

## ДВУХСТАДИЙНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ, КАК НАИБОЛЕЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНЫЙ ВАРИАНТ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВЕРХТОНКОГО ПОМОЛА ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. В. Постникова

*ИРИНА ВИКТОРОВНА ПОСТНИКОВА – кандидат технических наук, доцент кафедры Машин и аппаратов химических производств Ивановского государственного химико-технологического университета. E-mail: poirvic@mail.ru.*

*15300, Россия, Иваново, пр. Шереметевский, д. 7, Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ).*

*Представлена схема сверхтонкого измельчения, являющаяся, по мнению авторов, наиболее экономически выгодным вариантом в случае измельчения особо твердых материалов и материалов с высоким значением величины поверхностной энергии.*

**Ключевые слова:** сверхтонкое измельчение, твердый материал, напряжения, импульс.

## TWO-STAGE GRINDING AS THE MOST COST-EFFECTIVE OPTION FOR ORGANIZING THE PROCESS OF ULTRAFINE GRINDING OF SOLID MATERIALS

I. V. Postnikova

*7, Sheremetievskiy Avenue, Ivanovo, 153000, Russia. Ivanovo State University of Chemistry and Technology*

*The paper presents a scheme of ultrafine grinding, which, according to the authors, is the most cost-effective option in the case of grinding particularly hard materials and materials with a high value of the surface energy.*

**Keywords:** ultrafine grinding, solid material, stresses, impulse.

### Введение

В настоящее время все большую актуальность в различных отраслях промышленности приобретают сверхтонкие порошковые материалы, т.е. порошки с размером частиц  $< 10$  мкм. Порошки такой дисперсности нужны, например, в производстве консистентных смазок на основе графита, а также в порошковой металлургии для получения конечных изделий с надлежащими физико-меха-

ническими свойствами в производстве пигментов и красок, а также при обработке материалов с высокой удельной энергией поверхности, каковым является феррит стронция, служащий для производства постоянных магнитов и требующий высокую тонины помола (90 %,  $\sim 1$  мкм).

В то же время получение тонкодисперсных материалов (с размером частиц от 1 мм до 1 мкм) является достаточно сложной задачей по причине резкого повышения прочности частиц по мере умень-

шения их размеров, так как отмечено, что при достижении размеров частиц равных размеру первичных кристаллов, их прочность возрастает в сотни раз по сравнению, например, с прочностью частиц миллиметровых размеров.

Удельные затраты энергии на тонну получаемой продукции очень сильно зависят как от линейного размера частиц получаемого продукта, так и от способа подвода механической энергии к измельчаемым материалам (вида нагружения), особенно при тонком и сверхтонком измельчении.

По этому признаку все мельницы можно разбить на три группы:

1. Мельницы с низкой скоростью деформирования с преимущественным нагружением раздавливанием, истиранием и низкоскоростным ударом, (шаровые, стержневые, бегуны, шарокольцевые, центробежные с раздавливающими роликами);

2. Мельницы со средней скоростью деформации, разрушающие частицы, в основном, стесненным ударом небольшой скорости и истиранием (вибрационные, магнитно-вихревые, центробежно-планетарные);

3. Мельницы с высокой скоростью нагружения, измельчающие материалы преимущественно свободным или стесненным ударом (ударно-отражательного действия и ударные мельницы, дезинтеграторы и дисмембраторы, молотковые, роторные и струйные мельницы).

В отдельную группу необходимо отнести мельницы мокрого помола, в которых интенсификация процесса измельчения осуществляется с использованием раскалывающего эффекта Ребиндера П.А.

Использование механической активации является одним из наиболее перспективных методов получения принципиально новых материалов с требуемыми свойствами. При этом механическая активация может выступать как вариант технологии изготовления и как способ подготовки и модификации исходного сырья.

