

УДК 622.026.01

**А.Ф. Усов, В.А. Цукерман, В.И. Курец**

## **ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МАТЕРИАЛОВ**

*Рассмотрены принципиальные схемы и классификация технических средств электроимпульсной дезинтеграции материалов, дан анализ схем транспортировки и классификации материала в дезинтеграционных аппаратах, представлены конструкции камер непрерывного действия для стадийной дезинтеграции руд и материалов.*

*Ключевые слова: электроимпульсная дезинтеграция, породоразрушающие устройства, дробление.*

---

**В** электроимпульсной дезинтеграции по сравнению с другими приложениями электроимпульсного способа разрушения материалов в некотором отношении проще решается ряд специфических электрофизических и электротехнических вопросов (изоляция электродов, генерирование и передача высоковольтных импульсов к породоразрушающему устройству и др.) и поэтому исследования и разработка технических средств способа, производственное освоение технологий решались быстрее. Основные представления о порядке расчета и конструирования рабочих камер электроимпульсных установок сложились еще до того, как были начаты подобные исследования за рубежом.

В НИИ высоких напряжений при Томском политехническом институте (НИИ ВН), Кольском филиале АН СССР (сейчас Кольский научный центр РАН, КНЦ РАН), Всесоюзном научно-исследовательском и проектном институте механической обработки материалов Минцветмета СССР (институт «Механобр») были обоснованы принципы создания дезинтеграционных устройств, созданы исследовательские

стенды и технологические установки для опытно-промышленных испытаний и работы в производственных условиях. Действенная координация и кооперация работ этих организаций в научных исследованиях позволила охватить глубокой научной проработкой широкий спектр технологических направлений, организовать совместные научно-технические проекты по созданию ряда технологических комплексов. Именно представителями научных школ этих трех организаций выполнено монографическое описание научно-технических основ электроимпульсной дезинтеграции материалов [1].

Под техническими средствами дезинтеграции будем понимать только аппараты, в которых непосредственно реализуется процесс дезинтеграции материала, включая и случаи совмещения в аппарате функций дезинтеграции и первичного обогащения продукта, а также средства транспортировки исходного и готового продукта. В целом же установки ЭИ-дезинтеграции кроме дезинтеграционной камеры включают источник высоковольтных импульсов (вместе с зарядным устройством), систему управления и защиты электриче-

ской сети, вспомогательную технологическую оснастку. Установка в целом должна отвечать соответствующим технологическим требованиям (производительности, крупности исходного материала и готового продукта, отсутствия загрязнения продукта), обладать высокой эксплуатационной надежностью, допускающей конечно регламентируемую смену быстро изнашиваемых элементов, быть безопасной в эксплуатации для обслуживающего персонала и электромагнитно совместимой с другой технологической аппаратурой.

Следует обратить внимание на следующее общее положение, бывшее предметом недопонимания и дискуссий в среде специалистов, занимавшихся вопросами электрофизических методов дезинтеграции материалов. Есть определенное подобие (схожесть по внешнему виду и способу транспортировки продукта) некоторых типов устройств электроимпульсной и электрогидроимпульсной (электрогидравлической) дезинтеграции, например, с системой электродов «острие-плоскость». Однако, физическая особенность электроимпульсного разрушения – высокое импульсное напряжение с длительностью воздействия  $10^{-7}$  с и менее - существенно изменяет подход к обоснованию конструкции и параметров высоковольтного электрода. Сопоставление потерь энергии в предпробивной стадии для режимов, свойственных электроимпульсной и электрогидроимпульсной дезинтеграции [2], позволяет ориентировать разработку на придание электродам форм, увеличивающих рабочую зону воздействия разрядов за счет дополнительных острий, протяженности линейных электродов в шелевом разрядном промежутке. Эти конструкции, разработанные в КНЦ РАН для задач технологии выделения включений крупнокристаллических минералов, позволяют фрагментировать круп-

