

Выводы

1. Предложена методика расчета параметров рельсотронов при синусоидальном токе, позволяющая оценивать возможности рельсотронов при неравномерной плотности тока.
2. Фактором, определяющим возможности рельсотронов для ускорения тел при синусоидальном токе, является существенное повышение

температуры поверхностного слоя шин, что может привести к их расплавлению и однократному использованию рельсотрона.

3. Достоверность полученных формул подтверждается удовлетворительным совпадением с результатами расчета индуктивности и сопротивления, полученными при помощи компьютерного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория электрических аппаратов / под ред. проф. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985. – 312 с.
2. Носов Г.В. Определение параметров рельсотронов. Ч. 1. Расчет при постоянной плотности тока // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 65–69.
3. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля. Справочное пособие. – М.: Высшая школа, 1989. – 271 с.
4. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
5. Методы и средства автоматизации профессиональной деятельности. Ч. 1 / под общей ред. канд. техн. наук А.С. Глазырина. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 199 с.

Поступила 11.01.2013 г.

УДК 621.374

СТАДИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В.И. Курец

Томский политехнический университет
E-mail: kuretz@tpu.ru

Предложена методика определения размеров калибровочных отверстий в заземленных электродах на промежуточных стадиях электроимпульсного измельчения сырья. Показано, что использование стадиального разрушения существенно уменьшает удельные затраты энергии.

Ключевые слова:

Электроимпульсное измельчение, стадиальность, энергозатраты.

Key words:

Electric pulse crushing, stage, energy expenditure.

Одним из наиболее эффективных методов селективной дезинтеграции твердых неоднородных тел, включая горнорудное сырье, искусственные материалы и т. д., является электроимпульсный способ, использующий в качестве инструмента воздействия энергию электрической импульсной искры, сформированной в толще твердого тела [1].

Такой способ разрушения сырья позволяет обеспечивать растягивающие и сдвиговые нагрузки в материале, селективность дезинтеграции как по крупности, так и по неоднородностям в материале, отсутствие существенного заражения готового продукта аппаратурным металлом и т. д. [1]. Эти преимущества электроимпульсного способа обеспечивают его конкурентоспособность по сравнению с традиционными механическими способами разрушения. Однако этот способ имеет существенные недостатки, связанные с принципами его реализации. Электроимпульсные установки, как правило, состоят из генератора высоковольтных импульсов или нескольких генераторов, рабочей

камеры, имеющей высоковольтные электроды и заземленный электрод-классификатор, калибровочные отверстия в котором соответствуют максимальному размеру крупности готового продукта. Сырье загружается в камеру на электрод-классификатор, на высоковольтные электроды подаются высоковольтные импульсы, которые формируют электрический разряд в толще каждого куска сырья, разрушая его.

Таким образом, каждый акт воздействия имеет локальный характер в отличие от работы традиционных механических аппаратов, где в процесс разрушения вовлекается практически весь материал за один оборот в мельницах или дробилках. Поэтому по производительности разрушения электроимпульсный способ значительно уступает традиционным механическим способам. Кроме того, при электроимпульсном разрушении постоянно изменяется гранулометрический состав исходного сырья. При этом осколки материала, последовательно уменьшая свой размер в процессе разруше-

ния, неоднократно попадают в рабочую зону, пока не достигнут размеров меньших, чем размеры отверстий в электроде-классификаторе. Параметры источника импульсов при этом остаются постоянными, что приводит к излишним потерям энергии за счет переизмельчения материала. Таким образом, электроимпульсный способ разрушения не позволяет достигнуть энергоемкости, характерной для традиционных механических аппаратов. Снижение энергоемкости электроимпульсного разрушения возможно, если на каждый узкий класс крупности подавать импульсы с различными параметрами, обеспечивающими оптимальные показатели разрушения.

Рассмотренный выше процесс электроимпульсного разрушения соответствует разрушению сырья в одну стадию, который достаточно хорошо изучен [2] и позволяет оценить средневероятный размер осколков по известным параметрам импульса и свойствам сырья.

В практике измельчения стадийные процессы следует использовать там, где требования к готовому продукту по выходу отдельных классов крупности достаточно жесткие (например, периклаз, кварцевое сырье, различные абразивные материалы и т. д.), где требуется выделить из разрушаемой руды кристаллы различной крупности без существенных повреждений (ограниченное кристаллосырье, легкошлакующиеся руды и т. д.), или где остро стоит вопрос о снижении энергоемкости разрушения. Введение промежуточной стадии дробления позволяет увеличить эффективность процесса за счет разрушения более «узких» классов крупности при использовании оптимальных параметров импульса в каждой стадии. В данной работе предложена методика оценки выбора стадий.

