

УДК 621.926

## СТРУЙНЫЕ МЕЛЬНИЦЫ

И.В. Постникова, В.Н. Блиничев

*Ивановский государственный химико-технологический университет*

Я. Кравчик

*Краковская Политехника, г. Краков, Польша*

**В статье приводится сравнительный обзор конструкций струйных измельчителей для зернистых материалов. Рассмотрены достоинства и недостатки различных типов мельниц.**

**Ключевые слова:** струйное измельчение, тонкое и сверхтонкое измельчение.

Для тонкого измельчения зернистых материалов применяются различные типы измельчителей: шаровые, вибрационные, шаро-кольцевые, бисерные, коллоидные, струйные и мельницы ударно-отражательного действия, имеющие широкую область применения (табл. 1).

В последнее время все большее

внимание уделяется мельницам ударного действия и струйным мельницам, которые характеризуются высокой чистотой продуктов, большими степенями сухого измельчения, малой металлоемкостью, большой удельной производительностью и сравнительно низкими удельными затратами.

Таблица 1

Области применения струйных мельниц для сверхтонкого помола

Отрасль промышленности	Измельчаемый материал
Атомная	Ториевые материалы
Лакокрасочная	Пигменты, красители
Разные отрасли химической	Аппатит, фосфорит, тальк, слюда, мел, силикагель, пластмассы, естественные и искусственные смолы, каучук, органические химикалии
Металлургическая	Аллюминий, чугун, свинец, окислы железа, железная руда
Горно-рудная, строительная, текстильная, бумажная, керамика и огнеупоры	Графит, известняк, мел, бетонит, торф, полевой шпат, магнезит, кизельгур, фосфаты, глина, барит, диатомит, цирконий, целлюлоза, древесина, отбеливатели
Пищевая	Злаки, крупы, сушеные овощи, орехи, какао-бобы, горох, бобовые, кормовые добавки, кислоты жирного ряда
Фармацевтическая	Лекарственные растения, пенициллин, стрептомицин, сульфодиазин и др.
Сельское хозяйство	ДДТ, ВНС, оксихлорид меди, линдан, тиокарбонат – ядохимикаты; кормовое зерно, кормовые добавки
Другие	Корунд, пробка, древесина, сырье для косметических продуктов, сернокислый кальций и др.

К настоящему времени разработаны элементы теории и методика расчета различных типов струйных мельниц. Исследования в этой области продолжаются и сейчас. Их целью является повышение эффективности тонкого измельчения и снижение стоимости измельчителей, уменьшение удельных энергозатрат, износа и металлоемкости мельниц, увеличение их долговечности и удобства эксплуатации.

Принцип работы струйной мельницы заключается в следующем: измельчаемый материал подается в помольную камеру, где подхватывается струями энергоносителя (как правило, газа) и разгоняется ими до высоких скоростей. Движущиеся с большой скоростью частицы сталкиваются либо друг с другом, либо с отбойной плитой, в результате чего происходит их интенсивное разрушение. Дополнительное измельчение осуществляется при трении частиц

друг о друга или о стенки помольной камеры.

Струйные мельницы имеют примерно такие же показатели эффективности процесса, как и ударные, но значительно проще конструктивно.

Они имеют также ряд дополнительных преимуществ по сравнению с другими типами измельчителей:

1. В них отсутствуют мелющие тела, что позволяет получать тонкодисперсный материал с низким, или даже нулевым содержанием продуктов износа.
2. Размеры частиц готового продукта могут регулироваться в широком диапазоне.
3. Малые габариты установок, что не только экономит производственные площади, но и позволяет использовать для изготовления помольных камер и их футеровки дорогостоящие высококачественные материалы.

К недостаткам струйных мельниц следует отнести, прежде всего, необходимость последующего разделения пылегазовой смеси, т.е. применение пылеочистного оборудования, включающее на стадии сухого пылеотделения достаточно громоздкие тканевые фильтры либо электрофильтры, в связи с большим содержанием в потоке частиц малых размеров (менее 2 мкм).