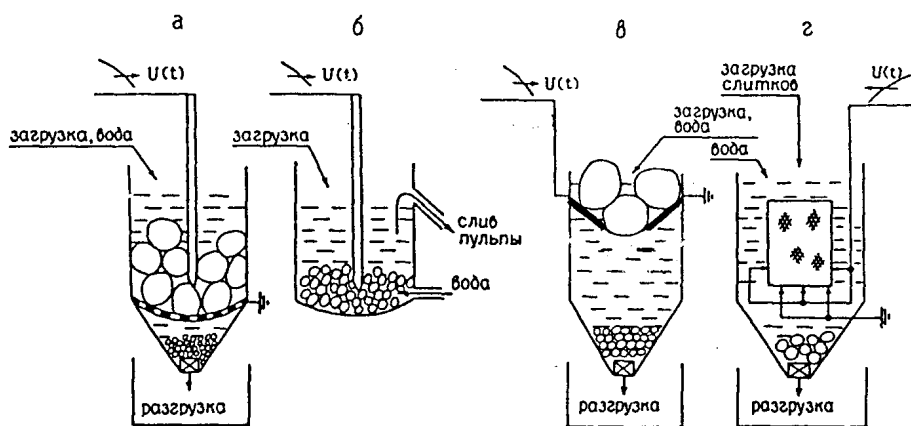
нокусковые (размером до 300-400 мм) слюдяные и асбестовые руды и породы с камнедрагоценным и камнесамоцветным сырьем, разделять слитки (размером до 800 1000 мм) искусственной слюды.

Участие в работах по электроимпульсной технологии института «Механобр» позволило профессионально рассматривать не только физические и технологические аспекты ЭИ способа в рудоподготовительном цикле обогащения руд, но и вопросы определения удельных характеристик камер, обеспечения необходимой транспортирующей способности при проектировании камер повышенной производительности, совмещения в одном аппарате нескольких технологических функций.

#### **Принципиальные схемы и классификация технических средств ЭИД**

Принципиальные типы устройств электроимпульсной дезинтеграции представлены на рис. 1.

В диапазоне дезинтеграции руды от максимально возможной исходной крупности до конечной мы выделяем три области, в которых возможно и целесообразно применение ЭИ-дезинтеграции, и соответственно различаем такие стадии процесса дезинтеграции как измельчение, дробление и фрагментация материала. Ряд физических факторов естественным образом формируют диапазон электроимпульсного измельчения материалов. Эффективность электрического пробоя кусков руды зависит от соотношения между размером куска  $d$  и величиной межэлектродного расстояния  $l$  и она максимальна при  $d \sim l$ . Разрядный промежуток определяет уровень рабочего напряжения (с увеличением разрядного промежутка напряжение пробоя повышается), который из эксплуатационных соображений целесообразно ограничить, из практики величиной



**Рис. 1. Принципиальные типы устройств электроимпульсной дезинтеграции**

300-400 кВ. Из этого следует, что предельно допустимая величина разрядного промежутка может быть определена в 30-40 мм, а размер исходного материала ограничен величиной  $(1,5-2) d/1$ , т.е 60-80 мм. С другой стороны, по физическим причинам внедрение разряда в частицы менее 2 мм становится невозможным. Таким образом, сугубо из учета физических особенностей процесса электроимпульсного пробоя частиц материала выделен интервал крупности, в пределах которого при приемлемом уровне напряжения может быть обеспечена высокая эффективность электроимпульсного измельчения, а именно от (60-80) до 2 мм.

Оптимальной электродной конструкцией для реализации электроимпульсного измельчения является система электродов типа «стержень - плоскость» как обеспечивающая минимальные пробивные градиенты напряжения. Устройство этого типа состоит из стержневого электрода (одно- или многоострийного, «лапчатого») и заземляемой полусферы с вариантами удаления готового продукта через классифицирующие отверстия в заземляемом электроде (рис. 1, а), выносом продукта восходящим потоком жидкости (рис. 1,

б), через щелевой зазор в боковой стенке камеры. Многоострийная конструкция высоковольтного электрода позволяет расширить рабочую зону процесса и снизить уровень рабочего напряжения за счет эффекта многоимпульсного воздействия, но это приемлемо в пределах, допускаемых условиями формирования импульсов напряжения на электродах, с учетом того, что с увеличением числа острий омическое сопротивление системы электродов как нагрузки электрической цепи уменьшается. Конечная крупность продукта может регулироваться в достаточно широких пределах, чтобы удовлетворить установленному технологическому требованию для данного процесса - получению продукта заданной крупности или достижение необходимой степени раскрытия зерен полезных минералов. Степень измельчения материала (конечная крупность) в устройстве определяется способом отбора продукта. В одних случаях она строго задается выбором размера классифицирующих отверстий (отбор через сито – грубое измельчение) или скоростью потока жидкости при отборе частиц восходящим потоком жидкости (тонкое измельчение), в других – корректируется энергетическим режи-

мом измельчения без строгого фиксирования конечной крупности (стадиальное измельчение в потоке материала в желобе, на лотке и т.п.).

