение этих проблем предполагалось путем разработки технических средств использующих магнитно-импульсную обработку, обработку высокочастотным или низкочастотным электромагнитным полем направленного воздействия на руду с целью снижения ее прочностных свойств и повышения степени раскрытия зерен полезных минералов. Это предлагалось осуществить перед дроблением в щековых, конусных дробилках и перед измельчением в шаровых мельницах. Однако в горной промышленности эти сепараторы использующие различные принципы воздействия на горную массу не получили широкого распространения из-за низкой эффективности процесса разрушения.

Цель работы: Повышение эффективности работы оборудования для предварительного разделения и разрушения забалансовых сульфидных руд за счет их разупрочнения.

Задачи исследований:

1. Выбор рациональных конструктивных и режимных параметров установки для разделения и разупрочнения забалансовой сульфидной руды в зависимости от физических свойств горной массы.

2. Обоснование показателя эффективности работы ударного электромагнитного механизма сепаратора для разрушения кусков сульфидной

руды класса - 80 + 20 мм.

3. Разработка электромагнитного ударного механизма сепаратора.

Научная новизна работы заключается в разработке математической модели сепаратора и методики определения его рациональных режимных и конструктивных параметров, обеспечивающих необходимую производительность и снижение энергозатрат, в выборе показателя оценки эффективности оборудования для предварительного разделения бедных забалансовых руд.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании разделительного признака для бедной сульфидной руды – теплового (электрического) пробоя, в разработке вероятностной математической модели рабочего процесса сепаратора, выборе показателя оценки эффективности оборудования для предварительного разделения и обоснования методики определения его рациональных режимных, конструктивных и энергетических параметров, обеспечивающих необходимую производительность и снижения энергозатраты.

Практическая значимость работы заключается в разработке и изготовлении полупромышленной установки – электроиндукционного сепаратора для предварительного разделения, разупрочнения и дробления бедной сульфидной руды, позволяющая существенно снизить энергоемкость дробления-измельчения материала и повышает эффективность работы оборудования.

Методология и методы научных исследований: общелогические методы (анализ и обобщение научно-технической и патентной информации, индукция, синтез и т. д.), теория подобия, методы математического и физического моделирования, математическая статистика при проведении экспериментальных исследований на полупромышленной установке.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Конструктивные параметры узлов разупрочнения куска руды и ударного разрушения (энергия единичного удара, емкость конденсаторного накопителя энергии, индуктивность электромагнитной системы) сепаратора для разделения забалансовой сульфидной руды определяются электрической проводимостью кусков, которая является наиболее контрастным признаком и зависит от содержания сульфидов.

2. Эффективность работы сепаратора для ударного разрушения целесообразно оценивать по отношению энергии разрушения к массе куска и степени дробления.

3. Сепаратор, использующий в качестве основного признака разделения тепловой пробой бедной сульфидной руды, позволяет снизить суммарные затраты энергии на дробление – измельчение.

Степень достоверности основных научных положений, выводов и рекомендаций достигнута корректным использованием теории подобия, методов математического и физического моделирования, теорией вероятности и математической статистики, современного вычислительного оборудования и компьютерного программного обеспечения. Достоверность подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, относительное расхождение которых не превышает 10-12 %.

Апробация работы. Основные результаты работы и её отдельные

положения докладывались: на VII Уральском горнопромышленном форуме «Инновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья», 17-19 октября 2017 г., г. Екатеринбург; Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности», г. Екатеринбург, 2016-2019 г.; Уральской горнопромышленной декаде, г. Екатеринбург, 2018-2019 г.

Личный вклад автора заключается в:

- постановке задач исследований;
- определении признака разделения, обеспечивающего наиболее эффективное удаление пустой породы из забалансовой сульфидной руды;
- определении рациональных конструктивных и режимных параметров установки для разделения и разупрочнения забалансовой сульфидной руды;
- организации, проведении и анализе результатов экспериментальных исследований;
- разработке имитационной модели сепаратора предварительного разделения бедной сульфидной руды;
- обосновании критерия оценки эффективности процесса ударного разрушения кусков сульфидной руды.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при проектировании и изготовления полупромышленной установки для идентификации кусков, содержащих сульфиды, их электрообработки и ударного разрушения. Экономический эффект от использования электроиндукционного сепаратора, включенного в технологический регламент на переработку вскрышных пород Бакр Тау в качестве основного технологического аппарата для предварительного разделения забалансовых сульфидных руд, составит 3951,4 тысяч рублей в год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 работы в ведущих рецензируемых научных журналах по группе научных специальностей 05.05.00 – «Транспортное, горное и строительное машиностроение»; в рецензируемых научных журналах - 1; получен 1 патент.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 137 наименований и пяти приложений. Работа содержит 94 страниц текста, 51 рисунок, 38 таблиц и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, выбран объект и предмет исследований, сформулированы цель и задачи исследований, приведены защищаемые научные положения, методы исследований, научная и практическая ценность работы, достоверность результатов исследований, реализация и апробация работы, личный вклад автора.

В первой главе приведен анализ средств и методов разупрочнения сульфидных руд при подготовке их к дроблению и измельчению. В главе сформулированы основные задачи работы по повышению эффективности работы дробильного и измельчительного оборудования за счет предварительного

разделения и разупрочнения бедной сульфидной руды.

Во второй главе обосновывается признак разделения. К свойствам полезных ископаемых, оказывающим влияние на эффективность разделения, относятся: физико-механические свойства, включающие трибометрические, радиометрические и другие; вещественный состав и характер распределения минералов, содержание ценных и сопутствующих компонентов, гранулометрический состав и контрастность полезного ископаемого, степень соответствия величины разделительного признака содержанию ценных компонентов.

В третьей главе приведены результаты исследований дробимости забалансовой медно-цинковой руды. Получена зависимость относительной энергии разрушения от энергии удара, а также гистограмма распределения кусков необработанной сульфидной руды до и после дробления ударом

В четвертой главе приводится обоснование методики расчета основных конструктивных параметров оборудования для предварительного разделения бедной сульфидной руды.

Важнейшими показателями, определяющими параметры оборудования, является плотность горной массы, её гранулометрический состав и содержание сульфидов. Установлено, что они являются случайными величинами.

В заключении приводятся основные выводы и рекомендации, полученные в результате выполнения диссертационной работы.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Конструктивные параметры узлов разупрочнения и ударного разрушения (энергия единичного удара, емкость конденсаторного накопителя энергии, индуктивность электромагнитной системы) сепаратора для разделения забалансовой сульфидной руды определяются электрической проводимостью кусков, которая является наиболее контрастным признаком и зависит от содержания сульфидов.