Идея использования сжатой струи газа или пара для измельчения твердого материала получила достаточно много вариантов конструктивного оформления. Принят ряд попыток классифицировать струйные измельчители. По одной из предложенных классификаций [1], все измельчители делятся на три группы:

- мельницы ударного действия (с неподвижным отбойником-отражателем);
- мельницы с тангенциальным вводом энергоносителя (с вертикальной помольной камерой, с плоской помольной камерой);
- противоточные струйные мельницы.

По другой классификации [2], струйные мельницы делятся на две группы: с последовательным измельчением и разделением и с совмещенным измельчением и разделением. Существуют также конст-

рукции мельниц, сочетающих признаки обеих групп.

Обе классификации имеют ряд существенных недостатков, но других попыток систематизации струйных мельниц в литературе не встречается. Мы считаем, что необходимо в отдельную группу выделить струйные мельницы с псевдоожиженным слоем зернистого материала, т.к. они обладают рядом существенных отличительных признаков: истечение потока энергоносителя происходит непосредственно в слой материала, что исключает необходимость применения разгонных трубок и существенно снижает износ конструкционных материалов; измельчение материала осуществляется не только при столкновении противоположно направленных потоков, но и при истирании в кипящем слое, что позволяет полностью исключить загрязнение измельчаемого материала продуктами износа.

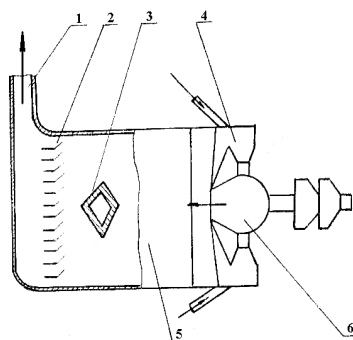
Рассмотрим некоторые наиболее характерные и интересные конструкции струйных измельчителей.

#### **Струйные мельницы ударного действия**

Первая подобная мельница была изготовлена в России в 1875 г. для размола фрезерного торфа, позднее появилась струйная мельница «Ангера» центрального котлотурбинного института.

В настоящее время струйные мельницы производятся в Германии, Японии, США и России.

Противоточные струйные мельницы второго поколения начали развиваться с конца 30-х годов XX века. На рис.1 [3] представлена японская мельница данного типа. Исходный материал из бункеров (4) поступает в ультразвуковое сопло, где подхватывается потоком газа и направляется в помольную камеру (6). В корпусе (5) установлен отбойник (3) ромбического сечения. Отражаясь от него, измельченный материал через жалюзи (2) уходит в выпускное отверстие (1). Следует отметить, что на выходе из данного измельчителя образуется материал с широким гранулометрическим спектром размеров частиц.



**Рис. 1. Струйная мельница ударно-центробежного действия**

1 - выпускное отверстие; 2 - жалюзи; 3 - отбойник ромбического сечения; 4 - загрузочные бункеры; 5 - корпус; 6 - помольная камера

Струйные мельницы чистого ударного действия встречаются сравнительно редко. Чаще такие мельницы совмещают различные механизмы измельчения:

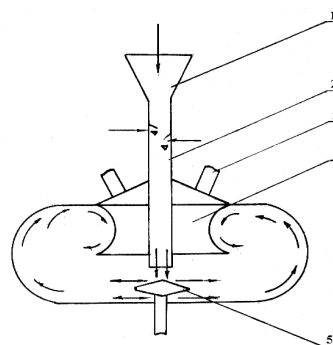
- удар о неподвижный отражатель и соударение частиц во встречных потоках;
- ударное измельчение и истирание частиц.

Такое совмещение значительно повышает эффективность помола.

Струйная мельница ударно-отражательного действия с дополнительным измельчением за счет трения частиц друг о друга представлена на рис. 2 [4].

Поток материала, разогнанный струей газа, на выходе из загрузочного патрубка (2) сталкивается с ударной плитой (5), от которой частицы отскакивают к стенкам камеры и к отражателю (4). Тонкодисперсные частицы уносятся газовым потоком в верхнюю часть камеры, где расположены разгрузочные патрубки (3). Более крупные и тяжелые частицы, скатываясь по параболической поверхности отражателя, подхватываются новыми потоками материала. При этом происходит интенсивное трение частиц материала друг о друга, о поверхность отражателя и стенки камеры.