Электроимпульсное измельчение как рудоподготовительный процесс эффективно может быть применено для большинства руд, традиционно обогащаемых гравитацией и флотацией. Энергетическими параметрами разрядов можно влиять на гранулометрический состав продукта и даже при измельчении до – (1-2) мм можно оптимально вскрывать полезные минералы гравитационной и флотационной крупности, минимизировать их переизмельчение, создавать предпосылки для повышения селективности разрушения в последующем механическом доизмельчении руды для вскрытия тонкой вкрапленности. Учитывая экономический фактор электроимпульсной дезинтеграции (отсутствие выраженного преимущества по энергоемкости процесса в сравнении с традиционными методами из-за высокой составляющей затрат на конденсаторы в приведенных затратах [3]) диапазон использования электроимпульсного измельчения в общем процессе рудоподготовки желательнее максимально ограничить, соотнося исходную крупность измельчаемого материала с крупностью включений полезных минералов, но в пределах, гарантирующих достижение значимого технологического эффекта.

*Электроимпульсное дробление* - режим электроимпульсной дезинтеграции руд, когда требуется вскрыть крупное ценное кристаллосырье с минимальным повреждением. Для этого должна быть обеспечена возможность дробления агрегатов, по крупности в 2-3 раза превышающих размер включений полезного минерала. Если ориентироваться на драгоценные камни (изумруды, алмазы, рубины и т.п.), то исходная крупность сростков может

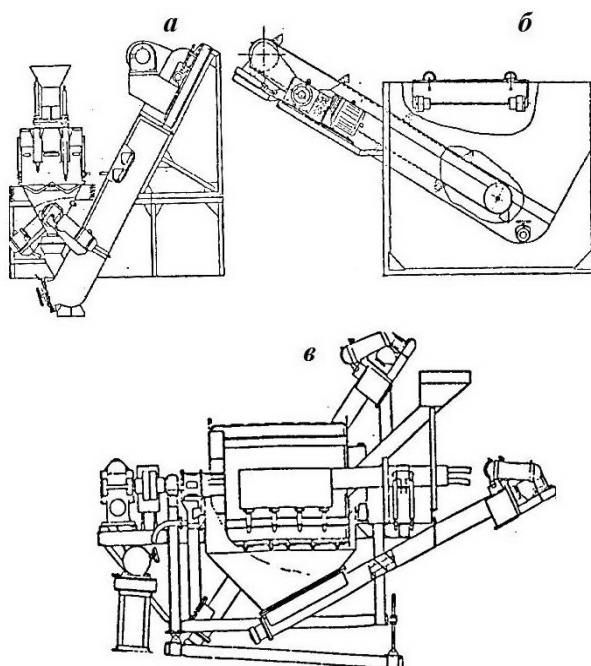
достигать размеров 150-200 мм, а при извлечении кристаллов слюды даже и 300-400 мм. Оптимальным устройством для реализации данного процесса являются такие, которое гарантированно обеспечивает контакт обеих разнополярных электродов с разрушаемым фрагментом материала независимо от его исходной крупности и классифицирует продукт дробления по верхнему размеру крупности кристаллов. Этому требованию отвечают электродные конструкции (рис. 3,а) с симметрично располагаемыми стержневыми или пластинчатыми электродами. Расстояние между электродами, как и в устройствах измельчения, ограничено допускаемым уровнем рабочего напряжения, а режим выделения энергии в канале разряда выбирается таким, чтобы обеспечить крупнокусковое разрушение фрагментов руды. Рациональным вариантом расположения электродов является такое, когда продукт разрушения под действием собственного веса перепускаются через щелевой зазор, образуемый самими электродами в виде классифицирующих ячеек, размер которых определяет верхний предел крупности продукта. Общая длина щелевого зазора должна быть такова, чтобы исключить прекращение процесса дробления при неблагоприятном положении какого-либо куса породы в рабочей зоне относительно острий электродов. Практически достаточна длина рабочей зоны, превышающая максимальный размер кусков породы в 3-4 раза. Требованиям по электрической прочности оптимально соответствует конструкция с замкнутым (кольцевым) щелевым зазором.

*Электроимпульсная фрагментация* предназначены для разрушения специфических природных, а большей частью искусственных материалов с включениями большемерных кристаллов в породной массе (или исходной шихте),

отличающейся пониженной в сравнении с кристаллами электрической прочностью, в том числе содержащей воздушные пустоты. Характерным примером такого материала являются блоки искусственной слюды. Разрушение блоков реализуется с помощью многоэлектродных устройств с распределением электродов по значительной части поверхности блока (рис. 1, л). Учитывая размеры блока и отделяемых фрагментов и связанную с этим потребность в повышенных значениях энергии единичного разряда, допускается возможность увеличения рабочих напряжений до 500-600 кВ, а разрядных промежутков - вплоть до дециметров. При этом максимально используется возможность улучшения условий разрушения за счет дополнительных свободных поверхностей.