Контрастность полезного компонента, согласно работам В. А. Мокроусова, для любого разделительного процесса является фактором, в первую очередь определяющим эффективность разделения.

Показатель контрастности определяется как для отдельных классов, так и для руды в целом как средневзвешенная величина с учетом выхода каждого класса. Расчет показателя контрастности был проведен по трем компонентам: по меди, цинку и сере. Результаты анализа теоретической разделяемости забалансовой руды приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения содержаний полезных компонентов и показателей контрастности забалансовой руды

Точка отбора	Класс, мм	Массовая доля, %			Показатель контрастности		
		медь	цинк	сера	медь	цинк	сера
Забалансовая после III стад.	- 50 + 25	0,17	0,05	14,48	1,25	1,16	0,80

В качестве разделительного признака рассматривается характеристическое рентгеновское излучение и электропроводность кусков забалансовых руд. Результаты разделения от аналитических параметров рентгенорадиометрической сепарации представлены в табл. 2. Здесь же приведены спектры вторичного излучения образцов забалансовых руд.

Одним из методов радиометрического разделения является индукционный радиорезонансный метод (ИРМ), связанный с электропроводимостью кусков сульфидной руды.

Таблица 2

Уравнения регрессии и корреляционные отношения зависимости аналитических параметров элементов от массовой доли

Руда	Вид зависимости	Уравнение регрессии	Корреляционное отношение
Медная забалансовая	$I_{Cu} = f(\alpha_{Cu})$	$I_{Cu} = 0,02 - 0,001\alpha_{Cu} + 0,006\alpha_{Cu}^2$	0,59
	$I_{Zn} = f(\alpha_{Cu})$	$I_{Zn} = -0,002 + 0,37\alpha_{Cu} - 0,28\alpha_{Cu}^2$	0,36
	$I_S = f(\alpha_S)$	$I_S = 0,06 - 0,001\alpha_S + 0,0001\alpha_S^2$	0,70

Для исследования электропроводности кусков использовалась блок-схема колебательного контура (излучателя) и лабораторный стенд для измерения добротности контура, приведенные на рис 1.

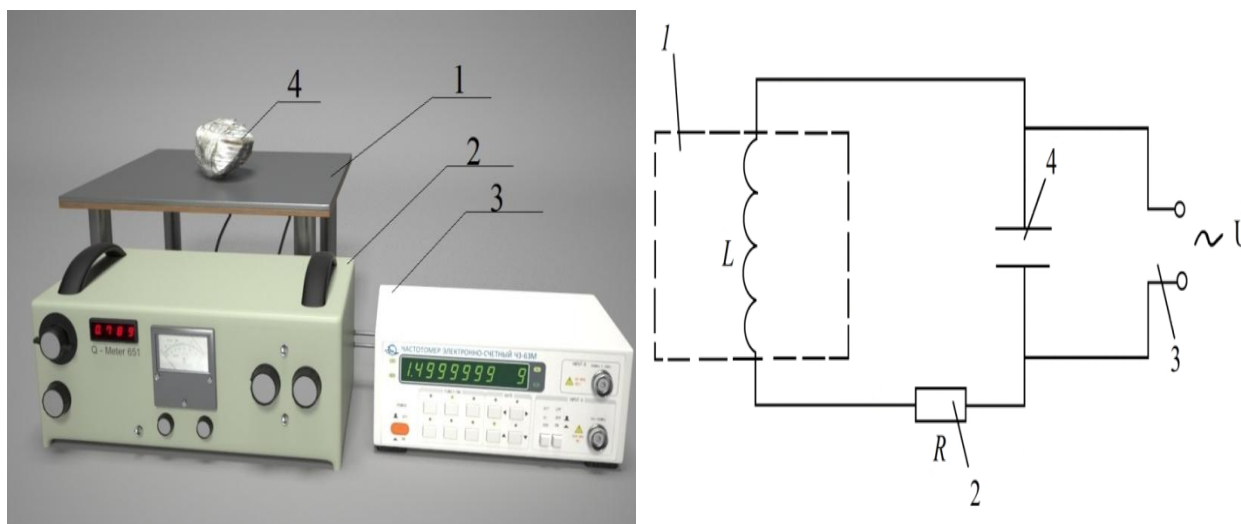


Рис. 1. Блок-схема колебательного контура (излучателя) и лабораторный стенд для измерения добротности кусков: 1 - индукционный датчик; 2 - активное сопротивление цепи контура; 3 - генератор ВЧ; 4 – емкость

Исследованиями установлено, что сульфидные минералы и их аналоги обладают значительной электропроводностью. Электропроводность вмещающих пород на несколько порядков ниже. Если для рудной части величина удельного электрического сопротивления 10^{-1} Ом·м, а для вмещающих пород она составляет 10^1 Ом·м и выше, то наиболее перспективным для разделения сульфидных руд является индукционный радиорезонансный метод.

Содержание ценных компонентов в продуктах разделения – один из основных технологических показателей (показатель признака – П, показатель эффективности – Э, теоретическое извлечение – E_T), по которому оценивается эффективность любого метода разделения.

Результаты оценки эффективности данным методом представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности признака разделения (ΔQ) по электропроводимости кусков

Руда	Медь			Цинк			Сера		
	П	Э	E_T	П	Э	E_T	П	Э	E_T
Забалансовая руда	0,80	0,64	0,39	0,78	0,67	-	0,37	0,46	-

В результате проведенных экспериментов был произведен выбор более соответствующего фактора подготовки руды к разделению, который осуществляется двумя методами – анализа корреляций и ранжирования по алгоритму отбора и упорядочения признаков по информационным весам.

В табл. 4 приведены результаты анализа для каждого из факторов, а также коэффициенты корреляции, уравнения регрессии, информационные веса признаков и результаты их ранжирования.

