

## Влияние способа дезинтеграции руды на извлечение благородных металлов

**А.В. Артамонов** — к.т.н., главный технолог ЗАО «Урал-Омега»  
**Е.В. Колодежная** — к.т.н., заместитель главного технолога технол. ЗАО «Урал-Омега»  
**Д.Д. Ультаракова** — главный металлург ТОО «Орион Минералс», Казахстан  
**Л.С. Болотова** — к.х.н., заведующая лабораторией технологии благородных металлов ДГП ГНПОПЭ «Казмеханобр», Казахстан  
**В.Б. Начаров** — главный обогатитель ООО «Березовский рудник»

В последнее десятилетие значительно возросла доля золота, выделяемого из труднообогатимых и упорных руд, с преобладанием тонкого и тонкодисперсного золота. Более тесная связь золота с сульфидами, сложные структуры замещения основных золотоносных сульфидов являются не вполне благоприятными для освобождения и концентрирования золота. Полнота извлечения золота будет определяться и полнотой извлечения сульфидов. В этих условиях действующие предприятия вынуждены повышать эффективность обогатительного производства путем рационального использования минерально-сырьевых ресурсов и максимально возможного извлечения золота на всех стадиях его переработки.

В используемых горно-перерабатывающей промышленностью дробилках и мельницах куски рудной массы разрушаются раздавливанием, истиранием и ударом. Раздавливание и истирание, наиболее энергетически затратные способы разрушения, так как этим процессам горные породы оказывают наибольшее сопротивление. При раздавливании и истирании частицы благородных металлов (мягкие и ковкие) деформируются в большей степени. Они раскатываются в тонкие непрочные пластинки, в которые вдавливаются частицы других минералов, при этом за счет эффекта «развальцовывания» в процессе измельчения руд может теряться до 20 % высокопробного золота. «Развальцованное» золото оказывается недоступным для прямого извлечения методами гравитации и флотации, что приводит к нарушению

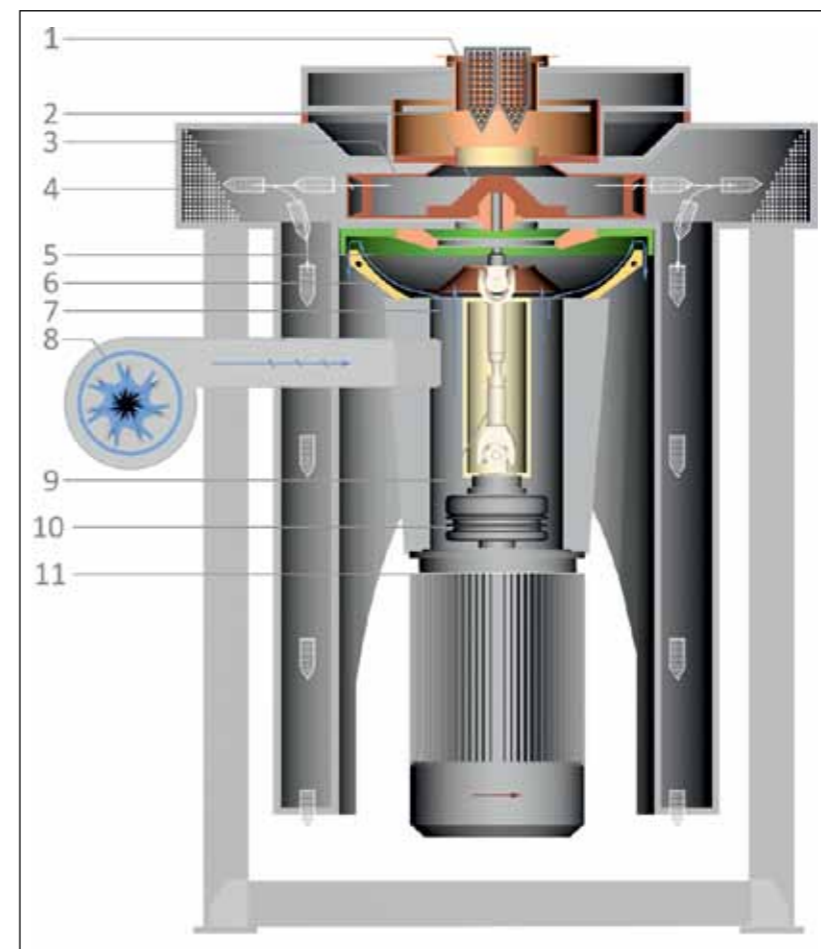
селекции при последующем обогащении и увеличению потерь благородных металлов в хвостах.