Описанные выше принципы работы дезинтеграционных устройств положены в основу большого спектра измельчительных и измельчительно-обогащительных машин.

В качестве других основных особенностей и классификационных признаков дезинтеграционных устройств являются следующие. По назначению установки могут быть порционные, предназначенные для дезинтеграции ограниченных количеств материала (проб) с целью изучения материала и его технологического опробования, и непрерывного действия в рудоподготовительном процессе. Следует отметить, что степень сокращения материала в электроимпульсной рабочей камере, как правило, превышает эту же величину в механических аппара-



**Рис. 2. Схемы конструкций дезинтеграционных камер непрерывного действия**

тах. Так при грубом измельчении в электроимпульсных установках степень измельчения составляет 60 - 80 ед., заменяя, как правило, два механических аппарата.

#### *Транспортировка и классификация материала в электроимпульсных аппаратах*

Схемы конструкций дезинтеграционных камер представлены на рис. 2, 3 и 4.

По способу транспортировки и классификации материала в электроимпульсных аппаратах можно выделить следующие типы рабочих камер:

- разрушение и классификация материала осуществляется на заземленном перфорированном электроде-классификаторе «под завалом»; материал по мере разрушения до размеров классифицирующих отверстий в заземленном электроде отводится в систему сбора;

- транспортировка и классификация материала происходит на заземленном перфорированном электроде-классификаторе за счет его вращения или колебания;

- транспортировка материала в камере происходит за счет придания ей возвратно-поступательных или бигармонических колебаний;

- транспортировка и классификация материала осуществляется за счет пульсаций или направленного движения жидкой среды в камере, включая аэролифтные системы;

- транспортировка и классификация материала в камере осуществляется под собственным весом продукта на наклонных электродах-классификаторах.

Во всех типах рабочих камер вывод и обезвоживание готового продукта возможно различными транспортными системами для пульп - спиральные транспортеры, скребковые и ковшевые транспортеры (рис 2 а, б), шнеки (рис 2, в), элеваторы и т.д., которые позволяют реализовать любые схемы дальнейшей обработки материала, включая организацию открытого или замкнутого циклов разрушения.

Наибольший интерес представляют методы транспортировки материала в активной зоне разрушения. Простейшим методом отвода готового продукта из активной зоны рабочей камеры является его классификация через перфорированный заземленный электрод, который герметично соединен с корпусом камеры, причем процесс разрушения и классификации можно осуществлять при полной ее загрузке (рис. 2, а). Классификация материала в этих камерах происходит принудительно за счет воздействия ударных волн и интенсивного массопереноса, возникающего в жидкости у поверхности электрода-классификатора при электрическом

пробое рабочего промежутка. Конструкции камер этого типа могут быть как одноэлектродные, так и многоэлектродные. Улучшение процесса классификации может быть достигнуто путем придания камерам бигармонических колебаний или пульсаций жидкости, причем последняя (многоэлектродная) может быть использована для частичного обогащения продукта и характеризуется повышенной сохранностью разделяемых минералов.

Стационарное расположение высоковольтного и заземленного электрода ограничивает ресурс работы электрода-классификатора, и ограничение частоты следования импульсов в связи с незначительной величиной классифицирующей поверхности заземленных электродов. Рассмотренный тип рабочих камер, как правило, используется при порционном питании, но возможна и организация непрерывного процесса разрушения. Улучшение транспортировки материала в активной зоне, увеличение классифицирующей поверхности заземленных электродов достигается в электроимпульсных камерах с вращающимся или колебательным движением электродов-классификаторов. Так в рабочей камере (рис. 2, в), созданной на основе барабанного грохота, заземленный электрод-классификатор выполнен в виде барабана с перфорированными отверстиями по поверхности, которому придано вращение вокруг оси, а высоковольтные электроды введены внутрь и стационарно закреплены. В этом случае исходный продукт, попадая в барабан, транспортируется по его поверхности от одного к другому электроду, причем материал классифицируется не только в активной зоне электродов, но и между электродами на вогнутых поверхностях барабана.

