© П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец,
И.В. Верхоробина, 2007

УДК 622.73

П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СТРУЙНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ

Семинар № 24

Использование принципа дезинтеграции руд в струях энергоносителя характеризует газодинамический тип измельчительного устройства, называемого установкой струйного измельчения. Установки струйного измельчения (УСИ) реализуют режимы динамической импульсной обработки измельчаемого материала высоким давлением и позволяют достичь высокого уровня дисперсности (1–10 мкм) с удельной поверхностью порядка 0,5–2 $м^2/г$ при удельном расходе энергии 200–1200 $Дж/м^2$ [1-3]. В УСИ проводится обработка материала без ограничений на твердость, структурные и физико-механические свойства, причем, в рабочем процессе измельчение совмещается с разделением по крупности, осаждением готового продукта, очисткой от пыли отработавшего энергоносителя. УСИ включает следующие функциональные устройства [4]:

1- источник энергоносителя, в качестве которого может использоваться компрессор, камера сгорания или паровой котел;

2- коллектор-распределитель энергоносителя (кроме случая использования камер сгорания);

3- сопла для истечения энергоносителя (сжатого воздуха, перегретого пара или горячих газов) с устройствами для перемещения их вдоль горизонтальной оси;

4- инжекторы для ввода измельчаемых частиц в струю газа;

5- разгонные трубки для ускорения частиц;

6- помольную камеру, состоящую из корпуса и футеровки;

7- сборник-делитель для отвода измельченного материала в пылеосадитель и возврата в инжектор крупных частиц на повторный цикл измельчения;

8- классификатор отбойно-вихревого или гравитационного типа;

Структурно-функциональная схема УСИ приведена на рис. 1. Показанные на схеме в прямоугольниках позиционные обозначения соответствуют приведенному выше перечню составных частей установки. Принцип работы струйной мельницы заключается в следующем. Измельчаемый материал из бункера *12* направляется питателем *13* по трубопроводу в сборник-делитель *7*, откуда поступает в инжекторы *4*, где частицы материала внедряются в газовые струи, истекающие из сопел *3*, разгоняются до требуемых скоростей в разгонных трубках *5*. Сталкиваясь между собой в помольной камере *6*, частицы измельчаются с образованием различных фракций. По вертикальной трубе (труба-стояк) сборника-делителя *7* газовзвесь поступает в классификатор 8, где осуществляется разделение твердых частиц по крупности. Тонкая фракция из разделителя следует в пылеосадитель *9*, а грубая

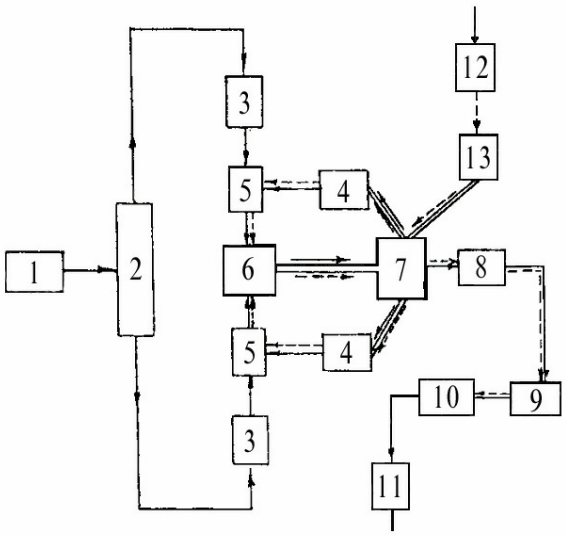

Рис. 1. Структурно-функциональная схема установки струйного измельчения:
◄——— рабочий газ (энергоноситель);
◄- - - - - материал.

(некондиционная) - поступает на доизмельчение через инжекторы *4* в помольную камеру *6*. Этот цикл возврата частиц в рабочий процесс происходит многократно (3–6 раз) в зависимости от твердости материала и дисперсности готового продукта.