Таблица 4

Связь выхода хвостов с разделительными признаками и результаты их ранжирования

Признак	По результатам корреляционного анализа			По алгоритму отбора и упорядочения	
	уравнение линии регрессии	коэффициент корреляции	ранг признака	информационный вес, отн. ед.	ранг признака
Средняя массовая доля компонентов в руде, %	Медь $\gamma_{xb} = 41,29 - 4,26x$	- 0,17	14	0,046	14
	Цинк $\gamma_{xb} = 37,99 - 1,65x$	- 0,11	15	0,103	6
	Сера $\gamma_{xb} = 60,91 - 1,21x$	- 0,76	1	0,146	1
Сумма сульфидных минералов	$\gamma_{xb} = 59,65 - 0,55x$	- 0,62	5	0,125	5
Массовая доля компонентов в наиболее богатых кусках	Медь $\gamma_{xb} = 19,41 + 1,81x$	0,55	6	0,076	12
	Цинк $\gamma_{xb} = 33,88 + 0,17x$	0,10	16	0,058	13
	Сера $\gamma_{xb} = 89,93 - 1,25x$	- 0,43	8	0,086	9

Признак	По результатам корреляционного анализа			По алгоритму отбора и упорядочения	
	уравнение линии регрессии	коэффициент корреляции	ранг признака	информационный вес, отн. ед.	ранг признака
Избирательность дробления монофаз ф, град	Медь $\gamma_{хв} = 36,32 - 7,15x$	- 0,35	12	0,043	15
	Цинк $\gamma_{хв} = 36,9 - 0,92x$	- 0,19	13	0,025	16
	Сера $\gamma_{хв} = 35,23 - 0,76x$	- 0,41	9	0,128	4
$\Delta a/a$, отн.ед.	Сера $\gamma_{хв} = 34,43 - 17,22x$	- 0,63	4	0,091	8
Отношение интенсивности вторичного характеристического рентгеновского излучения анализируемых элементов к рассеянному излучению источника	Медь $\gamma_{хв} = 19 - 14x + 62x^2$	0,59	5	0,083	10
	Цинк $\gamma_{хв} = -1,6 + 37,3x - 2,8x^2$	0,36	11	0,081	11
	Сера $\gamma_{хв} = 59 - 6x + 0,8x^2$	0,7	2	0,143	2
Добротность контура связанная с электропроводимостью минералов	Медь $\gamma_{хв} = -15,1 - 43,4x - 16,9x^2$	0,52	7	0,094	7
	Сера $\gamma_{хв} = 34,48 - 8,39x + 12,5x^2$	0,64	3	0,136	3

Данные табл. 4 показывают, что наибольшее влияние на выход хвостов оказывает сера. Она входит в состав сульфидов, которые имеют на 3 и более порядка меньше сопротивление, чем пустые породы. Поэтому на основании проведенных исследований физико-механических свойств медно-цинковой забалансовой руды выявлено, что основным показателем для создания устройства селективного разупрочнения руд является первоначальная проводимость пород – их удельное электросопротивление. Зная допустимые значения потерь полезного компонента в хвосты или извлечение полезного компонента в концентрат, можно определить порог для получения концентрата, а также определить выход породы, которую можно сразу выделить при разделении, не затрачивая в дальнейшем энергии на ее дробление и измельчение.

В результате исследований установлено, что удельная электропроводность может быть использована при разработке сепаратора для бедных сульфидных руд с одновременным разупрочнением кусков, содержащих полезные компоненты, что в дальнейшем уменьшит энергоемкость дробления-измельчения.

Этим доказывается первое научное положение.

2. Эффективность работы сепаратора для ударного разрушения целесообразно оценивать по отношению энергии разрушения к массе куска и степени дробления.

Исследование влияния электрообработки на дробимость бедной сульфидной руды производилось на экспериментальной установке, разработанной и изготовленной в УГГУ. На (рис. 2) приведен магнитно-индукционный ударник для ударного разрушения кусков сульфидной руды.

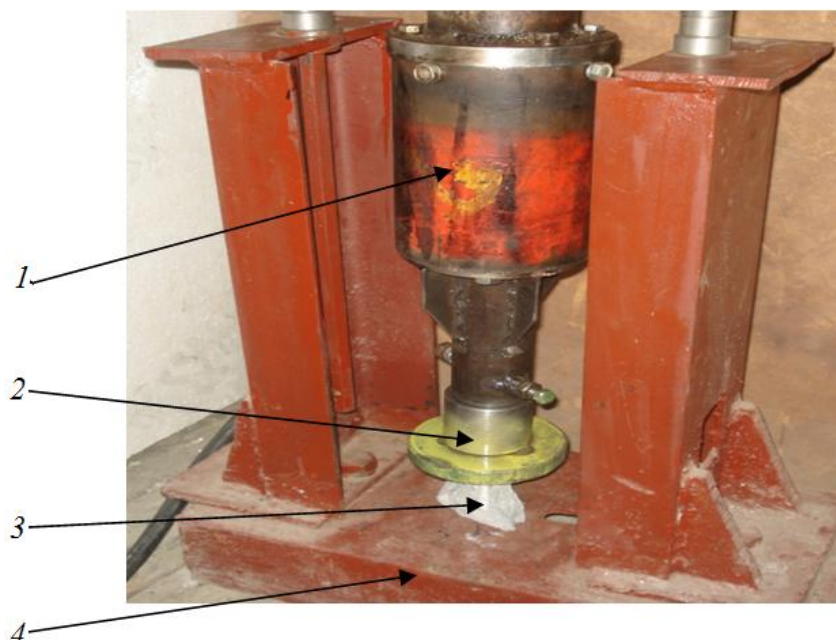


Рис. 2. Магнитно-индукционный ударник: 1- корпус (статор); 2- рабочая часть ударника; 3 - кусок горной породы; 4 - рама установки

Электрической обработке подвергались куски забалансовой руды крупностью – 60 + 20 мм со средним содержанием меди 0,6 %. Ток через кусок пропускался в двух направлениях (по максимальному и среднему размеру) в течении 0,3...0,5 с. Величина энергии удара устанавливалась в зависимости от максимального размера куска. В табл. 5 приведены характеристики руды и процесса её разрушения.

Относительная энергия разрушения сульфидов определялась по формуле

$$E_{ор} = E_y / (i \cdot m), \quad (1)$$

где m - масса куска руды, кг.

Эффективность процесса разрушения определяется по степени и энергоёмкости дробления. Однако данные таблицы показывают, что характеризовать эффективность процесса разрушения по одному показателю (отношению энергии разрушения к массе куска или степени дробления) не вполне адекватно. Обычно чем больше степень дробления, тем больше удельные затраты энергии. Поэтому, по нашему мнению, эффективность процесса дробления целесообразно оценивать отношением удельной энергии разрушения к степени дробления, т. е. относительной энергии разрушения. Чем меньше относительная энергия разрушения, тем совершеннее в конструктивном

исполнении машина и эффективнее процесс.

Таблица 5

Параметры процесса разрушения бедной медно-цинковой руды

№ п.п.	Средневзвешенный размер кусков до дробления, d_l , мм	Степень дробления, i	Энергия удара, E_y , Дж	Удельная энергия разрушения, E_y / m , кДж/кг	Относительная энергия разрушения, E_{op} / i , кДж/кг
1	28	2,16	60	1,33	0,62
2	33	3,75	75	1,67	0,45
3	41	3,6	104	1,40	0,39
4	49	3,8	139	1,10	0,29
5	56	3,1	184	0,78	0,25
6	80	1,87	240	0,48	0,26

На рис. 3 приведена зависимость относительной энергии разрушения от энергии удара.