На наш взгляд ударный способ разрушения минералов включает в себе огромный резерв повышения производительности обогатительного оборудования, повышение качества конечной продукции, снижение энерго- и материалоемкости процессов обогащения. В центробежно-ударных дробилках силовые взаимодействия обусловлены торможением куска материала на инструменте. Исходный материал через воронку подается на разделительный конус и равномерно распределяется по каналам ускорителя. Затем, получив необходимую окружную скорость для выброса, кусок ударяется о поверхность камеры дробления и дробится. При этом в куске материала возникают силы инерции, обусловленные резким торможением куска на поверхности камеры дробления и направленные к поверхности камеры. Следует также отметить, что чем больше различия плотности и объема включений ценного компонента и зерен породных минералов, тем больше различия возникающих в различных фазах материала сил инерции и распределенный характер этих сил способствуют тому, что в процессе центробежно-ударного дробления в куске возникают как нормальные напряжения, обусловленные сжатием  $\sigma_{сж}$ , так и нормальные напряжения, вызванные изгибом  $\sigma_{из}$ . При этом интенсивность последних превышает  $\sigma_{сж}$ . Зона действия напряжений значительно расширяется. Следовательно, вероятность разрушения по трещинам,

находящимся в этой зоне, повышается. Данное обстоятельство, при прочих равных условиях, позволяет обеспечить разрушение породы при более низких значениях ускорений, а, следовательно, и меньших энергетических затратах. Таким образом, обеспечивает лучшие условия для раскрытия зерен тяжелых минералов, каковыми являются практически все минералы благородных металлов. По этой причине высвобождение золота от сростаний с жильными и породными минералами происходит раньше, при большей крупности зерен измельчаемой руды, чем при шаровом измельчении. Для обеспечения достаточно полного раскрытия зерен золота и высвобождения их от сростаний с жильными минералами не требуется такое тонкое измельчение, как при использовании шаровых мельниц.

Также при свободном ударе кусков руды друг о друга или о преграду практически не возникают условия для расплющивания ковких минералов или для их наклепа на рабочие органы дробилки-мельницы. Отсутствие наклепа золота при центробежно-ударном измельчении создает заведомо лучшие условия для более полного извлечения благородных металлов гравитационными и флотационными методами, чем в случае шарового измельчения при одинаковой тонине помола.

Получаемая в результате центробежно-ударного дробления крупность рудного материала эффективна для дешевого гравитационного процесса, в результате которого можно извлечь высвободившееся золото и его сростки



**Рис. 1. Принцип действия Центробежной Дробилки ДЦ:**  
Вентилятором высокого давления (8) в камере (7) создается давление воздуха, необходимое для всплытия ротора (5) и образования «газового подшипника» системы. Карданная передача (9) приводит в движение рабочий орган дробилки, вращая ускоритель. Исходный продукт дробления через воронку (1) подается на разделительный конус (2) ускорителя. Получив необходимую окружную скорость для выброса, материал выбрасывается в камеру дробления (4).

с другими минералами в концентрат. Тем самым достигается не только резкое снижение затрат на электроэнергию, но и исключается источник значительных потерь драгоценного металла, а также загрязнение руды железом из-за так называемого «намола». Одновременно повышается степень раскрытия частиц золота и сопутствующих минералов.

Стадиальное доизмельчение продуктов и поцикловое обогащение позволяет наиболее полно извлечь металл. Кроме собственно сокращения объема переработки руды путем предварительного обогащения ее на стадии дробления (что важно для любой рудоподготовки), сухой способ может быть интересен в случаях:

- низкого содержания полезных компонентов в руде, требующих сокращения объема переработки на стадии предварительного дробления для повышения экономичности ее последующего обогащения каким-либо «мокрым» способом;

- наличия проблем с водой в районе месторождения (засушливый район или суровый климат с длительной зимой);
- отсутствия в районе мест для эффективного размещения пульпового хвостохранилища (горный район) и т.п.

Целесообразность применения центробежно-ударных дробилок при разработке схем рудоподготовки золотосодержащих руд была неоднократно доказана в лабораторных испытаниях. Так при изучении закономерности дезинтеграции медно-серебряных и золото-кварцевых руд в аппаратах центробежно-ударного типа доля раскрытого золота в измельченном материале увеличивается с 5 до 25% по сравнению с традиционными щековыми дробилками и мельницами.