В процессе разрушения состояние системы может характеризоваться средневероятным размером куска в любой момент времени. Расчет средневероятного осколка при электрическом пробое твердого материала представлен в [2]. В качестве энергетического критерия разрушения используется критическая скорость аналогично критерию разрушения при кратковременных ударных нагрузках (например, при взрыве химических веществ) [3]:

$$V_{кр} = \frac{\sigma_p}{\sqrt{\rho E}},$$

где σ_p – прочность материала на растяжение, ρ – плотность материала, E – модуль Юнга.

Пусть исходный средневероятный размер куска \bar{a}_0 , конечный \bar{a}_2 , промежуточный \bar{a}_1 . Если принять, что индуктивность контура и электрофизические свойства канала разряда постоянны, а варьируется только энергия импульса (за счет амплитуды напряжения и разрядной емкости генератора) и прочностные свойства осколков, то связь между средневероятными размерами осколков при двухстадийном и одностадийном разрушении может быть описана выражениями, представленными в табл. 1, где W_0 – энергия единичного импульса

при разрушении материала в одну стадию, W_1 – энергия единичного импульса на первой стадии разрушения, W_2 – энергия единичного импульса на второй стадии разрушения.

Таблица 1. Расчетные выражения для оценки размеров средневероятных осколков на основе энергетического критерия и энергии единичного импульса на каждой стадии разрушения сырья

Номер стадии	Класс крупности	Энергия импульса на стадиях	Расчетные формулы для средневероятного осколка по стадиям	Примечание
I	$\bar{a}_0 \dots \bar{a}_1$	W_1	$\bar{a}_1 = \frac{kV_{кр0}\bar{a}_0^3}{\sqrt{W_1}}$	\bar{a}_0 – средний размер куска исходного материала
II	$\bar{a}_1 \dots \bar{a}_2$	W_2	$\bar{a}_2 = \frac{kV_{кр1}\bar{a}_1^3}{\sqrt{W_2}}$	$V_{кр0}$ – критическая скорость для исходной крупности
–	$\bar{a}_0 \dots \bar{a}_2$	W_0	$\bar{a}_2 = \frac{kV_{кр0}\bar{a}_0^3}{\sqrt{W_0}}$	$V_{кр1}$ – критическая скорость для промежуточной крупности

Рассматривая двухстадийный процесс, можно отметить, что во второй стадии разрушения число осколков по сравнению с исходным продуктом возрастает до N и энергия, необходимая для их разрушения, будет равна NW_2 . Запишем разность энергий, необходимых для разрушения исходного продукта до конечного, в одну стадию и в две стадии:

$$\Delta W = W_0 - (W_1 + NW_2). \quad (1)$$

Чем выше величина ΔW , тем целесообразнее переходить от одностадийного к двухстадийному дроблению, т. е. необходимо стремиться к $\Delta W \rightarrow \max$. Число осколков, образовавшихся после разрушения на промежуточной стадии, можно считать как:

$$N = \frac{\bar{a}_0^3}{\bar{a}_1^3}, \quad (2)$$

тогда выражение (1) с учетом (2) запишется:

$$\Delta W = \frac{k^2 V_{кр0}^2 \bar{a}_0^6}{\bar{a}_2^2} - \left(\frac{k^2 V_{кр0}^2 \bar{a}_0^6}{\bar{a}_1^2} + \frac{\bar{a}_0^3 k^2 V_{кр1}^2 \bar{a}_1^6}{\bar{a}_1^3 \bar{a}_2^2} \right). \quad (3)$$

Экспериментальные исследования и теоретические расчеты вероятности внедрения канала разряда в твердое тело при электроимпульсном дроблении показали, что существуют оптимальные соотношения амплитуды приложенного напряжения, крутизны фронта импульса, крупности разрушаемого материала, при которых величина вероятности внедрения достаточно высока и, соответственно, процесс разрушения наиболее эффективен [2].

Как правило, электроимпульсное дробление и измельчение осуществляется в технической воде, удельное сопротивление которой колеблется в ши-

роких пределах. Увеличение проводимости среды, в которой происходит разрушение, приводит к деформации импульса как по амплитуде, так и по крутизне [4]. Поэтому при выборе амплитуды импульса следует ее увеличить на величину его деформации, если добиваться постоянства внедрения канала разряда в твердое тело.