Цикл многократно повторяется: мелкие частицы непрерывно уносятся из камеры отходящим газом, а крупные возвращаются на повторное измельчение, что позволяет значительно повысить эффективность процесса.



**Рис. 2. Струйная мельница ударно-отражательного действия**

1 - загрузочный бункер; 2 - разгонная труба; 3 - разгрузочные патрубки; 4 - параболический отражатель; 5 - ударная плита

### Противоточные струйные мельницы

В настоящее время интерес к противоточным струйным мельницам значительно возрос. Принцип действия таких мельниц заключается в том, что измельчение частиц происходит при резком соударении их друг с другом во время встречи двух или нескольких потоков, образуемых струями энергоносителя.

На рис. 3 [2] представлена схема работы противоточной струйной мельницы, содержащей помольную камеру (13), противоточные разгонные устройства (2) и (3), сепарационную камеру (4) и вращающийся от индивидуального привода (5) сепаратор (7) и распределительное устройство (6).

Мельница работает следующим образом: исходный материал подается в патрубок распределительного устройства (6), где происходит его классификация, тонкие фракции уносятся в сепарационную камеру (4), а грубые по подводящим камерам (11) и (12) сползают в разгонные камеры (2) и (3). Разогнанный струями энергоносителя до высоких скоростей материал направляется в помольную камеру (13). Продукты помола, пройдя сепарационную камеру, выводятся через патрубок (14) на разделение от энергоносителя.

В противоточной струйной мельнице, представленной на рис. 4 [5], исходный материал подается в оба разгонные патрубка, а помольная камера (1) выполнена с плавными переходами с целью снижения износа.

Изменения в конструктивном оформлении данных мельниц направлены

на создание более сложной гидродинамики потоков, что позволяет повысить эффективность помола. Так, например, оси эжекторов смещают относительно центральной оси помольной камеры, разгонные трубки снабжают специальными лопатками, закручивающими поток. При этом увеличивается число соударений частиц и, соответственно, повышается эффективность процесса измельчения.

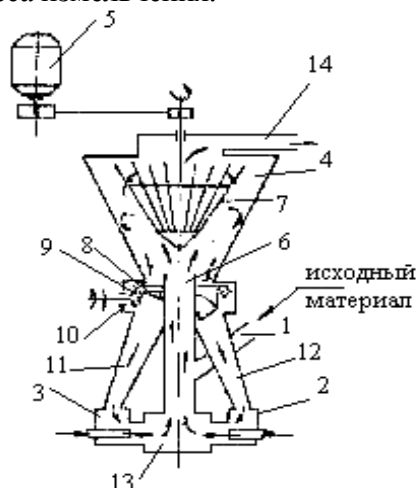


Рис. 3. Схема противоточной струйной мельницы  
1 – штуцер подачи исходного материала; 2, 3 – разгонные патрубки; 4 – сепарационная камера; 5 – двигатель; 6 – распределительное устройство; 7 – сепаратор; 8 – логок; 9, 10 – шестерни; 11, 12 – подводящие патрубки; 13 – помольная камера; 14 – выходной патрубок

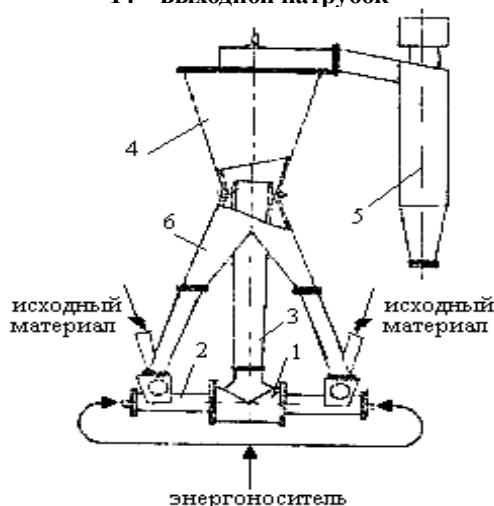


Рис. 4. Противоточная струйная мельница  
1 – помольная камера; 2 – разгонные сопла; 3 – центральная труба; 4 – сепарационная камера; 5 – циклон; 6 – точки возврата

В мельнице, изображенной на рис. 5 [7], предусмотрена выносная зона классификации (3). Частицы, требующие допол-

нительного измельчения, возвращаются в помольную камеру по рукаву (10). Конструкцией аналогичной мельницы [8] предусмотрена циркуляция не только твердого материала, но и газа, что существенно снижает энергоемкость процесса.