Медно-серебряная руда одного из месторождений представлена сидеритовыми жилами с сульфидами, которые залегают в практически безрудных

аргиллитах и алевролитах. Содержание сульфидов составляет около 5%, из которых на долю серебросодержащего тетраэдрита приходится до 60%, в меньшем количестве присутствуют арсенопирит, халькопирит и др. Физические свойства основного породообразующего минерала — сидерита и рудных минералов (тетраэдрита и халькопирита) очень близки. Они обладают почти одинаковыми твердостью (3,5–4 ед. по шкале Мооса), плотностью (4–5,4 г/см<sup>3</sup>) и электромагнитными свойствами (являются диамагнетиками). В то же время кварц с тонкими включениями арсенопирита, аргиллиты и алевролиты обладают меньшей плотностью и большей твердостью. Следует также отметить, что рудные минералы настолько тесно взаимно прорастают, что механическим способом можно выделить только коллективный сульфидный концентрат.

Испытания проходили в лаборатории ЗАО «Урал-Омега» (г. Магнитогорск) и включали следующие этапы: проба руды крупностью менее 25 мм после усреднения и квартования делилась на две пробы, одна из которых поступала на щековую дробилку, а другая на центробежно-ударную. Дробление осуществлялось до крупности -3 мм, после чего производилась сухая классификация руды на классы -3+1 и -1+0 мм. Материал крупностью -3+1 мм поступал на сепарацию, класс крупности -1+0 мм — на мокрую классификацию. Полученные технологические продукты анализировались — определялся их минеральный и химический состав, проводилось изучение сростков по качеству.

По данным минералогических исследований зерна дробленого материала были подразделены на 5 групп: 1 — свободные зерна сидерита; 2 — бедные сростки с содержанием сульфидов от 2 до 5%; 3 — сростки, в которых содержание сульфидов составляет от 5 до 20%; 4 — сростки сульфидов с нерудными в соотношении 1:1 (в основном тетраэдрит + сидерит), 5 — агрегаты рудных минералов.

Качество раскрытия сростков определялось по изображениям брикетов, изготовленных из всех классов крупности, с применением опико-геометрического метода анализа изображений на отечественной системе «Видео-Мастер». Всего было проанализировано по 1500 зерен из каждого продукта. Установлено, что дроблений в различных аппаратах материал различается по количеству и качеству сростков. Наибольшие различия, говорящие в пользу центробежно-ударного дробления, отмечены в крупности -0,5+0,25 мм. Так, после центробежно-ударного дробления количество зерен свободно-



Рис. 2. Центробежная дробилка.

Класс	Содержание, мг/л	Извлечено, г/т	Содержание в хвостах, г/т	Всего, г/т	Извлечение, %
- 0,4 + 0,1	0,6	1,8	0,3	2,1	85,7
- 0,1 + 0,0	0,7	2,1	0,3	2,4	87,5

Табл. 1. Результаты цианирования.

го от сростков сидерита составляет 85% против 75,7% после дробления в щековой дробилке, агрегатов рудных минералов — 6,7 против 4,5%, сростков с различным содержанием рудных минералов, напротив, меньше — 3,7–4,4% против 7,5–12%. Технологические испытания по отсадке дробленого материала показали, что более селективное раскрытие сульфидов при центробежно-ударном дроблении позволяет повысить их извлечение в концентрат на 7,8%.

В исследуемой пробе золото-сульфидных руд из рудных минералов преобладает пирит; в резко подчиненном количестве находятся пирротин, халькопирит и арсенопирит, а сфалерит, галенит и марказит относятся к редко встречающимся минералам в руде. В составе породообразующих минералов преобладают глинисто-слюдястые (преимущественно серицит, в меньшей степени биотит и каолинит), а также кварц, альбит, амфиболы, карбонаты. Содержание углеродистого вещества до 5%.

Самородное золото присутствует в руде как свободное, так и в сростках с арсенопиритом, пиритом, пирротинном, а также в виде включений в пирите и арсенопирите. Форма самородного золота чаще всего комковидная, интерстициальная, что обусловлено выделением его в микротрещинках и пустотах

пирита и кварца. Включенное в пирит золото имеет размер от 5 до 40 мкм, располагается как в центре зерен пирита, так и в краевой части. Практически все обнаруженные золотины имеют в той или иной степени открытую поверхность.