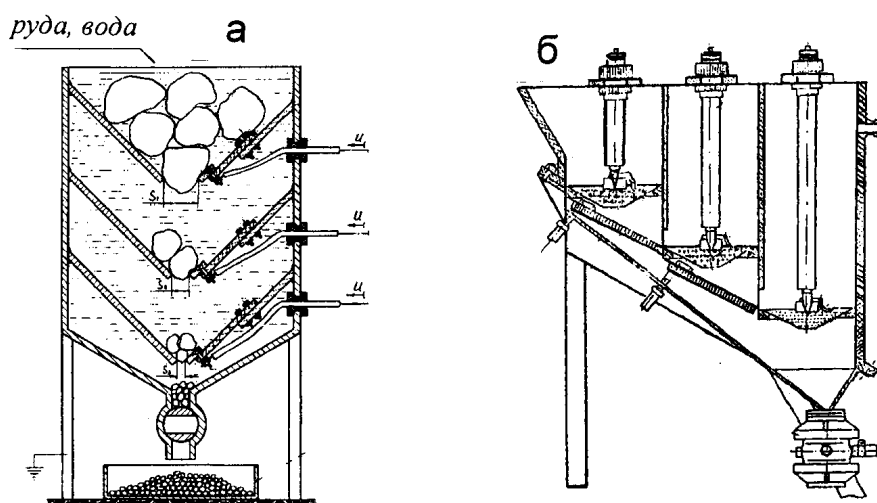
Рассмотренные аппараты, как правило, многоэлектродные, непрерывного действующие, укомплектованные

системой обезвоживания и вывода готового продукта, работающие в замкнутом цикле разрушения. Улучшить рассев материала, используя поверхность всего электрода-классификатора, можно в рабочих камерах, в которых материал движется по всей поверхности заземленного электрода, многократно проходя под высоковольтными электродами. Этого можно достичь, придав рабочей камере бигармонические или возвратно-поступательные колебания. Заземленный электрод-классификатор в камере (рис. 2,а) выполнен в виде усеченного тора, в котором материал движется по кругу за счет бигармонических колебаний всей камеры. Причем разрушение материала происходит в активных зонах высоковольтных электродов, а рассев осуществляется в промежутках между ними. Такой же эффект достигается в электроимпульсной камере на базе качающегося грохота.

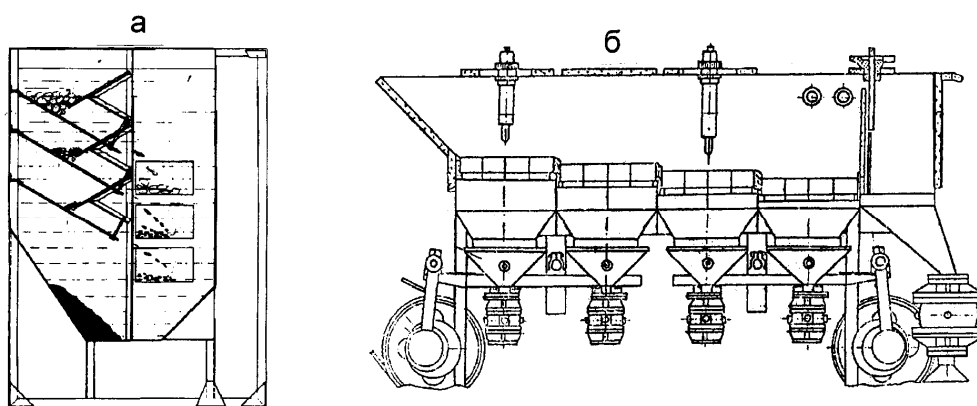
Транспортировка и грохочение материала могут быть организованы на стационарных наклонных классификаторах, смонтированных внутри рабочей камеры. Наиболее перспективна такая конструкция в электроимпульсных устройствах, обеспечивающих стадийное разрушение материала (рис. 4,а). В такой камере, кроме разрушения, происходит предварительный рассев материала, поступающего из загрузочного бункера, а также промежуточный рассев материала между стадиями. Стадийные конструкции используются для снижения переизмельчения и получения равномерного по крупности продукта, когда возможность регулирования размерных характеристик готового продукта параметрами импульса исчерпана.

Все рассмотренные выше конструкции рабочих камер имеют перфорированные электроды-классификаторы.