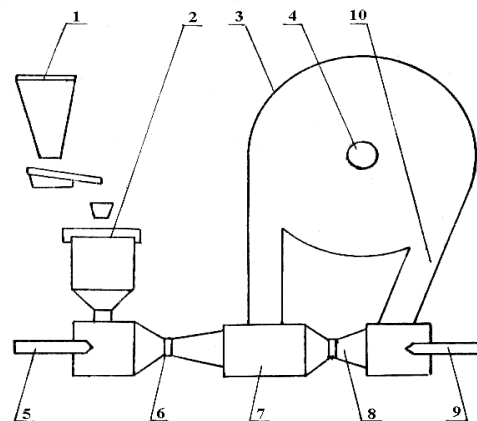


Рис. 5. Струйная мельница  
1 – дозатор; 2 – бункер; 3 – сепарационная камера; 4 – выпускное отверстие; 5, 9 – сопла; 6, 8 – инжекторы; 7 – помольная камера; 10 – рукав возврата крупных частиц материала

### Мельницы с вертикальной трубчатой помольной камерой (О-образные мельницы)

Мельница с трубчатой помольной камерой представлена на рис. 6 [6].

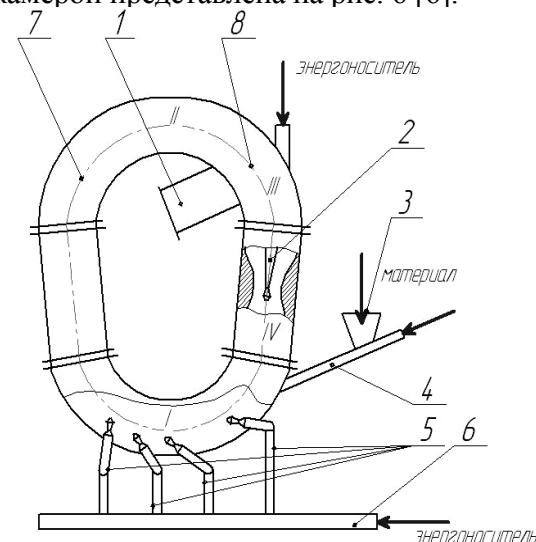


Рис. 6. Вертикальная трубчатая помольная камера  
I – зона помола; II – зона первичного разделения; III – зона выхода продукта; IV – зона возврата крупных частиц продукта  
1 – разгрузочный патрубок; 2 – разгонное сопло; 3 – бункер; 4 – разгонная труба; 5 – система сопел; 6 – коллектор; 7, 8 – поворотные колена

Помольная камера состоит из нескольких рабочих зон:

I - зона непосредственного измельчения частиц материала при их столкновении в пересечениях струй газа и образующихся вихрях;

II - зона предварительного разделения с помощью экрана;

III - отбор мелких фракций;

IV - зона возврата крупных частиц в циркулирующий поток.

Энергоноситель поступает по трубопроводу в коллектор (6) и далее, через систему сопел (5) в нижнюю часть помольной камеры. Сопла расположены в два ряда попарно - таким образом, что каждая пара струй пересекается в вертикальной плоскости. Кроме того, сопла расположены с отклонением от вертикали под определенными углами, чтобы вызвать циркуляцию газа через всю помольную камеру.

Разделение частиц осуществляется при взаимодействии центробежных и центростремительных сил, возникающих при движении потока по криволинейной траектории. Мелкие частицы уносятся потоком энергоносителя через жалюзи, представляющие собой инерционный разделитель. Крупные частицы, обладающие более высокой кинетической энергией, попадают в нисходящий газовый поток, ускоряются в сопле (2) и вновь поступают в зону измельчения.