В ЗАО «Урал-Омега» пробу руды подвергали механическому разрушению двумя способами: центробежно-ударным и в щековой дробилке до крупности -5 мм. Материал крупностью -5+3 и -3+1 мм обогащали на отсадочных машинах с последующим доизмельчением концентратов отсадки и доводкой их на концентрационном столе. Полученные в результате выполненных операций продукты изучали в протоколках под биноклем на предмет обнаружения свободного золота, а также для сравнения характерных особенностей минералов и их поверхностей, образовавшихся после механического воздействия на руду различными способами дробления.

Минералогическими исследованиями установлено различие в облике зерен пирита. После дробления руды в щековой дробилке поверхность пирита становится неровной, с раковистым сколом, пирит из продукта центробежно-ударного дробления остается идиоморфным (куб со штриховкой на гранях) с чистой поверхностью. Следует отметить, что золотины после щеково-

го дробления приобретают заметно уплощенную форму. Такие морфометрические параметры золотин, как крупность и форма, определяют выбор способов для их извлечения. Комковидная и изометричная форма частиц золота способствуют лучшей обогатимости руды гравитационными способами, а чистая поверхность пирита повышает его флотуемость, что в совокупности показывает преимущества центробежно-ударного способа дробления перед традиционным для данного типа руд.

Определение влияния рудоподготовки на извлечение золота методом цианирования было проведено на рудах Березовского месторождения.

На испытания подавалась золотосодержащая руда после мелкого дробления крупностью менее 25 мм, с содержанием золота 2,2 г/т. После дробления на центробежно-ударной дробилке ДЦ-0,36 руда была расклассифицирована в каскадно-гравитационном классификаторе КГ с получением продуктов крупностью -0,4+0,1 мм 0,1-0 мм. Навески руды на цианирование встряхивали в колбе в течение 20 часов при отношении Ж:Т = 3:1. По окончании цианирования кек фильтровали, промывали, сушили и пробирной плавкой определяли содержание золота в хвостах. В растворах золото определяли методом атомной адсорбции (таблица 1).

Результаты таблицы показывают эффективность прямого цианирования руды после дробления на центробежно-ударной дробилке хорошими показателями извлечения золота: извлечение золота в концентрат составило — 86%, содержание золота в хвостах цианирования — 0,3 г/т.

При испытаниях эффективности подготовки золотосульфидных одного из месторождений к кучному выщелачиванию с использованием центробежно-ударной дробилки была доказана целесообразность и экономическая эффективность данного способа рудоподготовки.

Золотосульфидные руды перерабатываемого месторождения представляют собой метасоматически измененные породы с редкой (3–6%, в обогащенных участках до 10%) вкрапленностью сульфидных минералов. Среднее содержание золота в сульфидных рудах составляет 2,11–2,15 г/т.

Существующая технология рудоподготовки предусматривает три стадии последовательного дробления золото-сульфидной руды с выделением после каждой стадии готового по крупности продукта. Исходная круп-

ность перерабатываемого материала составляет 200 мм с получением дробленного продукта с минимальной крупностью 15 мм. Переработка руды такой крупности по технологии кучного выщелачивания экономически нецелесообразна.

Ввиду невозможности получения на существующем традиционном дробильном оборудовании производства готового материала крупностью -5 мм, соответствующего условиям выщелачивания, было принято решение проводить испытания на дробилках ударного действия как наиболее энергоэффективных аппаратах. В лаборатории ЗАО «Урал-Омега» были проведены полупромышленные испытания по дезинтеграции пробы руды данного месторождения массой 200 кг на центробежно-ударной дробилке ДЦ-0,4.

В процессе испытаний было выявлено, что рудоподготовка в центробежно-ударных дробилках наиболее эффективна для кучного выщелачивания сульфидной руды перерабатываемого месторождения. Так в результате перколяционного цианирования установлено, что по существующей схеме рудоподготовки (крупности дробленой руды менее 15 мм) извлечение золота в раствор составило лишь 26,96% при содержании золота в хвостах 1,54 г/т. Для пробы, дробленной до крупности минус 5 мм на щековой дробилке, извлечение золота в раствор составило 46,93% при содержании металла в хвостах цианирования 1,13 г/т. Из параллельных проб, подвергнутых однократному дроблению на центробежно-ударной дробилке, извлечение золота в раствор составило 46,27% и 47,44% при содержании в хвостах 1,12 г/т и 1,13 г/т соответственно. Из параллельных проб, дробленных до крупности минус 5 мм на центробежно-ударной дробилке, извлечение золота в раствор достигло 60,28% и 56,79% при содержании металла в хвостах 0,87 и 0,89 г/т, т.е. прирост извлечения золота при одинаковой крупности составил выше 10%.