Однако размер отверстий в электродах-классификаторах ограничивается технологией их изготовления и высокой стоимостью. Целесообразный размер отверстий в электродах-классификаторах должен определяться технологическими требованиями к продукту, однако практически его не удастся выполнить менее 1 мм. Поэтому в электроимпульсных аппаратах для тонкого измельчения необходимо решать проблему вывода материала из активной зоны разрушения. Решение указанной проблемы возможно путем организации транспортировки и классификации материала в камерах за счет направленного потока жидкости или ее пульсацией. В одних случаях может быть предусмотрена подача жидкости в стенки заземленного электрода таким образом, чтобы создать вращающийся восходящий поток, который транспортирует материал между электродами и выносит готовый продукт в специальное отверстие, расположенное в верхней части рабочей камеры. Другая конструкция использует схему гидроциклона, обеспечивая концентрацию недоизмельченного продукта в рабочей зоне и вывод готового продукта в систему сбора. Эта конструкция требует специальных решений по герметизации аппарата при значительных ударных нагрузках. Основным недостатком конструкций, использующих гидроклассификацию в восходящих турбулентных потоках, является разделение материала по удельному весу, поэтому более тяжелые минералы в указанных конструкциях переизмельчаются. Кроме того, эти устройства требуют дополнительного оборудования (насосы, ступицы, отстойники и т.д.). Наиболее полезны указанные конструкции для измельчения мономинеральных или искусственных материалов, например, плавленых корундов, периклаза, обладающих постоянством физико-механи-



**Рис. 3. Схема конструкций камер стадальной дезинтеграции**



**Рис. 4. Схема конструкций камер с совмещением технологических функций в одном аппарате**

ческих свойств во всем диапазоне крупности.

*Стадиальная дезинтеграция руд и материалов*

Стадиальность разрушения является неперенным условием для повышения энергетической и технологической эффективности любого способа дезинтеграции, обеспечивая возможность изменять характер воздействия на материал по мере уменьшения его крупности и своевременно выводить из процесса готовый продукт с раскрыты-

ми зернами минералов. В стадийных ЭИ-процессах с изменением крупности материала для обеспечения оптимальных условий пробоя и разрушения частиц материала соответствующим образом изменяется величина рабочего промежутка и параметры генератора, задающие режим энергоснабжения в канале разряда. Принципиальная особенность устройств электроимпульсной дезинтеграции состоит в возможности реализации стадийного процесса в одном аппарате. В стадийном ЭИД-



аппарате несколько электродных устройств устанавливаются так, что материал последовательно по мере дробления перемещается из одной секции в другую, и устройства отдельных стадий обычно подключаются к независимым источникам импульсного напряжения, параметры которых позволяют изменять энергетический режим воздействия в соответствии с крупностью материала на данной стадии дробления (рис. 3).

Особенностью электроимпульсных дробильно-измельчительных рабочих камер является совмещение в них нескольких операций, например, измельчение и классификацию; измельчение, классификацию и обогащение. Высокая селективность разрушения и эффективность раскрытия включений минералов делает целесообразной стадиальную дезинтеграцию материалов с классификацией и обогащением продукта после каждой стадии дезинтеграции.

В устройстве типа рис.4,а совмещаются операция дробления и выделение промпродукта обогащением по форме - устройство эффективно выделяет плоские кристаллы слюды от сростков и породы, при этом частично разделяя их по крупности. В устройстве типа рис. 4, б дезинтеграция совмещается с обогащением отсадкой. В четырехкамерной отсадочной машины, под каждой рабочей камерой имеется эластичный элемент, обеспечивающий вертикальные пульсации рабочей среды. Такая конструкция обеспечивает транспортировку материала в камере между электродами и накопление частично обогащенного продукта (для руд, обогащаемых гравитационными методами) в системах сбора первой и второй камеры. В качестве подушки в камерах используется недоизмельченный материал.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. - Апатиты: КНЦ РАН, 2002, 324 с.

2. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зиновьев Н.Т. Переходные процессы в установках

электроимпульсной технологии. - Л.: Наука, 1987г., 179 с.

3. Усов А.Ф. Перспективы технологий электроимпульсного разрушения горных пород и руд // Известия РАН, Энергетика. 2001. № 1. С. 54–62. **ИДБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Усов А.Ф. – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, начальник научно-организационного отдела Кольского научного центра РАН, ст. научный сотрудник ЦФТПЭС КНЦ РАН, usov@admksk.apatity.ru,

Цукерман Вячеслав Александрович – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник, заведующий отделом промышленной и инновационной политики, Институт экономических проблем Кольского научного центра РАН, tsukerman@ier.kolasc.net,

Курец В.И. – доктор технических наук, профессор, начальник отдела НИИ высоких напряжений, Томский политехнический университет.