### 1. Центробежно-планетарные мельницы

Центробежно-планетарные мельницы больше известны как измельчители лабораторного типа с большим центробежным ускорением. В измельчителях этого типа барабаны с шарами и измельчаемым материалом совершают два вращения: вокруг оси барабана и вокруг оси вала привода.

В настоящее время известны центробежно-планетарные мельницы с двумя, тремя и четырьмя барабанами. В зависимости от режимов планетарного движения барабанов измельчение может осуществляться как за счет раздавливания и истира-

ния частиц, так и за счет ударного и истирающего воздействия шаров. В работающих машинах развиваются большие ускорения центробежных сил, за счет чего скорости измельчения в этих мельницах очень высокие.

Сейчас выпускаются серийные центробежно-планетарные машины с тремя барабанами и производительностью до 5,5 т/ч [2], что свидетельствует о хороших перспективах развития мельниц этого типа.

К недостаткам машин необходимо отнести большой износ измельчающих шаров и стенок корпуса, загрязнение измельчаемых материалов продуктами износа, сложность и малая механическая надежность конструкции при больших производительностях.

### 2. Мельницы ударного и ударно-отражательного действия

Мельницы ударного и ударно-отражательного действия подразделяются на две большие подгруппы:

- мельницы, в которых высокоскоростное ударное нагружение измельченные частицы получают от вращающихся молотков, ударных элементов или бил;
- мельницы струйной энергии, в которых измельчаемые частицы разгоняются до высоких скоростей (более 150 – 300 м/с) сжатым газом или паром и сталкиваются друг с другом.

К недостаткам измельчителей первой подгруппы необходимо отнести быстрый износ рабочих органов: молотков, бил, ударных элементов при измельчении твердых материалов.

Все они могут быть по реализации процесса внутренней сепарации измельчаемых частиц подразделены на две группы:

- мельницы ударного и ударно-отражательного типа без развитой внутренней сепарации;
- мельницы с развитой внутренней сепарацией.

В свою очередь, мельницы струйной энергии, или чаще их называют струйные мельницы, по конструктивному оформлению камеры измельчения и способу разгона измельчаемых частиц до высоких скоростей подразделяются на четыре группы:

- противоточные струйные мельницы;
- О-образные или кольцевые струйные мельницы;
- мельницы с плоской размольной камерой;
- струйные измельчители с псевдооживленным слоем.

Исследованиями, проведенными в ИГХТУ [3] показано, что критическая скорость ударного нагружения зависит от прочности измельчаемых частиц и их размера, причем при уменьшении линей-

ного размера критическая скорость существенно возрастает. Под критической скоростью понимается такая скорость удара, при которой 50 % частиц данного размера разрушаются.

Поэтому не случайно появилась целая серия многоступенчатых мельниц ИГХТУ [4, 5] ударно-отражательного действия, у которых по мере уменьшения линейных размеров измельчаемых частиц скорость ударного нагружения увеличивается.

Линейная скорость ударного нагружения на последней ступени измельчения в данной машине поддерживается выше критической для заданного размера частиц продукта, что гарантирует практически 100 % вероятность разрушения частиц с размерами более заданного.

В таблице 1 приведены некоторые технико-экономические показатели мельницы ударно-центробежного действия ИГХТУ.

Даже без развитой внутренней сепарации в подобных мельницах возможно достичь высокой степени измельчения  $i = 50$  – более 250 при малых удельных энергозатратах.

Еще более высокие технико-экономические показатели имеют многоступенчатые мельницы ударно-отражательного действия ИГХТУ с развитой внутренней сепарацией измельчаемых частиц. В подобных машинах выгрузочный патрубок готового продукта смещается либо в центр крышки, либо к центру от отбойников на определенное расстояние.

### 3. Струйные мельницы

Производительность работающих в России струйных мельниц типа СП составляет 50–30000 кг/ч.

К недостаткам противоточных струйных мельниц по сравнению со струйными мельницами других конструкций необходимо отнести то, что крупность конечного продукта определяется эффективностью работы центробежного сепаратора, который, как показывает практика, не идеален, в связи с чем наблюдается проскок крупных частиц в готовый материал.