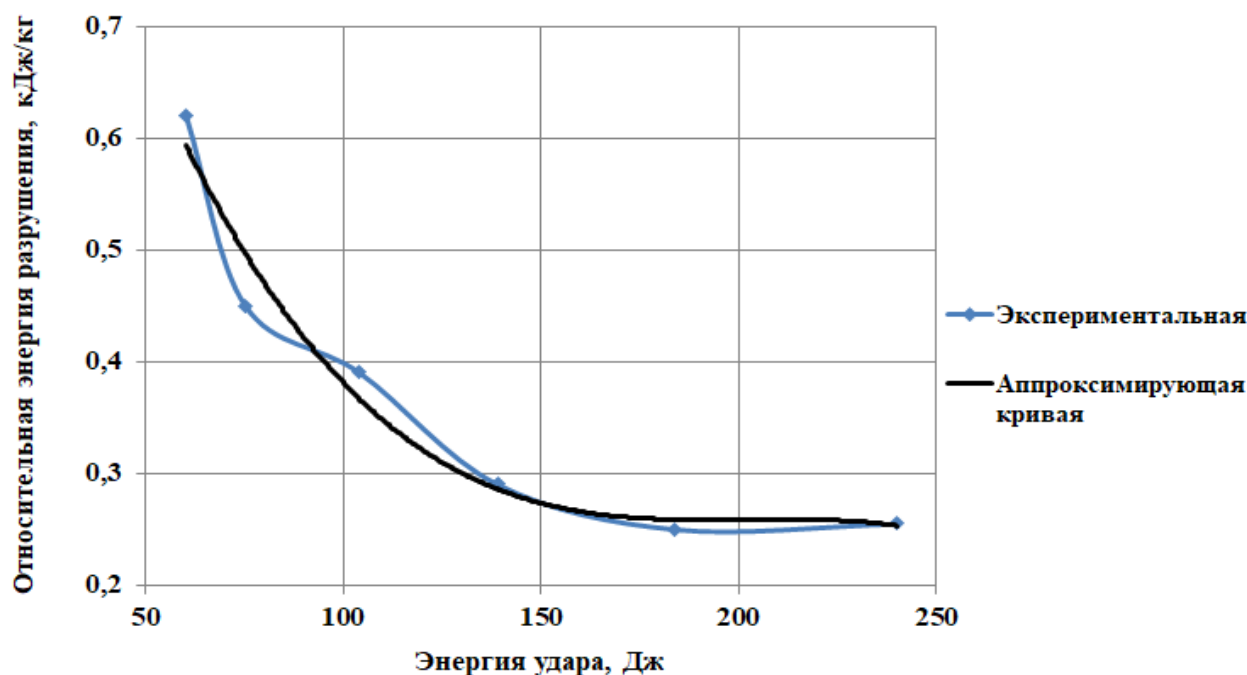


Рис. 3. Зависимость относительной энергии разрушения от энергии единичного удара

После статистической обработки результатов эксперимента получено уравнение регрессии, связывающее относительную энергию разрушения (E_{op} , кДж/кг) с энергией единичного удара:

$$E_{op} = -1e^{-7} E_y^3 + 7e^{-5} E_y^2 - 0,0146 E_y + 1,234, \quad (2)$$

где E_y – энергия удара, Дж.

Относительно большая величина корреляционного отношения ($R^2 = 0,97$) свидетельствует о наличии взаимосвязи энергии единичного удара и относительной энергии разрушения. Регрессионное уравнение адекватно отражает реальный процесс при изменении энергии удара от 50 до 250 Дж.

На рис. 4 приведен график зависимости энергии удара от средне-взвешенного диаметра куска электрообработанной руды.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$E_y = 3,6d - 39,2, \quad (3)$$

где d - средневзвешенный диаметр куска сульфидной руды, мм.

Величина корреляционного отношения ($R^2 = 0,98$) свидетельствует о наличии взаимосвязи энергии единичного удара и средневзвешенного диаметра куска. Регрессионное уравнение адекватно при изменении крупности кусков от 20 до 80 мм.

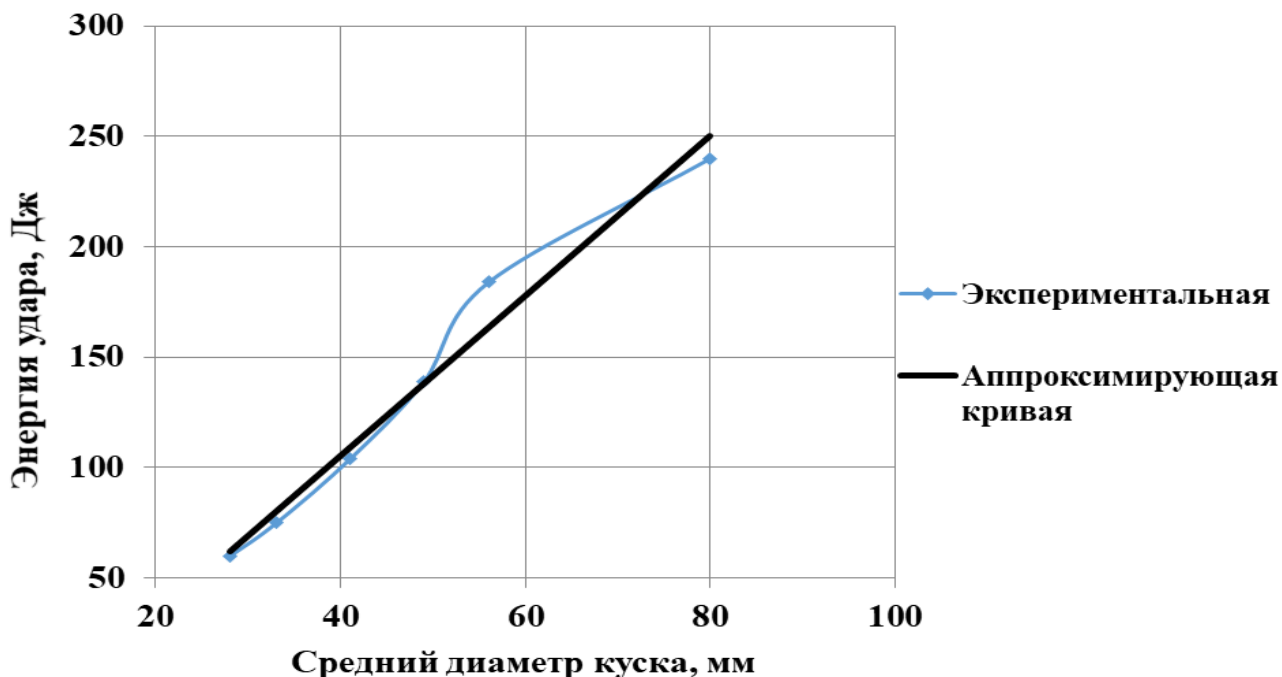


Рис. 4. Зависимость энергии удара от средневзвешенного диаметра куска

Этим доказывается второе научное положение.