Из пылеосадителя *9* поток газовзвеси поступает для окончательной очистки в фильтр-пылеуловитель *10*, в бункере которого накапливается готовый продукт с более высоким содержанием тонкодисперсных фракций, чем в пылеосадителе. Энергоноситель создается источником *1*, поступает в коллектор *2* и из него подается в сопла *3*. Давление энергоносителя составляет от 0,3 до 1 МПа. Разрежение, создаваемое вентилятором 11 на выходе установки, составляет до 0,01 МПа. Для управления рабочим процессом измельчения на УСИ используется система контроля режимных параметров.

Эффективность работы струйных измельчителей зависит от параметров энергоносителя, свойств и гранулометрии исходного и измельченного материала, а также от конструктивных и технологических параметров функциональных элементов измельчителя и классификатора. Поиск оптимальных условий газоструйной обработки проводится путем варьирования скорости и температуры струй, аэродинамики двухфазных потоков, режима классификации, конструктивных параметров измельчителя.

В работе [5] предложено удачное техническое решение, включающее способ разделения продукта струйных измельчителей на фракции ряда дисперсностей с помощью гравитационного классификатора каскадно-осе-вого типа. Конструкция классификатора (разработка Ежова А.Г.) позволяет достичь ступенчатого разделения частиц по фракционному составу в диапазоне граничной крупности разделения от единиц до сотен микрометра, избежав при этом использования вращающихся частей и сохранив производительность установки. При этом возможно снижение энергозатрат и повышение ресурса работы измельчительных установок.

Достижение высокой эффективности в процессе гравитационного разделения обеспечивается многоступенчатым устройством классификатора, состоящим из отдельных секций разного диаметра за счет перевода двухфазного потока на неустановившиеся режимы движения. Если в обычном гравитационном классификаторе разделение частиц является равновесным процессом в восходящем

потоке, то в каскадном классификаторе внутри каждой секции образуется вихревой поток с горизонтальной осью, в котором участвуют практически все частицы и часть потока среды. Применение каскадно-осевого гравитационного классификатора в схеме струйной мельницы позволяет осуществить двойной последовательный разгон измельчаемых частиц: сначала мелкой фракции, ускоряемой высокоскоростной струей, а затем крупной - под воздействием столкновений с предварительно ускоренными частицами мелкой фракции. Такой способ двойного разгона частиц [5] способствует уменьшению энергоемкости измельчения путем использования кинетической энергии предварительно ускоренных мелких частиц в отдельном инжекторе.

С позиций развивающейся теории измельчения [6-10] для достижения высоких эффектов получения тонкодисперсных продуктов необходимо приближать скорость нагружения измельчаемых частиц к скорости авторезонанса, реализующей предельную скорость перестройки кристаллической решетки вещества, т.е. необходимо обеспечивать режимы высоких давлений (высоких деформаций) при высокочастотном импульсном нагружении. Это соответствует условию достижения максимальной величины коэффициента трансформации в акустическую энергию приобретенной веществом энергии, что обеспечивает максимальное значение К.П.Д. диспергирования. Порядок оптимальной частоты нагружающих импульсов устанавливается АЭ-мониторингом в экспериментах объемного нагружения по специальной программе и методике [6, 9].

В установках газоструйного измельчения потенциальная и тепловая энергия рабочего газа (энергоносителя) превращается в кинетическую энергию измельчаемых частиц. При динамической обработке измельчаемых частиц со скоростью порядка нескольких сотен метров в секунду вещество претерпевает напряжения порядка сотен МПа и деформации в размере до десятка процентов. Действие прямых и косых ударов частиц в зоне измельчения реализует нагружение в режиме высоких боковых давлений с последующим сбросом их за пределом прочности, что также усиливает эффекты измельчения.

Изменение скорости соударений частиц в зоне помола струйного измельчителя достигается изменением температуры и давления энергоносителя. Для создания режимов высоких давлений используется энергия рабочего газа (воздух, азот, перегретый пар и др.), сжатого до давлений в диапазоне 0,3–2,0 МПа, холодного или нагретого до температур $T \cong 400–600\ ^{o}C$. Расчетами установлено, что подогрев воздуха на 200 ^{o}C обеспечивает прирост скорости истечения примерно на 30 %. Период взаимных соударений частиц (время накачки энергией) в процессе струйного измельчения соизмерим со временем их разрушения, что согласно теории [6] приводит к ускоренному развитию авторезонансного разрушения, причем, длительность авторезонансной стадии саморазрушения характеризует степень диспергирования и механоактивации измельченного продукта.