В ИГХТУ была разработана струйная мельница, в которой энергия разгоняющихся и сталкивающихся в струях частиц гасилась во взвешенном слое этих же частиц за счет интенсивного их истирания [6–8].

К достоинствам струйных мельниц с псевдооживленным слоем измельчаемых частиц необходимо отнести практически полное отсутствие загрязнения измельчаемого материала, так как футеровка у них практически не изнашивается.

Вторым достоинством этих мельниц по сравнению с другими струйными мельницами является меньший удельный расход энергии и, соответственно, энергоносителя, что, в свою очередь, уменьшает габариты пылеулавливающих устройств.

### 4. Мельницы мокрого помола

Мельницы с мелющими телами (шаровые, вибрационные и центробежно-планетарные) могут работать как в режиме сухого, так и мокрого измельчения.

Мокрое измельчение имеет свои достоинства и недостатки перед сухим измельчением.

Основные достоинства мокрого тонкого измельчения:

- отсутствие пыления;
- меньшее загрязнение измельчаемых материалов продуктами помола;

Таблица 1

Технико-экономические показатели центробежно-ударных мельниц

Измельчаемый материал	Размеры исх. материала, мм	Тонина измельчения, мкм	Производительность, кг/ч	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
Мел	Менее 8,0	100 % < 10	500	55
Известняк	Менее 5,0	100 % < 10	600	60
Мрамор	Менее 3,0	100 % < 30	1100	35
Мрамор	Менее 3,0	100 % < 8	600	68
Мрамор	Менее 3,0	100 % < 2	200	150
Гранит	Менее 1,0	100 % < 5	400	55
Кокс	Менее 2,0	95 % < 15	700	47
Сахар	Менее 3,0	100 % < 8	800	85
Тальк	Менее 0,5	100 % < 2	300	98

- возможность более тонкого измельчения в связи с устранением или резким уменьшением процессов агрегирования тонкодисперсных частиц в процессе измельчения с применением ПАВ (поверхностно-активных веществ), приводящих к хорошему смачиванию поверхностей измельчаемых частиц и возникновению эффектов расклинивания микро- и макротрещин (эффектов акад. П.А. Ребиндера);
- возможность измельчения термолабильных (термочувствительных) материалов.

Основным недостатком процесса мокрого измельчения является необходимость сушки продуктов измельчения в тех случаях, когда необходимо иметь тонкодисперсные порошки сухими. Сушка является очень энергоемким процессом, требующим, после ее осуществления, реализации процесса дезагрегирования в одной из мельниц ударно-отражательного действия.

Другим недостатком процесса мокрого измельчения может явиться дезактивация поверхностей измельченного материала вследствие сорбции ПАВ или других компонентов жидкостей, в которых осуществляется измельчение. В свою очередь, необходимо отметить, что подобный недостаток часто используют в положительных целях для получения новых композиционных тонкодисперсных материалов, «пришивая» на поверхности частиц в процессе измельчения нужный компонент, так как образующаяся новая поверхность частиц обладает сверхактивными свойствами.

Существующие измельчители в суспензиях можно условно по принципу создания разрушающих напряжений разделить на три группы: бисерные мельницы, коллоидно-кавитационные мельницы и электрогидравлические и магнито-вихревые измельчители.

### 5. Дисконные, коллоидно-кавитационные и роторно-пульсационные мельницы

Дисконные, коллоидно-кавитационные и роторно-пульсационные высокоскоростные мельницы или, как их еще называют – диспергаторы, в отличие от бисерных мельниц не имеют мелющих тел и осуществляют тонкое измельчение твердых частиц за счет создания больших сдвиговых напряжений в узком зазоре между вращающимся ротором и статором, а также за счет наложения на действующие сдвиговые напряжения мощных импульсных напряжений при схлопывании на измельчаемых частицах искусственно создаваемых кавитационных пузырьков.