3. Сепаратор, использующий в качестве основного признака разделения тепловой пробой бедной сульфидной руды, позволяет снизить суммарные затраты энергии на дробление – измельчение.

Важным показателем при подготовке горной массы к измельчению является её гранулометрический состав. Для эксперимента была подготовлена проба руды крупностью – 80 + 20 мм, а затем проведена электрообработка. Вся масса разделилась на две части: пробитую – масса 5,2 кг; непробитую – масса 6,6 кг. Затем обе пробы были раздроблены при постоянной энергии удара. В табл. 6 приведены гранулометрические составы проб бедной сульфидной руды до и после дробления.

Размер кусков забалансовой руды является случайной величиной. В результате статистической обработки установлено, что распределение кусков забалансовой руды в классе – 80 + 20 мм можно описать законом Вейбулла с параметрами $a = 1,74$, $b = 3,2$. Степень соответствия данного распределения закону Вейбулла производилась по критерию χ^2 . С надежностью 0,95 это

распределение соответствует данному закону.

Таблица 6

Гранулометрический состав забалансовой медно-цинковой руды до и после дробления (единичный удар)

№ п.п.	Класс, мм	Содержание класса до дробления, %	Содержание класса после дробления, %	Содержание класса до дробления, %	Содержание класса после дробления, %
		Электрообработанная		Необработанная	
1	- 10	0	23,8	0	16,2
2	+ 10 - 20	0	42,3	0	22,6
3	+ 20 - 30	6,0	26,0	7,0	42,9
4	+ 30 - 40	34,1	7,9	33,6	18,3
5	+ 40 - 50	44,0	0	43,0	0
6	+ 50 - 60	12,0	0	13,0	0
7	+ 60 - 70	3,2	0	2,7	0
8	+ 70 - 80	0,7	0	0,7	0

После дробления руды закон распределения размеров кусков руды изменяется, появляются мелкие классы и существенно уменьшается класс +20 мм.

Статистическая обработка результатов экспериментов показала, что распределение размеров кусков забалансовой руды после дробления можно описать законом Рэля с параметром $a = 13,4$. Степень соответствия данного распределения закону Рэля производилась по критерию χ^2 . Установлено, что с надежностью 0,95 это распределение соответствует данному закону.

Установлено, что степень дробления электрообработанной руды составила 3,75, а не обработанной – 2,94. Удельная энергия разрушения электрообработанной руды составила 1,67 кДж/кг, а необработанной – 2,21 кДж/кг, т. е. больше в 1,33 раза. Это можно объяснить тем, что при электрическом пробое куска между токопроводящими вкраплениями возникают существенные растягивающие напряжения и появляются трещины, т. е. происходит вскрытие зерен сульфидов. В дальнейшем при измельчении вскрытие зерен сульфидов позволит увеличить их выход. Результаты, приведенные в табл. 7, показывают, что импульсная электрообработка увеличивает содержание класса крупностью –10 мм на 7,6 % и уменьшает выход крупного класса + 20 мм на 27,3 %. В результате экспериментов было установлено, что куски горной породы, не пробиваемые током, практически не содержат сульфидов. Их количество составило 56 % от общей массы пробы. При переработке бедной руды эти куски могут быть отброшены в хвосты. Сокращение объемов горной массы в 2,38 раза и уменьшение относительной энергии разрушения в 1,33 раза приведёт к соответствующему уменьшению непроизводительных затрат энергии на дробление.

В дальнейшем «пробитая» руда разрушалась ударом и измельчалась в двухкамерной шаровой мельнице. В табл. 7 приведены результаты фракционного состава забалансовой руды до и после измельчения.

Степень измельчения (i) в шаровой мельнице за 20 минут работы в водопадном режиме определялась по известной формуле. Она составила: а) для «пробитой» руды $i = 1,95$; б) для необработанной руды $i = 1,25$. Таким образом, за 20 минут работы мельницы электрообработка практически в 1,5 раза увеличивает степень измельчения забалансовой руды.

Таблица 7.

Гранулометрический состав забалансовой медно-цинковой руды
до и после измельчения

№ п.п.	Класс, мм	Содержание класса до измельчения, %	Содержание класса после измельчения, %	Содержание класса до измельчения, %	Содержание класса после измельчения, %
1		Электрообработанная		Необработанная	
2	+ 20	14,9	8,0	31,0	22,7
3	- 20 + 10	33,6	20,8	35,2	24,6
4	- 10 + 5	21,5	8,5	6,3	8,3
5	- 5 + 2	11,9	2,2	8,0	2,8
6	- 2 + 1	5,6	0,9	3,8	1,1
7	- 1 + 0,5	4,7	1,0	2,5	1,4
8	- 0,5 + 0,25	3,6	2,2	1,2	2,5
9	-0,25 + 0,15	0,9	6,5	0,5	6,3
10	- 0,15	3,3	49,9	1,5	31,5

Данные табл. 7 показывают, что импульсная электрообработка горной массы приводит к существенному возрастанию после измельчения выхода мелких классов, в которых, как правило, находятся сульфиды. В частности, выход класса $- 0,15$ мм возрос на 18,4 %, а выход класса $+ 5$ мм сократился на 28,3 %. Таким образом, эти результаты свидетельствуют о существенном (как минимум на 18...20 %) снижении энергозатрат при измельчении электрообработанной забалансовой руды.

При заданной производительности мельницы увеличение выхода готового класса на 18 % эквивалентно снижению времени измельчения.

Для выявления связи содержания сульфидов с напряжением пробоя были подготовлены соответствующие образцы. Эксперименты проводились с образцами цилиндрической формы диаметром 16 мм и различной длины. Для обеспечения равномерности распределения сульфидов по образцу пустая порода и халькопирит измельчались до крупности $- 0,5$ мм. Затем смесь в определенных пропорциях смешивалась, помещалась в нетокопроводящий цилиндр и прессовалась до плотности ($\rho = 2600...2900$ кг/м³), близкой к плотности забалансовой руды в естественном состоянии ($\rho = 2680$ кг/м³).