### Мельницы с плоской помольной камерой

Схема струйной мельницы с плоской помольной камерой представлена на рис. 7 [2].

Энергоноситель поступает по трубопроводу (5) в распределительный коллектор (1), откуда через сопла (3) со скоростью звука истекает в помольно-разделительную камеру (2). Оси сопел расположены относительно соответствующих радиусов камеры под углом. Пересекающиеся друг с другом факелы струй образуют многоугольник с центром на вертикальной оси камеры. В центральной части камеры расположен центробежный пылеосадитель, образованный двумя коаксиальными трубами: большего диаметра (7), со-

единяющей помольную камеру с приемником готового продукта (8), и меньшего диаметра (6), отводящей отработанный энергоноситель.

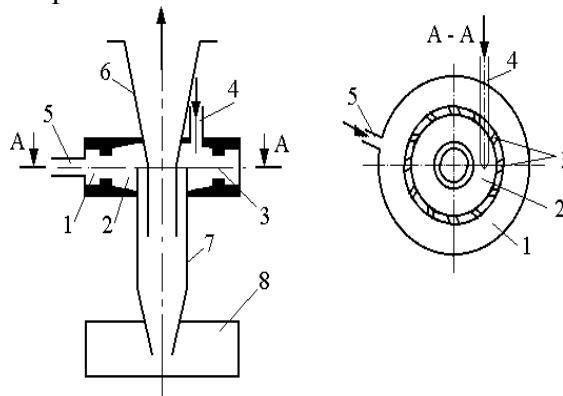


Рис. 7. Схема струйной мельницы с плоской помольной камерой

Оригинальные конструкции струйных мельниц с плоской помольной камерой разработаны на кафедре МАХП ИХТИ-ИГХТУ [9, 10].

На рис. 8 [9] представлена мельница с плоской помольной камерой и двумя соосно расположенными высоконапорными соплами (3) и встроенным центробежным классификатором.

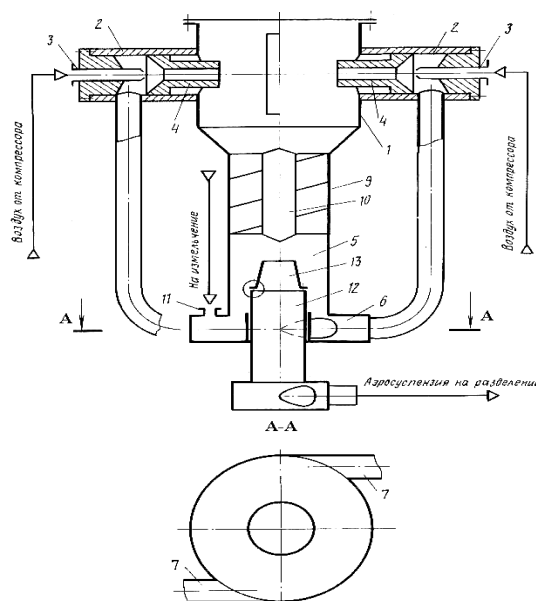


Рис. 8. Противоточная струйная мельница с плоской помольной камерой

1 - помольная камера; 2 - эжекторы; 3 - сопла; 4 - разгонные трубки; 5 - классификатор; 6 - приемная камера; 7 - трубопроводы возврата; 8 - ввод для подсоса воздуха; 9 - обечайка; 10 - винтовая лопасть; 11 - питающий патрубок; 12 - отводной патрубок; 13 - сменная насадка

Противоточная струйная мельница состоит из помольной камеры (1) с противоположно установленными эжекторами (2), имеющими сопла (3) для подачи энергоносителя и разгонные трубки (4); а также классификатора (5), оборудованного приемной цилиндрической камерой (6) с тангенциально подсоединенными к ней трубопроводами (7) возврата в эжекторы неизмельченного материала. Корпус классификатора представляет собой цилиндрическую обечайку (9), внутри которой установлена винтовая лопасть (10). Приемная камера имеет ввод (11) для подачи в мельницу исходного материала, а также подвижный отводной патрубок (12) со сменной насадкой (13).