Зазоры между ротором и статором в таких машинах стремятся выполнять как можно меньше

(0,05–1мм), что позволяет получать в суспензии высокие касательные напряжения сдвига ( $\tau_{сд}$ ):

$$\tau_{сд} = \mu \left( \frac{dV}{dr} \right)^n \quad (1)$$

где  $\mu$  – вязкость суспензий,  $\frac{dV}{dr}$  – скорость сдвига;

$n$  – показатель, зависящий от характера течения жидкостей в зазоре.

На рис. 1 представлена схема кавитационно-коллоидной мельницы, являющаяся дальнейшим развитием мельниц МКИ-160. Принципиальным отличием этой мельницы от МКИ-160 является наличие на роторе 4 и статоре 5 большого количества канавок 7 разных размеров и направлений относительно оси вращения. Мельница также имеет ударный элемент 1 для дезагрегации частиц в суспензиях.

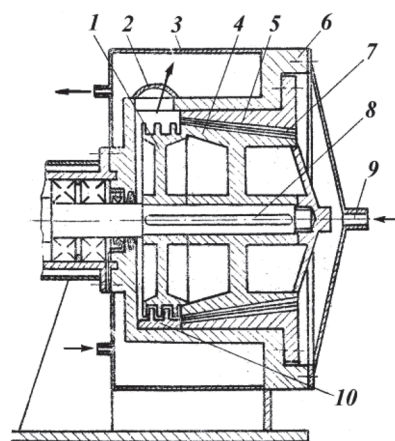


Рис. 1. Кавитационно-коллоидная мельница (А.с. № 651841 опубл. 15.03.79 г. Б.И. № 10)

- 1 – ударное устройство; 2 – выход суспензии; 3 – рубашка охлаждения; 4 – ротор; 5 – статор; 6 – корпус; 7 – канавки; 8 – вал; 9 – вход суспензии; 10 – контрударники

В последние годы стали развиваться роторно-пульсационные аппараты [9], в которых диспергирование мягких материалов в суспензии осуществляется, в основном, за счет схлопывания и пульсаций кавитационных пузырьков.

Специальными конструкциями измельчителей мокрого помола являются магнито-вихревые и электрогидравлические измельчители твердой фазы в суспензии. В первой группе машин измельчение осуществляется мелющими телами в вихревом слое, создаваемом либо магнитными частицами в электромагнитном поле, либо стальными

цилиндриками во вращающемся электромагнитном поле. Подобные измельчители нашли применение в России в процессе приготовления суспензии  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  для очистки вод от ионов тяжелых металлов.

Электрогидравлическое измельчение находится на стадии лабораторных исследований.

### 6. Двухстадийное измельчение

На основе проведенного анализа мирового опыта в области сверхтонкого помола, а также результатов наших собственных исследований, мы пришли к выводу, что попытка проведения процесса сверхтонкого (~1 мкм) измельчения в одну стадию будет неминуемо сопряжена либо с большим временем обработки материала (бисерные мельницы, шаровые мельницы, вибромельницы), либо с проблемой интенсивного подведения к материалу повышенной энергии (высокоскоростные центробежные мельницы, ПАРТ, кавитационно-коллоидные измельчители), что в свою очередь накладывает дополнительные требования к точности сопряжения и механической прочности узлов измельчителя.

В этом случае, логичным решением проблемы представляется двухстадийная схема сверхтонкого измельчения, в которой задачей первой ступени является развитие в частицах материала сложноподвижного состояния (механоактивация) в виде сети микро- и макротрещин. Тогда как вторая ступень служит для реализации уже созданных дефектов в измельчаемом материале.

При решении задачи конструктивного оформления стадий, мы предлагаем исходить из следующих соображений:

1) В измельчителе первой ступени должны реализовываться высокие нормальные напряжения и напряжения сдвига.

2) В измельчителе второй ступени должна быть высокой величина импульса, передаваемого частицам материала.