На основании результатов испытаний эффективности додробления руды данного месторождения на центробежно-ударной дробилке с целью повышения технико-экономических показателей последующего кучного выщелачивания руководством компании было принято решение о внесении изменений в существующую схему рудоподготовки. На настоящий момент были проведены пуско-наладочные работы и запущены в эксплуатацию центробежно-ударные дробилки в качестве аппаратов четвертой стадии дробления рудоподготовительного цикла.



Рис. 2. Центробежная дробилка.



Рис. 3. Центробежная дробилка.

При проведении полупромышленных испытаний кучного выщелачивания золотосульфидных руд одного из месторождений Казахстана также установлено, что основное влияние на показатели кучного выщелачивания оказывает предварительная подготовка руды к выщелачиванию и соответственно крупность дробленой руды.

Промышленно-ценное значение в руде представляет только золото, содержание которого, по данным пробирного анализа, составляет 1,09 г/т.

Золото присутствует в виде включений в пирите и в промежутках между его кристаллами. Состав золотин: золото 92,98%; серебро 5,52%; железо 1,49%. Сопутствующие рудные минералы — пирит, магнетит, гематит и гидроксиды железа. Вмещающие породы представлены сланцами, брекчией, алевритопелитами с прожилками кварца и кальцита. По содержанию сульфидной серы (1,14%) пробу можно отнести к категории малосульфидных руд, по степени окисления серы (5,79%) руда относится к первичным рудам. ▶



Класс	Содержание, мг/л	Извлечено, г/т	Содержание в хвостах, г/т
<b>Одинарное дробление на щековой дробилке, крупность -20 мм</b>			
-20+10	58,36	0,4	15,79
-10+5	21,82	4,3	63,54
-5+2,5	8,61	0,94	5,49
-2,5+1,2	1,4	1,16	0,88
-1,2+0,63	2,2	1,42	2,1
-0,63+0	7,61	2,36	12,20
Руда	100,0	1,476	100,0
<b>Двойное дробление на щековой и центробежно-ударной, крупность -15 мм</b>			
-15+10	12,39	0,82	6,49
-10+5	25,79	0,62	10,21
-5+2,5	21,52	2,38	32,72
-2,5+0,63	17,46	1,08	12,05
-0,63+0	22,84	2,64	38,53
Руда	100,0	1,56	100,0

Табл. 2. Результаты мокрых ситовых анализов проб дробленной руды по различным схемам.

Наименование показателей	Крупность руды		
	-20 мм	-15 мм	-15 мм
Извлечение золота сорбентами: г/т %	0,347 29,28	0,525 42,68	0,631 48,80
Извлечение золота на операции водной отмывки, г/т руды	0,005	0,008	0,007
Выведено золота с анализируемым раствором и последним раствором после сорбции и для насыщения сорбента, г/т руды	0,020	0,037	0,021
Содержание золота в хвостах колонного выщелачивания, г/т	0,813	0,660	0,634
Расчетное содержание золота в руде, г/т	1,185	1,23	1,293
Степень растворения золота из руды, %	31,39	46,34	50,97

Табл. 3. Баланс золота в колонных тестах.

Результаты лабораторных бутылочных тестов цианирования измельченной руды показали, что золото в руде, в основном, представлено свободным и в сростках с минералами, т.е. в формах, доступными для цианидного раствора. При крупности 90% класса -0,074 мм растворяется 79,57%, содержание золота в хвостах цианирования составляет 0,29 г/т. Однако, было установлено, что степень растворения золота из руды в значительной степени зависит от её крупности.

Для проведения колонных тестов кучного выщелачивания было проведено два варианта подготовки руды:

- дробление руды на щековой дробилке до -20 мм;
- дробление руды на щековой дробилке до -20 мм и додразбивание ее на центробежно-ударной дробилке до -15 мм.