При проведении эксперимента фиксировались напряжение и ток при пробое, а также размеры образца. На рис. 5 приведена зависимость удельного напряжения пробоя от содержания сульфидов.

В результате статистической обработки получена зависимость удельного напряжения пробоя (U_y , кВ/см) от содержания сульфидов (α , г/г) в куске

забалансовой руды.

$$U_y = 29,9 \exp(-13,4 \sqrt{\alpha}). \quad (4)$$

Уравнение (4) адекватно ($R^2 = 0,99$) отражает свойства горной породы при изменении содержания сульфидов в пределах от 0,1 до 0,4 г/г, что включает весь диапазон содержания сульфидов в забалансовых рудах.

Уравнение (4) позволяет определить величину напряжения, необходимого для пробы кусков забалансовой руды с различным содержанием сульфидов в классе - 80 + 20 мм.

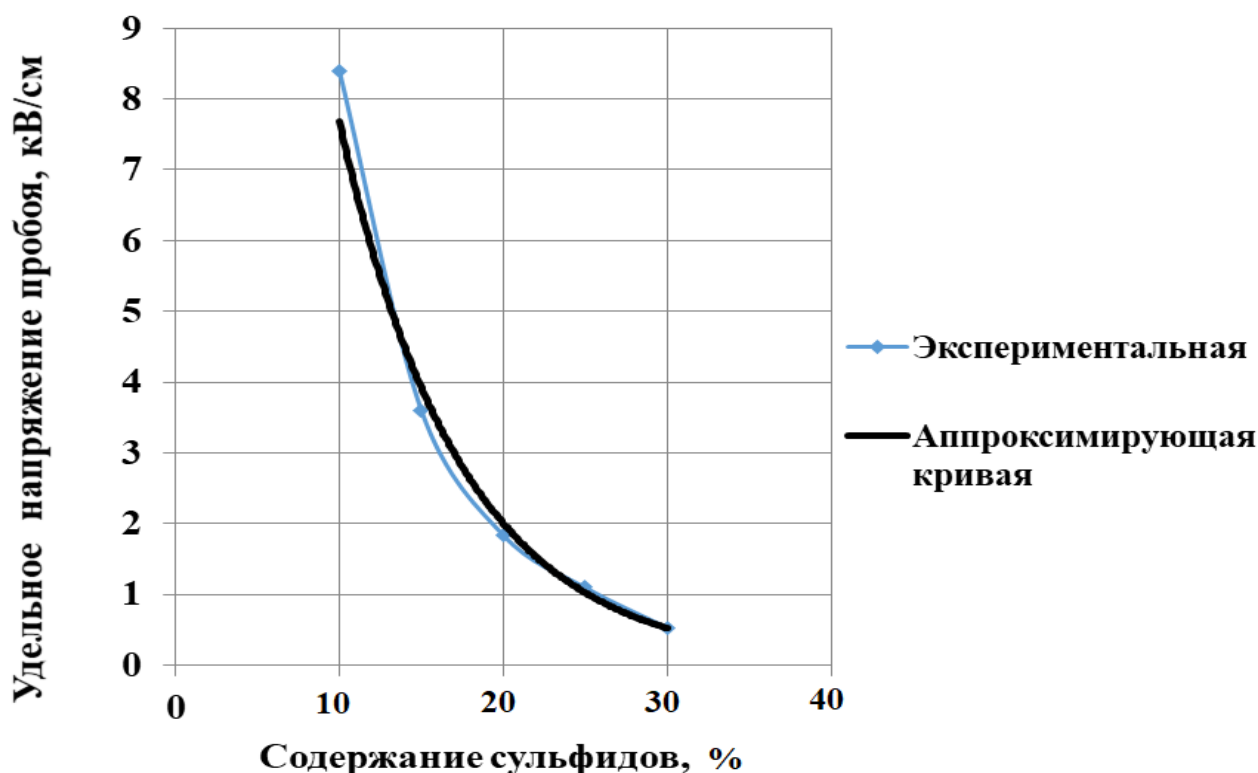


Рис. 5. Зависимость удельного напряжения пробы от содержания сульфидов

При содержании сульфидов в куске меньше 1 г/г напряжение пробы увеличивалось в несколько раз. Пустая порода не «пробивалась» при напряжении 200 кВ/см. Таким образом, эксперименты доказали возможность эффективного выделения в отвал пустой породы и разрушения сульфидных кусков для дальнейшего перерабатывания.

Важнейшими показателями, определяющими параметры оборудования, является плотность горной массы, её гранулометрический состав и содержание сульфидов. Установлено, что они являются случайными величинами.

Алгоритм рабочего процесса сепаратора имеет вид:

1. Ввод исходных данных.

1. Минимальный d_{\min} и максимальный d_{\max} размер куска, мм. Параметры закона распределения a и b размеров кусков. 2. Максимальное α_{\max} и допустимое $[\alpha]$ (граничное) содержание сульфидов. 3. Максимальная ρ_{\max} и минимальная ρ_{\min} плотность горной массы. 4. По максимальному размеру куска и граничному содержанию сульфидов находится напряжение на электродах (U , кВ):

$$U = U_y = 29,4 \exp(-13,4 [\alpha]) \cdot d_{\max}/10. \quad (5)$$

2. Определение размеров куска и его плотности.

По известным параметрам a и b закона распределения находится эквивалентный диаметр куска (d_i)

$$d_i = d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min}) \cdot X/3, \quad (6)$$

где $X = (-a \cdot \text{Log}(\text{Rnd}))^{1/b}$ – случайное распределенное по закону Вейбулла число с параметрами a и b ; Rnd – случайное равномерно распределенное в интервале $0 \dots 1$ число.

Определяется плотность куска

$$\rho_i = \rho_{\min} + (\rho_{\max} - \rho_{\min}) \cdot \text{Rnd}. \quad (7)$$

3. Идентификация куска с содержанием сульфидов больше граничного.

Определяется содержание сульфидов в куске:

$$\alpha_i = \alpha_{\max} \cdot \text{Rnd}. \quad (8)$$

Если содержание сульфидов в куске меньше граничного, то проба породы не будет и кусок направляется в хвосты.

Если содержание сульфидов в куске больше граничного, то происходит пробой породы и кусок направляется на дробление ударом.

4. Определение массы пустой породы, руды и сульфидов.