Газоструйный способ измельчения обеспечивает в наибольшей мере термодинамическую обработку частиц по сравнению с известными способами измельчения [1-3, 6]. В работе [11] обоснована ведущая роль термоциклического воздействия (термоудара), увеличивающего зону разупрочнения природных сред при их разрушении (за счет смены деформаций сжатия и растяжения).

В результате перечисленных особенностей газоструйная технология измельчения отличается от традиционного измельчения в барабанных шаровых и других мельницах более высокими технологическими и технико-экономическими показателями. Полезность и эффективность использования струйных способов тонкого измельчения в режимах высокодинамичной термомеханической обработки подтверждается следующими примерами результатов исследований различного минерального сырья [12-14].

Труднораскрываемые рудные и техногенные материалы требуют в процессе измельчения специальной обработки, связанной с нагружением их до высокой плотности энергии перед разрушением. Проведены теоретические и экспериментальные исследования энергетики диспергирования [1-3, 6, 7], позволившие выявить положительную роль высоких давлений при нагружении измельчаемых частиц. Дезинтеграция природных материалов в этих режимах происходит преимущественно по межзеренным границам с преимущественным сохранением целостности полезных минералов. При действии высоких давлений и высоких деформаций возрастают эффекты измельчения, улучшается раскрытие полезных минералов, уменьшается энергоемкость измельчения руды, повышаются показатели обогащения полезных ископаемых; возрастает степень механоактивации измельченного продукта, что обусловливает улучшенные технологические свойства концентратов в гидрометаллургическом переделе [14, 15].

Концентрат флотационного обогащения вольфрамо-молибденовых руд Тырныаузского месторождения содержал основной минерал - шеелит и молибденит в виде тонких включений в шеелите; при этом сульфиды были представлены в виде пирита, пирротина, халькопирита и сфалерита. Концентрат измельчали в газоструйной мельнице до частиц менее 40 мкм. Технологические свойства измельченного продукта оценивали по извлечению металлов при автоклавно-содовом выщелачивании в лаборатории Нальчикского гидрометаллургического завода (НГМЗ) при условиях выщелачивания, равнозначных производственному процессу. Испытаниями установлена положительную роль термомеханической активации в процессе выщелачивания при извлечении ценных металлов из молибдо-шеелитовых концентратов Тырныаузского вольфрам-молибденового комбината: извлечение $Mo_{общ}$ возрастает на 6-7 %, извлечение WO_3 – до 99,6 %.

Применение газоструйного процесса позволяет повысить реакционную способность вольфрамо-молибде-новых концентратов; перевести боль-шую часть сульфидного молибдена в окисленную форму; удалить с поверхности частиц реагент, вызывающий пенообразование. Это означает, что основные трудности, связанные с потерями металлов (технологическими и механическими), имеющие место при переработке молибдено-шеели-товых концентратов на гидрометал-лургических заводах, могут быть устранены. Рентгенометрические и химические анализы измельченных молибдо-шеелитовых продуктов показали, что при газоструйном измельчении содержание сульфидного молибдена по сравнению с продуктом шарового помола снижается в 2 раза, а в циркулирующей нагрузке (возврате) газоструйной мельницы сульфидного молибдена практически не наблюдается. С позиций достижения максимального извлечения Mo из сульфидного сырья целесообразно не превышать температуру энергоносителя более 400 °С. Установле-

на также оптимальная величина удельной поверхности Sуд, превышение которой не приводит к улучшению технологических свойств активированных порошков: для сырья Приморского ГОКа - $S_{уд} \cong 0{,}2$ м^2/г, Тырныаузского ГОКа $S_{уд} \cong 0{,}3$ м^2/г, для продуктов НГМЗ - $S_{уд} \cong 0{,}25$ м^2/г. Полученные результаты [6] доказывают перспективность применения газоструйного способа обработки для повышения качества вольфрам- и молибденсодержащего сырья в гидрометаллургическом производстве и позволяют рекомендовать разработанную технологию для внедрения на гидрометаллургических заводах.

При подготовке к выщелачиванию сульфидного сырья Норильского ГМК установлено ускорение процесса обработки активированного пирротинового концентрата в 1,5–2 раза [6].