Определены ситовые характеристики дробленной руды по различным схемам с распределением золота по классам крупности (таблица 2).

Результаты таблицы показывают, что после дробления на центробежно-ударной дробилке произошло существенное уменьшение крупных кусков руды и перераспределение золота в более мелкие классы крупности руды. Так, при дроблении только на щековой дробилке основное количество золота (79,33%) находится в классе +5 мм. При додразбивании на центробежно-ударной дробилке основное количество золота (83,3%) перераспределяется в класс -5 мм, что обусловит более высокие показатели растворения золота.

Из опыта работы участков кучного выщелачивания известно, что для данного процесса критическим классом крупности является крупность менее 2,5 мм. Содержание материала такой крупности в руде более 15,0% делает его не пригодным для кучного выщелачивания без предварительного окомкования в основном из-за малой скорости перколяции раствора через слой руды в штабеле.

Из результатов таблицы видно, что после одинарного дробления на щековой дробилке до крупности -20 мм содержание критического класса крупности составляет 11,21%, что приемлемо для перколяции. Руда после двойного дробления сначала на щековой, а потом на центробежно-ударной дробилке ДЦ до крупности минус 15 мм может перерабатываться по технологии кучного выщелачивания только после окомкования. Расход цемента на окомкование составил 5 кг/т руды.

Проведено три колонных теста кучного выщелачивания:

- из руды после дробления на щековой дробилке до крупности -20 мм без окомкования, масса руды 57,3 кг;
- из руды после додразбивания на центробежно-ударной дробилке до крупности -15 мм с предварительным окомкованием руды с цементом, масса руды 51,3 кг;
- из руды после додразбивания на центробежно-ударной дробилке до крупности -15 мм с предварительным окомкованием руды с цементом, масса руды 708,5 кг (полупромышленный тест).

Результаты проведенных колонных тестов по кучному выщелачиванию золота из дробленной не окомкованной руды крупностью -20 мм и окомкованной руды крупностью -15 мм доказали, что подготовка руды к выщелачиванию оказывает значимое влияние на технологические показатели переработки (таблица 3).

По сравнению с дроблением на щековой дробилке степень растворения золота из руды возрастает после дополнительного дробления на центробежно-ударной дробилке с 31,39% до 46,34%. Повышенная степень растворения золота (50,97%) подтверждается и при проведении полупромышленного теста. Однако, для переработки руды после дробления на центробежно-ударной дробилке требуется дополнительное окомкование с портландцементом (5,0 кг/т). Расход цианида натрия небольшой — 0,16–0,30 кг/т.

Приведенные данные обосновывают интерес золоторудных предприятий к ударному измельчению руды, которое позволяет раскрыть ее полезные компоненты на большей крупности, еще на стадии дробления, существенно снизить операционные затраты на рудоподготовку и подойти к разработке месторождения на другом технико-экономическом уровне. Центробежно-ударное измельчение часто позволяет разрабатывать те месторождения, которые неэкономично разрабатывать, используя другие способы рудоподготовки. ♦



Цех обогащения хризотил-асбестовой руды: 36 единиц дробилок ДЦ

### Наши возможности

- Разработка и создание технологических линий и комплексных производств, проектирование, инжиниринг.
- Производство, поставка, монтаж, сервисное обслуживание дробильно-сортировочного, измельчительного и классифицирующего оборудования.
- Научно-техническая деятельность в области переработки рудных и нерудных материалов.
- С 1991 года более 300 производств используют наше оборудование и технологии для достижения наилучших результатов.

УНИКАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

### ДРОБЛЕНИЕ. ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ. КЛАССИФИКАЦИЯ



Стадия мелкого дробления  
Производительность до 400 т/ч

Получение до 4х классов продуктов в диапазоне 0-5(10) мм до 60 т/ч

Тонкое и сверхтонкое измельчение руд и материалов до 30 т/ч

Классификация порошков с границами разделения от 60 до 20 мкм до 20 т/ч

Выделение сверхтонких порошков -1...-20 мкм  
Производительность до 10 т/ч

#### Контакты:

Россия, 455037, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 89, стр. 7  
тел.: +7 (3519) 22-00-49, 22-00-51, 31-66-11, 31-66-00  
факс: +7 (3519) 43-71-11  
market@uralomega.ru

Узнайте больше на нашем сайте:

[WWW.URALOMEGA.RU](http://WWW.URALOMEGA.RU)