Исходя из этих соображений, в качестве измельчителя первой ступени предлагается использовать:

- валковую мельницу и разной скоростью вращения валков (наличие фрикции) рис. 2. Известно, что сдвиговые усилия в ней (а именно они играют решающую роль в развитии микромакротрещин) достигают значительных величин.
- центробежно-ударную мельницу с внутренней сепарацией.

В качестве измельчителей второй ступени мы использовали две оригинальные разработ-

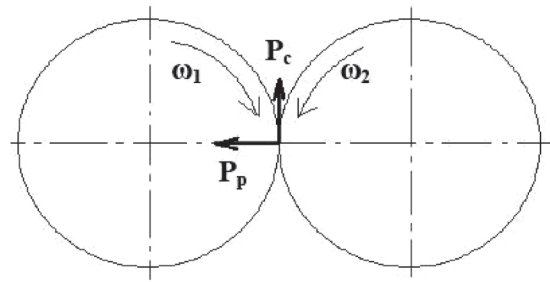


Рис. 2. Схема измельчения на валках с фрикцией

ки кафедры МАХП ИГХТУ: кавитационно-коллоидный измельчитель и высокоскоростная центробежно-ударная мельница с внутренней сепарацией. За счет особенностей конструкций и высоких рабочих скоростей (6–8 тыс. об/мин), в этих машинах реализуется высокоинтенсивное воздействие на обрабатываемый материал со значительным передаваемым импульсом.

Конструкции машин представлены на рис. 3 и рис. 4.

Кавитационно-коллоидная мельница мокрого помола состоит из двух рабочих роторов 4, 5, которые вращаются во взаимно противоположных направлениях. Роторы посажены на валы 14, 13, располагающиеся в подшипниковом узле 12. Для развития кавитационных явлений на внешнем роторе имеются канавки с внутренней стороны, а на внутреннем роторе с внешней стороны. Суспензия через патрубок 2 в передней крышке 1 попадает в зазор между роторами, который равен приблизительно 1 мм. Течение суспензии в данной мельнице между двумя конусообразными роторами складывается из 2-х наложенных друг на друга движений: 1-ое – чисто вращательное движение относительно оси симметрии мельницы; 2-ое – поступательный перенос жидкости параллельно оси мельницы.

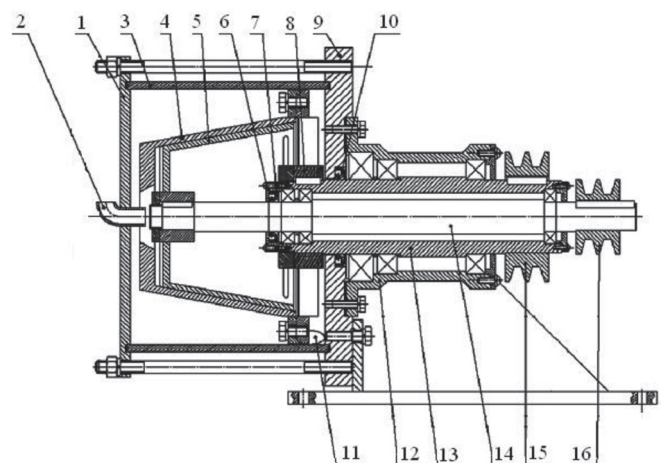
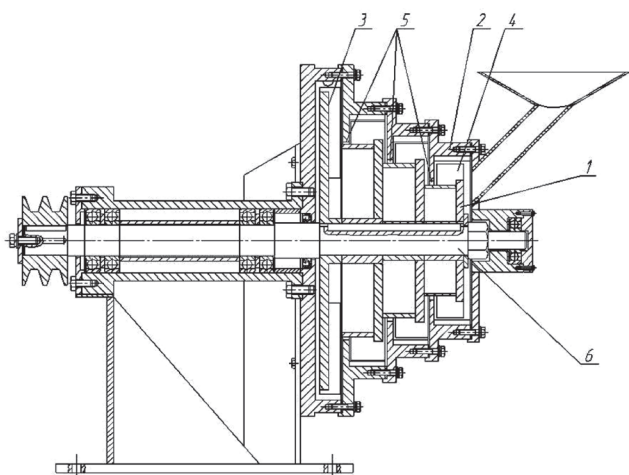