При подготовке газоструйным методом к магнитному обогащению крупновкрапленных вольфрамовых руд достигается повышение качества и извлечения WO_3 в концентрат на 10–12 %.

Избирательность раскрытия минералов при газоструйном способе измельчения подтверждена на примере тонковкрапленной оловосодержащей руды: в основной фракции 40–74 мкм содержится олова в 2 раза больше, чем при шаровом измельчении.

Способность газоструйного способа к селективности измельчения сульфидной медно-никелевой руды уста-новлена по степени концентрации металла (≈ 60 %) в легкофлотируемой фракции (20–70 мкм), тогда как при шаровом измельчении до 70 % металла содержится в труднообогати-мой фракции менее 20 мкм.

При газоструйной рудоподготовке труднообогатимой сурьмяной руды сокращается фронт флотации, уменьшаются потери металла, более чем в 2 раза повышается содержание сурьмы в концентрате по сравнению с традиционным измельчением в шаровой мельнице.

По аналогии с результатами термодинамической обработки сульфидного сырья Тырныаузского вольфрамомолибденового ГМК решалась задача интенсификации гидрометаллургического передела и повышения извлечения сульфидного золота за счет действия высоких температур в процессе газоструйного измельчения и достижения эффекта термомеханоактивации.

В газоструйной установке минералы золотосульфидного сырья испытывают действие высоких давлений, деформаций и температур. При таком термодинамическом нагружении вещества достаточные различия критических температур ($T_{пл}$, $T_{исп}$) и удельных энергий фазовых переходов (плавления $\Delta H_{пл}$, испарения-сублима-ции $\Delta H_{исп}$,) составляющих решетку элементов стимулируют протекание в веществе фазовых переходов и химических реакций.

В результате измельчения видоизменяются физические свойства, структура и химический состав слагающих минералы элементов. Например, для некоторых элементов, входящих в кристаллическую решетку исследуемых сульфидных минералов эти термодинамические параметры известны [20]. Сравним их для серы, железа, мышьяка и золота; $\Delta H_{пл}$, кДж/моль: 1,718 (S); 15,5 (Fe); 12,77 (Au); $\Delta H_{исп}$, кДж/моль: 90,75 (S); 324,4 (Au); $T_{пл}$, ^{o}C: 115,18 (S); 1535 (Fe); 814 (As); 1063 (Au); $T_{исп}$, ^{o}C: 444,6 (S); 615 (As); 2700 (Au). Приведенные значения позволяют считать перспективной апробацию газоструйного способа измельчения для разрушения решетки сульфидов с целью доизвлечения золота из диспергированных минералов.

Результаты цианирования измельченных проб сульфидного концентрата, полученные в лаборатории Навоийского ГМК, показали, что применение

газоструйного способа обработки в нагретых струях (с температурой 200-400 ^{o}C) способствует повышению извлечения благородных и ценных металлов (золота, серебра, меди, кобальта, цинка, никеля). Показатели переработки продуктов газоструйного измельчения превосходят аналогичные для известной технологии: извлечение золота увеличивается с 53,2–49,4 % до 72,2–76,8 %. Содержание ценных металлов в жидкой фазе увеличивается по сравнению с исходным (необработанным) концентратом по золоту, серебру, меди, никелю в 1,5–2 раза, по кобальту – в 4–6 раз.

Исследованиями обогатимости показано повышение качества концентрата из труднораскрываемых руд Полтавского ГОКа при обработке их газоструйным способом. Технологическая схема обогащения, включающая газоструйную рудоподготовку куммингтонито-магнетитовых кварцитов Полтавского ГОКа, позволяет обеспечить проектные показатели по качеству железорудного концентрата и вовлечь в переработку вдвое больше кварцитов разновидности $К_2$3.

Разработанная технология обогащения талько-магнезитов Правдинского месторождения Украины, реализующая совмещение с газоструйным измельчением процесса пневматической сепарации, обеспечивает получение магнезиальных концентратов, пригодных для производства форстеритовых огнеупоров.