Масса кусков пустой породы и руды находится из формулы

$$m_i = \rho_i \cdot d_i^3. \quad (9)$$

Масса сульфидов находится из формулы

$$m_{\text{ин}} = \rho_i \cdot d_i^3 \cdot \alpha_i. \quad (10)$$

По уравнению (2) определяется энергия удара, а затем она суммируется и находится удельный расход энергии:

$$E_{\text{уд}} = \sum E_y / \sum m_{\text{ин}}. \quad (11)$$

На рис. 6 приведены расчетные по имитационной модели зависимости выхода «хвостов» от допустимого содержания сульфидов ($[\alpha]$) при различной величине их максимального содержания (α_{\max}).

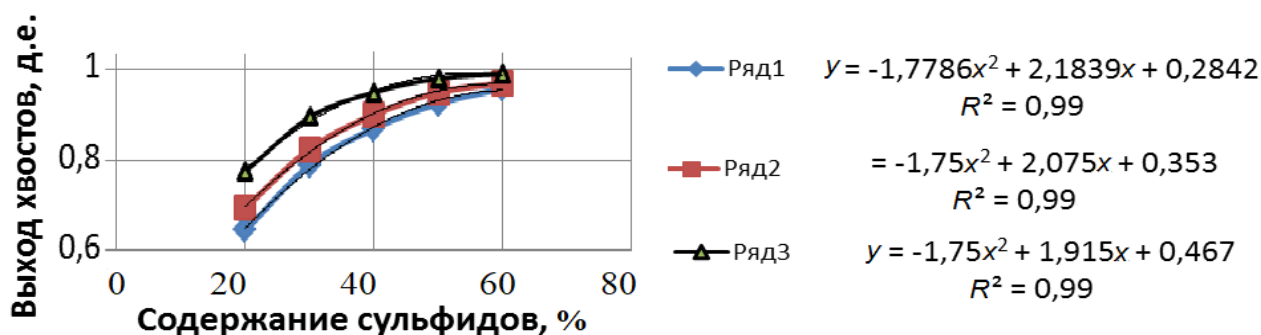


Рис. 6. Зависимость выхода хвостов от допустимого содержания сульфидов:

ряд 1 - $\alpha_{\max} = 87$ %; ряд 2 - $\alpha_{\max} = 77$ %; ряд 3 - $\alpha_{\max} = 60$ %

Из рис. 6 видно, что с увеличением α_{\max} и $[\alpha]$ возрастает выход хвостов. В забалансовой руде с промышленным содержанием сульфидов до 86 % допустимое (граничное) содержание целесообразно принимать не меньше 30 %. При этом в хвосты будет уходить 80... 90 % общей массы забалансовой руды, что практически пропорционально сократит затраты на её дальнейшую переработку. Относительно

большие корреляционные отношения выхода хвостов указывают на наличие их существенной связи с допустимым содержанием сульфидов.

На основании исследований установлено, что удельная проводимость позволяет разработать сепаратор для бедных сульфидных руд с одновременным разупрочнением кусков, содержащих полезные компоненты, что в дальнейшем уменьшит энергоемкость дробления-измельчения (рис. 7).

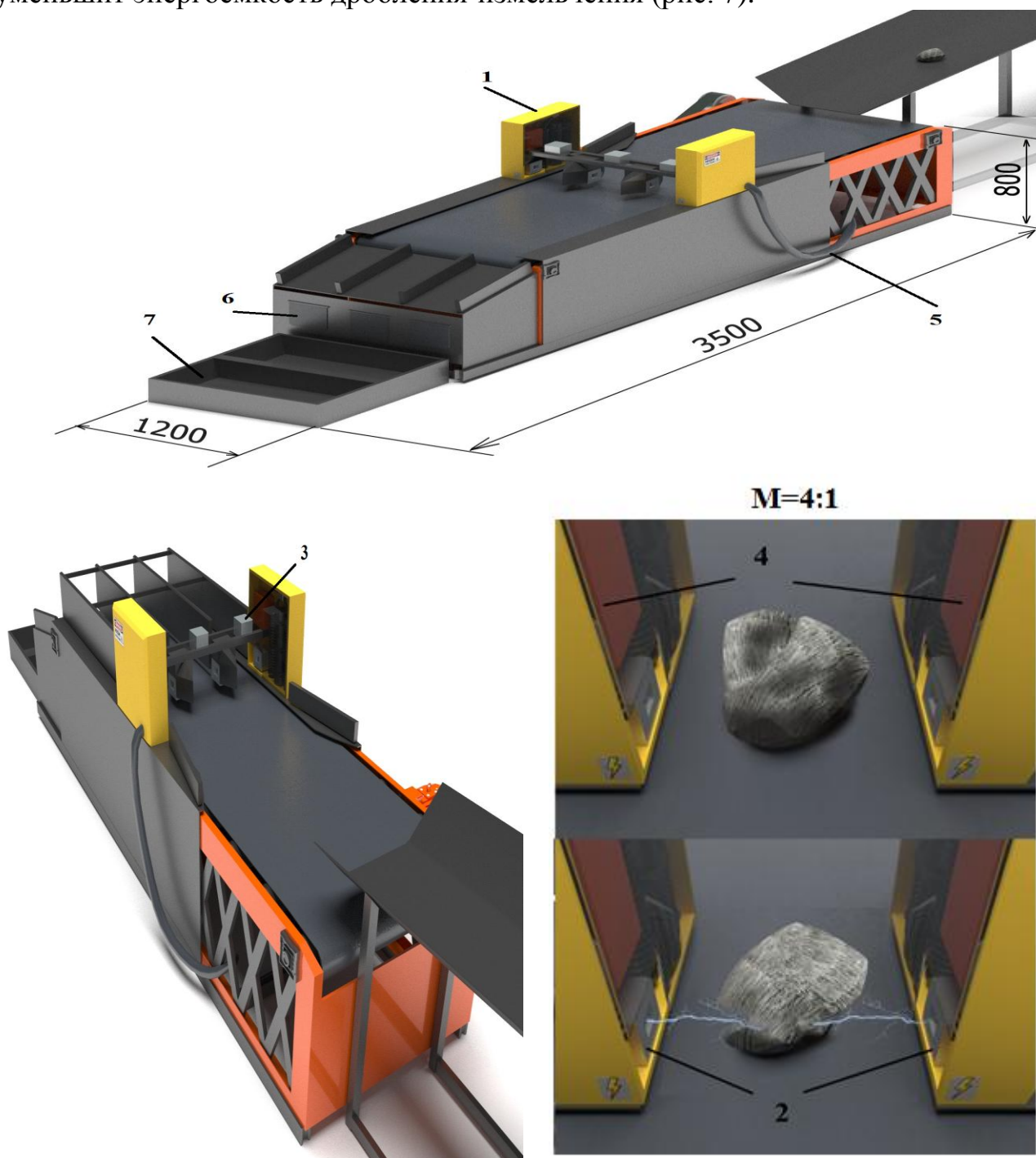


Рис. 7. Разработанный электроиндукционный сепаратор для бедных сульфидных руд с одновременным разупрочнением кусков, содержащих полезные компоненты:
 1 - электроиндукционная камера; 2 - электроды; 3 - фотоэлементы; 4 - источник питания фотоэлементов; 5 - высоковольтный источник питания; 6 - исполнительный механизм; 7 - приемники продуктов разделения, 8 - генератор импульсов.