Рис. 3. Кавитационно-коллоидный измельчитель



**Рис. 4. Мельница с внутренней сепарацией**

1 – ротор; 2 – корпус мельницы; 3 – вентилятор с радиальными лопастями; 4 – била ротора; 5 – кольцевой зазор между корпусом мельницы и роторами

Максимальные сдвиговые напряжения, достигаемые при работе данной мельницы, составляют более 18 МПа.

Исходный материал через загрузочный патрубок подается в мельницу, где ударно нагружается за счет бил трех ступеней измельчителя, жестко закрепленных на дисках. Измельчаемый материал после удара билами вторично ударяется об отбойники, отражаясь от них, и за счет потока воз-

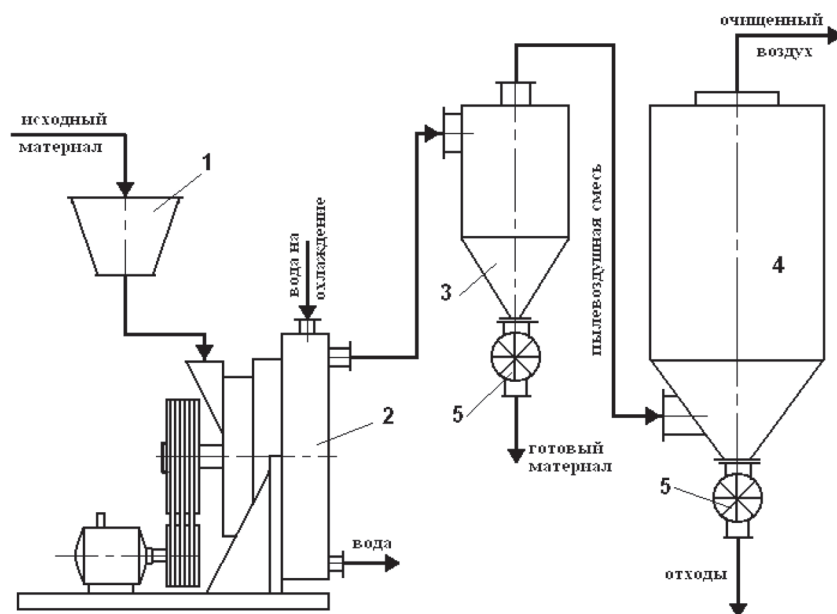
духа частицы перемещаются в осевом направлении, а мелкие частицы увлекаются им в кольцевой зазор, между корпусом мельницы и роторами, на вторую ступень, ротор которой имеет больший диаметр. В связи с увеличением диаметра роторов второй и, соответственно, третьей ступеней скорости ударного нагружения возрастают, за счет чего удаётся разрушить остающиеся крупные частицы и частицы средних размеров. Для увеличения производительности по продукту, расхода и напора воздуха в корпусе измельчителя установлен вентилятор с радиальными лопастями.

На кафедре «Машины и аппараты химических производств» ИГХТУ была проведена серия исследований процесса тонкого измельчения ферритостронциевого порошка. В настоящее время сверхтонкое измельчение ферромагнитных порошков осуществляется в атритторах периодического действия с большим временем пребывания материала.

Для получения готового продукта нами были предложены три принципиальные схемы измельчения: так называемым «сухим способом» (рис. 5), способом «мокрого» тонкого помола (рис. 6) и комбинированным способом.