Применение газоструйного измельчения для раскрытия сростков и дообогащения марганцевых концентратов Чкаловского горнообогатительного комбината и Грушевской обогатительной фабрики позволяет получить мало-кремнеземистое сырье для химической промышленности с содержанием Mn = =51,5–52,3 % и SiO_2 = 6,3 % .

Путем газоструйного доизмельчения, раскрытия сростков марганца с кварцем и удаления глины из марганцевых шламов обогатительной фабрики Марганецкого ГОКа возможно получение методом магнитной сепарации марганцевого концентрата 2-го сорта с содержанием Mn 34,4–36,2 % .

Применение газоструйного измельчения при обогащении труднообогатимого рудного сырья для порошковой металлургии позволяет получить концентрат с содержанием Fe = 71,9 %, SiO_2 = 0,48 %, пригодный для последующего автоклавного выщелачивания.

Струйная обработка глин Орджоникидзевского карьера Никопольского месторождения позволила получить тонкодисперсные порошки, обеспечивающие положительный эффект глинолечения при их внутреннем употреблении. Последнее объясняется повышением физико-химической активности диспергированной глины, ее емкостных и сорбционных свойств.

Изучение технологических возможностей струйных измельчителей для задач получения микропорошков проведено на различных твердых материалах: сырье и продуктах переработки полезных ископаемых для цветной, черной и порошковой металлургии, химической, строительной, огнеупорной и других отраслей промышленности. Получены новые, прогрессивные технологические решения в области получения микронизированных порошков. Исследованию осо