Таким образом, требуемую амплитуду импульса следует рассчитывать из выражения:

$$U_{\Gamma} = U_{\text{пр}} K, \quad (4)$$

где $U_{\text{пр}}$ – электрическая 50 % прочность материала; K – коэффициент снижения напряжения.

Определим максимума функции $\Delta W = f(\bar{a}_1)$:

$$\frac{d(\Delta W)}{d\bar{a}_1} = \frac{2V_{\text{кр}0}^2 \bar{a}_0^6}{\bar{a}_1^3} - \frac{3\bar{a}_0^3 \bar{a}_1^2 V_{\text{кр}1}^2}{\bar{a}_2^2} = 0. \quad (5)$$

Решая уравнение (5) относительно \bar{a}_1 , размер которого будет соответствовать размеру отверстий промежуточной стадии при условии минимальных затрат энергии, получим:

$$\bar{a}_1 = \sqrt[3]{\frac{2 V_{\text{кр}0}^2 \bar{a}_0^3 \bar{a}_2^2}{3 V_{\text{кр}1}^2}}. \quad (6)$$

Прочностные характеристики продукта, прошедшего первую стадию разрушения, значительно ниже, чем в исходном сырье, т. е.

$$V_{\text{кр}0} \gg V_{\text{кр}1}.$$

Это связано с наличием нераскрытых трещин в продуктах, прошедших первую стадию разрушения.

Анализируя выражение (6), можно отметить, что увеличение исходной крупности продукта, а также уменьшение его прочностных свойств во второй стадии разрушения, позволяет увеличить размер отверстий электрода-классификатора в промежуточной стадии разрушения, что приведет к уменьшению энергоёмкости и увеличению производительности процесса на второй стадии разрушения.

Рассмотренный подход может быть распространен на многостадийный процесс электроимпульсного разрушения.

Таким образом, следует ожидать уменьшения энергоёмкости процесса при разрушении материала в стадийных схемах. Использование стадийного процесса разрушения позволяет также проводить промежуточное обогащение продуктов, что чрезвычайно важно для сохранности камнецветного сырья (алмазы, гранаты, рубины и т. д.) или для легко шламующихся руд (касситериты, вольфрамиты т. д.), а также для сырья, при переработке которого требуется получать узкие классы крупности (периклаз, кварцевое сырье, керамика и т. д.).

Экспериментальная проверка эффективности стадийного дробления проводилась на электроимпульсной установке ДИК-1М [2], позволяющей варьировать параметры высоковольтного импульса: амплитуду до 250 кВ, энергию единичного им-

пульса до 800 Дж. Частота посылок импульсов составляла 6 имп/с. Рабочая камера установки имела сменные электроды-классификаторы с отверстиями диаметром 10; 5; 3; 1 мм. В качестве испытываемого сырья использовались: кварцевое стекло, кварцевая керамика, руда Шерловгорского месторождения. Кварцевое стекло (исходная крупность 60 мм) измельчалось в две стадии: до –10 мм и затем до –5 мм, а контрольный опыт – измельчение в одну стадию – от 60 до –5 мм. Этот же материал (исходная крупность 5 мм) измельчался также в две стадии: до –3 мм и затем до –1 мм. Контрольный опыт – измельчение в одну стадию – от 5 до –1 мм. Кварцевая керамика (исходная крупность 5 мм) измельчалась в две стадии: до –3 мм и затем до –1 мм. Контрольный опыт – измельчение в одну стадию – от 5 до –1 мм. Шерловгорская руда (исходная крупность 30 мм) измельчалась в две стадии: до –5 мм и затем до –2 мм. Контрольный опыт – измельчение в одну стадию – от 30 до –2 мм. В каждом опыте оценивалась энергоёмкость разрушения. При стадийном разрушении общая энергоёмкость оценивалась как сумма энергоёмкостей на каждой стадии.

В табл. 2 представлены сравнительные результаты разрушения материалов по различным стадийным схемам.

Таблица 2. Сравнительные результаты по затратам энергии при разрушении сырья в одну и несколько стадий

Наименование материала	Размер промежуточной стадии		Энергоёмкость на промежуточной стадии	Конечная крупность	Энергоёмкость на конечной стадии	Общая энергоёмкость от исходной до конечной крупности	
	Исходная крупность	Эксперимент					
	мм	Расчет					
Кварцевое стекло	60	10	10,24	5,76	–5	11,7	17,46
	60	–	–	–	–5	35,5	35,5
	5	3	2,34	14,0	–1	29,4	43,4
	5	–	–	–	–1	68,6	68,6
Кварцевая керамика	5	3	2,34	23,6	–1	45,6	68,9
	5	–	–	–	–1	85,2	85,2
Шерловгорская руда	30	12	14,1	2,85	–	–	–
	–	5	5,4	4,78	–2	9,85	17,48
	30	–	–	–	–2	10,9	20,9

Размер отверстий в промежуточных стадиях рассчитывался по методике, представленной выше.