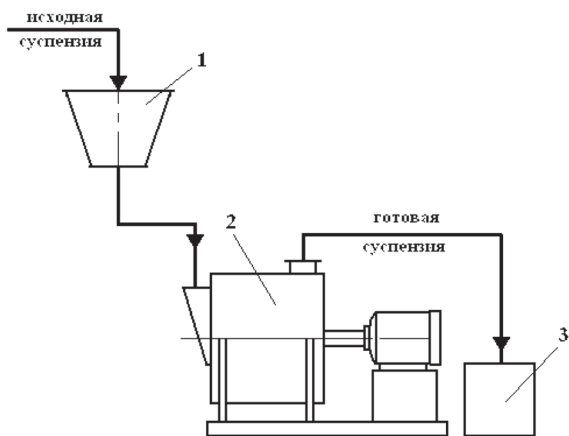
Предложена и реализована также комбинация этих двух способов с последовательным измельчением исходного порошка в центробежной ударной мельнице, а затем в кавитационно-коллоидной машине.

Полученные в результате измельчения порошки феррита стронция анализировались с помощью



**Рис. 5. Принципиальная схема сухого измельчения ферритстронциевых магнитов**

1 – бункер исходного порошка; 2 – высокоскоростная центробежно-ударная мельница; 3 – циклон-осадитель; 4 – рукавный фильтр; 5 – шиловые затворы



**Рис. 6. Принципиальная схема мокрого помола ферритстронциевого порошка**

1 – бункер исходной суспензии; 2 – лабораторная кавитационная мельница; 3 – сборник продукта

прибора «Анализетте-22» и на электронном микроскопе.

Анализ грансостава порошков проводился также с помощью электронного микроскопа ЭМВ-100Л (ускоряющее напряжение 50 кВ, разрешение 3Å). С помощью ультразвукового диспергатора УЗДМ–А была получена суспензия порошка в воде (в течение 30 с) при частоте излучения 22 кГц.

### Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что двухстадийная схема измельчения актуальна не только с точки зрения выигрыша по времени обработки и энергозатратам. Экспериментальные исследования показали, что комбинирование мельницы ударно-отражательного действия и коллоидно-кавитационного измельчителя – единственно возможный способ при измельчении особо прочных

материалов, а также при получении материалов с высокой удельной энергией поверхности, каковым, например, является феррит стронция, служащий для производства постоянных магнитов и требующий высокую тонину помола (90 %, ~1 мкм).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-03-00787.*

### Литература

1. Каталог Оборудование для тонкого измельчения, ЦИНТИхимнефтемаш. 1985.
2. Углеразмольное, рудоразмольное и пылеприготовительное оборудование: отраслевой каталог. – М.: НИИ экономики в энергетическом машиностроении. 1986. 161 с.
3. Блиничев В.Н. Разработка оборудования и методов его расчета для интенсификации процессов тонкого измельчения материалов и химической реакции в твердых телах. – дисс. на соиск. уч. ст. доктора техн. наук. Иваново. 1975. 318 с.
4. А.с. №671839 по заявке Б.И. №23. 1979 г. Центробежная ударная мельница. Блиничев В.Н., Гуямджян П.П., Воскресенский А.Н., Клочков Н.В.
5. А.с. №874171 по заявке №2744994 Оpubл.Б.И. №39, 1981 г. Мельница для измельчения сыпучих материалов. Блиничев В.Н., Лапшин В.В., Богородский А.В., Шигина Г.Г.).
6. А.с. №1082483 Способ измельчения зернистого материала, Смирнов Н.Ю., Блиничев В.Н., Афонин С.Б. и др. Б.И. №12. 1984.
7. А.с. №1721890 Противоточная струйная мельница, Колобердин В.И., Блиничев В.Н., Афонин С.Б., Постникова И.В. и др. 1990.
8. А.с. №1823229 Способ измельчения минерального сырья, Колобердин В.И., Блиничев В.Н., Афонин С.Б., Постникова И.В. и др. Б.И. №10. 1992.
9. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика. М.: Машиностроение-1. 2001. 300 с.