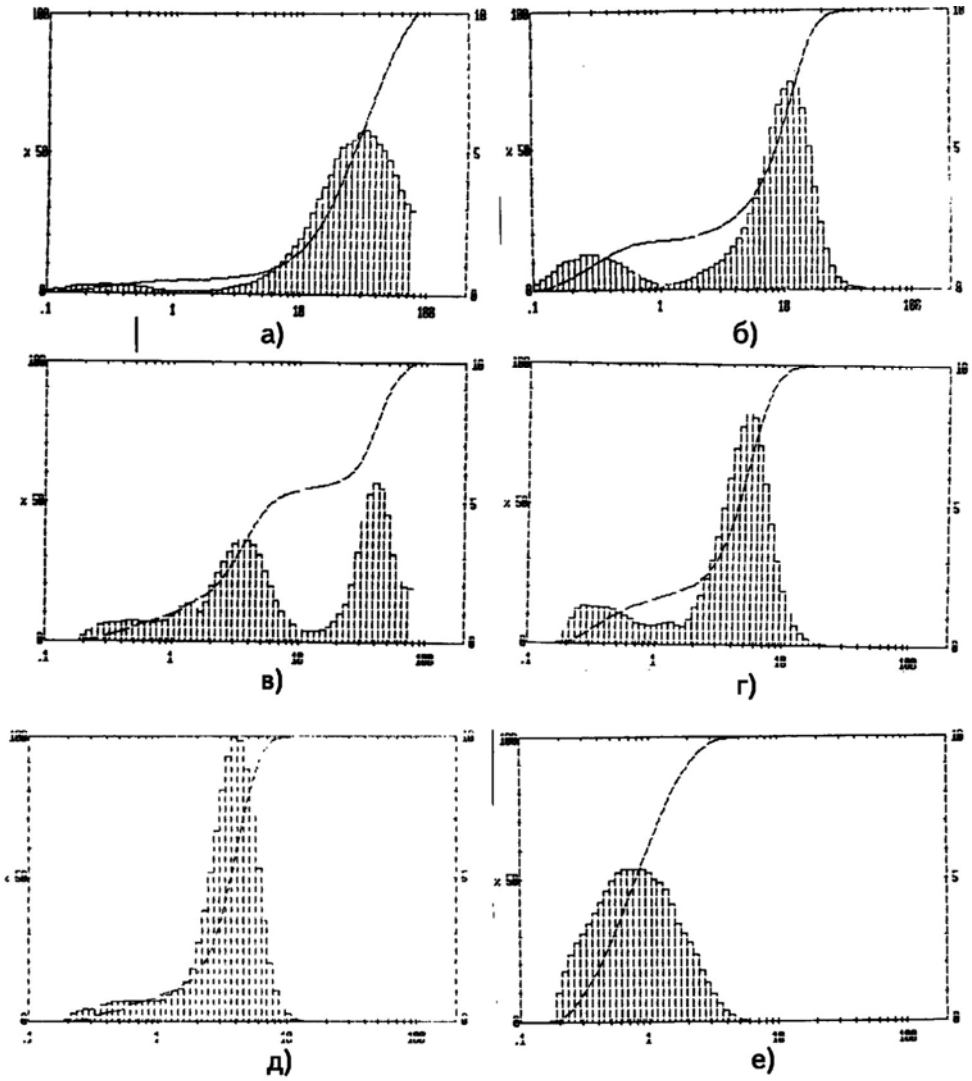

Рис. 2. Изменение суммарных и частных характеристик дисперсности алмазных порошков при струйном измельчении:

а) $\bar{d}$ = 25,82 мкм; γ_{-5} = 7,6 %;
б) $\bar{d}$ = 8,52 мкм; γ_{-5} = 30,3 %;
в) $\bar{d}$ = 6,26 мкм; γ_{-5} = 45,4 %;
г) $\bar{d}$ = 4,51 мкм; γ_{-5} = 58,6 %;
д) $\bar{d}$ = 3,63 мкм; γ_{-5} = 80,1 %;
е) $\bar{d}$ = 0,78 мкм; γ_{-5} = 99,9 %.

бенностей и режимов измельчения подвергались однокомпонентные материалы (глина, глинозем, карбиды кремния и бора, электрокорунд, шамот, цемент, уголь, диоксид циркония, цирконовый, марганцевый и пирротиновый концентраты) и полиминеральное сырье (тальк-магнезитовая порода, железистые

кварциты, оловосодержащая и медно-никелевая руда). Физико-механические свойства измельчаемых материалов менялись в широких пределах: плотность 1,5–6·10^3 кг/$м^3$, твердость по десятибальной шкале 1–9. Определены следующие технологические и технико-эконо-мические эффекты.

Себестоимость газоструйного измельчения цирконового концентрата на Вольногорском ГМК уменьшается в 1,6 раза по сравнению с технологией использования перегретого пара; выход годного продукта увеличивается на 2–3 %. Повышение в 3–3,5 раза дисперсности металлургического продукта диоксида циркония (ZrO_2) (до удельной поверхности порядка 6–8 тыс. $см^2$/г) значительно повышает коммерческую ценность этого микропорошка на рынках сбыта.

В микронизированном продукте синтетических алмазов Полтавского алмазного завода согласно техническим требованиям должно содер-жаться фракции менее 5 мкм не менее 85 %, а фракции 3–2 мкм - 8–10 %. Испытаниями установлено, что продукты циклона струйного измельчителя содержат 80,1–87,5 % фракции менее 5 мкм и 14,9–21,5 % фракции 3–2 мкм. При этом средний размер частиц продукта циклона составляет 3,3–3,7 мкм; продукта фильтра – 0,68–1,6 мкм при содержании в нем 90,9–100 фракции - 5 мкм и фракции 3–2 мкм в количестве 10,1–24,2 %. Соотношение масс продуктов циклона и фильтра составило соответственно 80–85 % / 20–15 %. В оптимальных режимах удельная поверхность продуктов струйного измельчения изменялась в диапазоне: продукт циклона S = 0,7–1,07 $м^2$/г; продукт фильтра S = 2,3–3,0 $м^2$/г.

Анализ микрофотографий исходного и измельченных порошков показал, что по сравнению с исходным материалом форма частиц продуктов струйной обработки становится в большей степени овализованной или почти округлой: коэффициенты формы частиц фракций 10–7; 7–5; 5–3 мкм составили величину в диапазоне 1,3–1,36. На рис. 2 показаны образцы записей на приборе "MALVERN" суммарных и частных характеристик дисперсности алмазных порошков, где иллюстрируется изменение их формы в зависимости от среднего размера частиц и содержания в продукте фракции менее 5 мкм.

Испытания измельченных порошков на абразивную способность, шероховатость поверхности, содержание примесей, коэффициент формы были проведены согласно ГОСТу 9206-80. Сделано заключение о том, что показатели микропорошков струйного помола удовлетворяют нормативам.