Этим доказывается третье научное положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена научно-техническая проблема разработки оборудования для разделения бедных сульфидных пород, имеющая важное хозяйственное значение. Основные выводы работы заключаются в следующем:

1. Разработана методика определения конструктивных, режимных и энергетических параметров сепаратора для разделения и разрушения бедных сульфидных руд. Согласно расчетам по данной методике получены следующие конструктивные и режимные параметры машины:

- диаметр якоря ударника 80 мм, масса более 3,5 кг;
- минимальная площадь теплоотдачи корпуса ударника 0,33 м²;
- количество ручьев при производительности 12 т/ч равно 3;
- ширина ленты трех ручьевого раскладчика при максимальном размере куска 80 мм равна 250 мм;
- максимальная скорость подачи материала в электродную камеру не более 0,38 м/с;
- время протекания тока при пробое куска с эквивалентным размером 80 мм 0,21с;

энергетические параметры сепаратора:

- величина напряжения пробоя в устройстве идентификации и разупрочнения сепаратора должна быть 8...9 кВ, что обеспечит надежное выделение класса – 80 + 20 мм;
- энергия удара электромагнитного механизма сепаратора должна быть не меньше 350 Дж;
- удельный расход энергии на разделение руды 9,78 кВт·ч/т.

2. Установлено, что режимные параметры (скорость движения кусков в питателе сепаратора, напряжение и ток пробоя) определяются электрической проводимостью кусков, которая нелинейно возрастает с увеличением содержания сульфидов.

3. Энергетический параметр (величина относительной энергии разрушения после пробоя куска при дальнейшем дроблении) уменьшается по сравнению с не пробитыми кусками в 1,3 раза и, соответственно, снижаются непроизводительные затраты энергии.

4. Эффективность работы электромагнитного ударного механизма для дробления кусков сульфидной руды следует производить по отношению энергии разрушения к массе и степени дробления. Она уменьшается в 2,3 раза с увеличением среднего диаметра куска от 28 до 80 мм.

5. Установлено, что электрический пробой кусков бедной сульфидной руды приводит к сокращению объемов дробления исходной горной массы в 4...5 раз и обеспечивает при дальнейшем измельчении повышение выхода готового продукта на 18 %.

6. При имитационном моделировании рабочего процесса сепаратора для предварительного разделения бедной сульфидной руды необходимо учитывать

случайный характер содержания полезного компонента и гранулометрический состав исходного материала.

7. Основные результаты работы и практические рекомендации использованы при разработке электроиндукционного сепаратора для разделения сульфидных руд. Экономический эффект от его использования, включенного в технологический регламент на переработку вскрышных пород Бакр Тау в качестве основного технологического аппарата для предварительного разделения забалансовых сульфидных руд, составит 3951,4 тысяч рублей в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах по группе научных специальностей 05.05.00 – «Транспортное, горное и строительное машиностроение»:

1. Энергоемкость ударного разрушения бедных медно-цинковых руд / А. И. Афанасьев, Д. С. Стожков, В. Я. Потапов, В. В. Потапов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 10. С. 25-29.

2. Основные факторы, определяющие параметры оборудования для сортировки бедных сульфидных руд / А. И. Афанасьев, Д. С. Стожков, В. Я. Потапов, В. В. Потапов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 10. С. 30-35.

3. Обоснование информативности признаков для подготовки медно-цинковых руд к разделению / В. Я. Потапов, А. И. Афанасьев, В. В. Потапов, Д. С. Стожков, В. А. Троп // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. № 5. (специальный выпуск 9). - С. 55-63.

В рецензируемых научных журналах:

4. Разделение сульфидных руд индукционным радиорезонансным методом / В. Я. Потапов, А. И. Афанасьев, В. В. Потапов, Д. С. Стожков // Вестник Забайкальского государственного университета. 2018. Т. 24, № 4. С. 43 – 57.

Работы, опубликованные в других изданиях:

5. Эффективность процесса разделения забалансовых медно-цинковых руд / А. И. Афанасьев, В. Я. Потапов, В. В. Потапов, Д. С. Стожков // Информационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья: Материалы научно-технической конференции. Екатеринбург, 2017. С. 70 – 72.

6. Электротермическая сортировка забалансовых сульфидных руд / А. И. Афанасьев, В. Я. Потапов, В. В. Потапов, Д. С. Стожков // Информационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья: Материалы научно-технической конференции. Екатеринбург, 2017. С. 72 – 74.

7. Потапов В. Я., Афанасьев А. И., Стожков Д. С. Исследование контрастности бедных и забалансовых руд для их разделения. Материалы XVI Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2018. С. 348 – 349.

8. Использование индукционного радиорезонансного метода для разделения сульфидных руд / В. Я. Потапов, В. В. Потапов, Д. С. Стожков, В. Е. Вакулин // Материалы XVI Международной научно-технической конференции Чтения памяти В. Р. Кубачека. Екатеринбург, 2018. С. 152 – 156.

9. Оценка информативности признаков для подготовки сульфидных руд к разделению / В. Я. Потапов, Е. Ф. Цыпин, В. В. Потапов, Д. С. Стожков, В. А. Троп // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: Материалы XXIII международной научно-технической конференции. Екатеринбург, 2018. С. 439 – 443.

10. Свойства сульфидных руд и выбор признака разделения / В. Я. Потапов, А. И. Афанасьев, Д. С. Стожков, А. А. Захарова // Материалы XVII Уральской горнопромышленной декады. Екатеринбург, 2019. С. 212 – 213.

Патент:

11. Воздушный сепаратор: пат. 179269 Рос. Федерация; МПК В07В 4/00/ В. Я. Потапов, В. В. Потапов, Д. Д. Степаненко, Е. В. Шестаков, Н. В. Макаров, П. А. Костюк, А. И. Афанасьев, Д. С. Стожков. №2017125560; заявл. 17.07.2017; опубл. 07.05.2018. Бюл. № 13.

Подписано в печать _____.

Бумага офсетная. Формат 60×84 1/16. Гарнитура Times New Roman.

Печать на ризографе. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Отпечатано в лаборатории множительной техники издательства УГГУ

620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30.

Уральский государственный горный университет.