Как видно из приведенных результатов, использование стадийных схем разрушения существенно снижает удельные энергозатраты на разрушение сырья. Так, измельчение кварцевого стекла в две стадии позволяет уменьшить удельные затраты энергии на 18,4 кВт·ч/т при дроблении от 60 до –5 мм по сравнению с дроблением в одну стадию и на 25 кВт·ч/т при измельчении от 5 до –1 мм. Для

кварцевой керамики использование двух стадий измельчения от 5 до –1 мм позволяет уменьшить удельные затраты энергии на 16,3 кВт·ч/т по сравнению с одностадийным измельчением.

Измельчение руд Шерловогорского месторождения в две стадии позволяет уменьшить удельные затраты энергии на 3,42 кВт·ч/т. Следует отметить хорошее совпадение расчетных данных по определению размера отверстий электрода-классификатора на промежуточной стадии с результатами разрушения сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – Л.: Наука, 1988. – 277 с.
2. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с.

Выводы

1. Разрушение сырья электроимпульсным способом в несколько стадий при использовании оптимальных энергий единичного импульса позволяет существенно уменьшить энергопотребление по сравнению с одностадийным дроблением.
2. Предложенная методика может быть рекомендована для определения как количества стадий, так и крупности разрушения на них.
3. Власов О.Е., Смирнов С.А. Основы расчета дробления горных пород взрывом. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 140 с.
4. Жекул В.Г., Раковский Г.Е. К теории формирования электрического разряда в проводящей жидкости // Журнал технической физики. – 1983. – № 53. – Вып. 1. – С. 8–14.

Поступила 12.02.2013 г.

УДК 621.311

КОМПЛЕКСНОЕ ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЛОЖНЫХ СЕТЯХ

Г.В. Рогов

Филиал ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергосистемы» – СибНИИЭ, г. Новосибирск
E-mail: grigoriyrogov@mail.ru

Рассмотрены способы повышения качества электроэнергии в сложных сетях с множественными искажающими нагрузками. Предложено применение активных кондиционеров напряжения, напрямую воздействующих на величину, симметрию и гармонический состав напряжения. Разработан алгоритм управления активным кондиционером напряжения. Продемонстрирована эффективность активных кондиционеров напряжения на примере системы электроснабжения Байкало-Амурской магистрали.

Ключевые слова:

Качество электроэнергии, преобразователь напряжения, активный кондиционер напряжения, Байкало-Амурская магистраль.

Key words:

Power quality, voltage source converter, active power conditioner, Baykal-Amur railroad.

Электроэнергия, как и любой другой товар, должна обладать определенным качеством, чтобы соответствовать требованиям рынка. Низкое качество электроэнергии (КЭ) приводит к значительному ущербу на всех уровнях электроэнергетической системы – от генерации до потребления. В последние годы проблема КЭ обостряется ростом доли преобразовательной нагрузки, которая, с одной стороны, является чувствительной к КЭ, с другой стороны, сама является источником искажений, в первую очередь, гармонических. Сегодня практически в каждой квартире и на каждом промышленном предприятии присутствуют выпрямители, работа которых обуславливает протекание несинусоидальных токов и, как следствие, искажение формы кривой напряжения. В будущем число и мощность преобразовательных электроприемников будут только расти. В таких условиях любое присоединение электрической сети может рассматриваться как источник искажений.

Ярким примером сетей с множественными искажающими нагрузками являются системы электроснабжения железных дорог. Перемещение электропоездов в пространстве и изменение потребляемой ими мощности приводит к резким и значительным отклонениям напряжения на шинах тяговых подстанций от номинального значения. Электропоезда являются однофазными электроприемниками, и их подключение к трехфазной сети вызывает несимметрию напряжения. Наконец, электропоезда питаются от сети переменного тока через выпрямители, а значит, являются источниками токов высших гармоник. Вычислительные эксперименты [1] и натурные замеры [2] показывают, что в сети 220 кВ электроснабжения Байкало-Амурской магистрали (БАМ) практически на всех подстанциях не соответствуют требованиям ГОСТ такие показатели КЭ, как суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и коэффициент