Проведенное исследование показало целесообразность использования струйной технологии для доводки до микропорошков синтетического алмазного сырья Полтавского алмазного завода.

Результаты проведенного анализа, исследований, производственных испытаний измельчаемости и переработки измельченного минерального сырья позволили раскрыть технологические возможности струйных измельчителей. Технология струйного измельчения рекомендуется для получения высокодисперсных активированных порошков из многих видов минерального сырья и синтетических материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горобец Л.Ж.* Технология микронизации порошков в режимах высокодинамичной обработки // Матер. комплекса научн. мероприятий стран СНГ. "Механическая обработка дисперсных (сыпучих) материалов и сред. - Одесса. - 1997. - С. 12-14.

2. *Горобец Л.Ж.* Газодинамическая технология измельчения материалов в режимах высоких давлений // ГИАБ. – 2000. - № 4. – С. 231-233.

3. *Горобец Л.Ж., Пилов П.И.* Механизм и физические закономерности тонкого измельчения //Тонкоизмельченные и ультрадисперсные материалы в промышленности (производство и применение): Материалы 1-й междунар. научн.-практ. конф. – Санкт-Петербург: "ИВА", 2003. - С. 3-7.

4. *Горобец Л.Ж., Головач А.Г., Ежов А.Г.* Обоснование конструктивной схемы и расчетных параметров устройства для подготовки энергоносителя газоструйных мельниц //Збагачення корисних копалин. – 1999. – № 5 (46). – С.64-72.

5. *Ежов А.Г., Горобец Л.Ж.* Новая компоновка гравитационного классифи-катора при струйном измельчении //Збагачення корисих копалин. - 2005. - № 24 (65). - С. 32-35.

6. *Горобец Л.Ж.* Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых. Автореферат дисс. д-ра техн. наук: НГУ: Днепр-ск. – 2004. - 35 с.

7. *Горобец Л.Ж.* Изучение фундаментальных закономерностей энергетики измельчения // Збагачення корисих копалин. - 1998. - № 2. - С. 36-43.

8. *Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Гаевой В.В.* Анализ характеристик крупности сыпучих материалов с позиций принципа автомодельности разрушения // Збагачення корисних копалин. - 2003. – № 15. – С. 136 - 142.

9. *Верхоробина И.В., Горобец Л.Ж.* Новый метод исследования процесса измельчения //Теорія і практика процесів подрібнення, розділення, змішування і ущільнення: Зб. наук. праць.- Одеса: ОНМА, 2003. - Вип. 10. – С. 29-33.

10. *Горобец Л.Ж.* Новые представления о природе и механизме процесса измельчения // Обогащение полезных ископаемых. - 2003. – № 18 (59). – С. 51-55.

11. *Москалев А.Н.* Способы разупрочнения крепких горных пород. – К.: Наук. думка, 1988. - 204 с.

12. *Производство* тонкодисперсных материалов в установках струйного измельчения /Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Верхоробина И.В., Бредихин В.Е., Гришаков С.Н. //Тонкоизмельченные и ультрадисперсные материалы в промышленности (производство и применение): Материалы 1-й междунар. научн.-практ. конф. – Санкт-Петербург: "ИВА", 2003.-С. 18-22.

13. *Горобец Л.Ж.* Технологические преимущества струйного способа измельчения минерального сырья // Тез. докл. конф. «Интенсификация подготовительных магн. и гравитац. процессов обогащения. – М., 1980. – С. 28-30.

14. *Об эффективности* использования струйного измельчения при подготовке руд и концентратов к обогащению и металлургической обработке / Бортников А.В., Телегин М.О., Беликов В.В., Горобец Л.Ж., Кучаев В.А.// Обогащение руд. – 1996. - № 5.- С. 3-6.

15. *Способ* переработки молибденитсодержащих вольфрамовых концен-тратов: А.с. 1338420 СССР, МПК С 22b 61/02/А.В. Бортников, В.В. Беликов, Л.Ж. Горобец и др. (СССР).- №3810842; Заявлено 10.11.1984; Опубл. 15.05.1987,Бюл.№ 3. – 4 с.

Коротко об авторах

Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Верхоробина И.В. – Национальный горный университет, Институт геотехнической механики, г. Днепропетровск, Украина.