Мельница работает следующим образом: сжатый воздух, подаваемый в эжекторы через сопла, подхватывает частицы исходного вещества и разгоняет аэросuspензию в разгонных трубках. В результате встречных ударов частиц аэросмеси противоположно направленных струй происходит измельчение материала. Вследствие тангенциального расположения трубопроводов в корпусе помольной камеры и классификатора, происходит закручивание потока аэросuspензии, движущейся сверху вниз. За счет этого осуществляется разделение частиц по крупности.

К этому же классу можно отнести струйную мельницу, изображенную на рис. 9. [11].

Мельница работает следующим образом. Исходный продукт через течку (4) загружается в мельницу и растекается по периферии вибрирующего нижнего конуса (2), проходит затвор (7) и поступает на плоскость основания конуса. Под действием вибрации, исходный продукт начинает двигаться от периферии к центру, подхватывается струями сжатого газа, вытекающего из отверстий перфорированных оснований конусов и измельчается в противоточных струях. Измельчение происходит многократно при движении материала от периферии к центру. Измельченные частицы вместе с газом уходят через центральную трубу (10) на сепарацию.

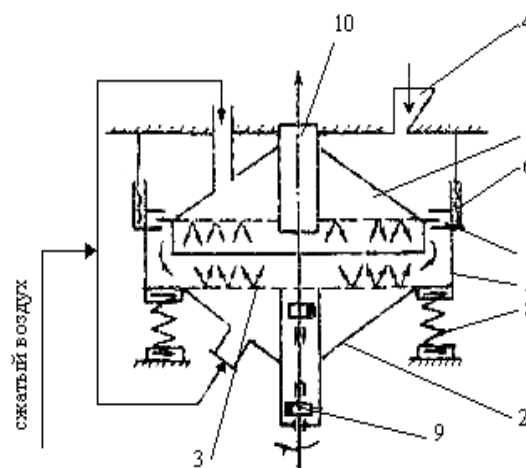


Рис. 9. Струйная мельница

1, 2 – конуса; 3 – перфорированное основание; 4 – течка; 5 – обечайка; 6 – уплотнение; 7 – затвор; 8 – пружины; 9 – дебаланс; 10 – выходной патрубок

### Струйные мельницы с псевдооживленным слоем зернистого материала

В последние годы наметились тенденции к созданию аппаратов, совмещающих несколько механизмов разрушения частиц. Так, например, в струйной мельнице - рис.10 [12]. Измельчение твердой фазы происходит за счет раскалывания частиц, при встрече 4-х направленных под углом друг к другу потоков, а также за счет истирания частиц, при их нахождении в псевдооживленном слое с локальным фонтанированием. Материал подается в зону измельчения шнековым питателем (3), энергоноситель поступает в коллектор (6), а оттуда - в сопла (4) и (5). Струя газа из нижнего сопла (5) приводит слой материала в псевдооживленное состояние, а поток газа из боковых сопел (4) создает в нижней части камеры зону интенсивного измельчения. В кипящем слое частицы зернистого материала доводятся до требуемого размера.

Большой интерес для рассмотрения представляет собой конструкция измельчителя [13], представленного на рис.11а). Исходный материал подается в камеру измельчения шнековым питателем (7). Частицы материала подхватываются высокоскоростными струями энергоносителя, подаваемого через сопла (6). Частицы из-

мельченного материала, имеющие малый вес, удаляются через верхнее выпускное отверстие (1), более крупные и тяжелые частицы опускаются вдоль стенок помольной камеры вниз, где вновь подхватываются потоком энергоносителя.

Для повышения эффективности помола конструкцией аппарата предусмотрено применение дополнительных устройств. Возможна установка в верхней части камеры отражателя (3) в виде крупной плиты с выпускным отверстием (2). Отражатель возвращает на дополнительное измельчение крупные частицы и, одновременно, играет роль ударной плиты.

Отбойник может быть установлен в центральной части камеры (8) рис.11б). В данном случае основная масса частиц измельчается до нужного размера непосредственно внутри цилиндра (4), а лишь небольшая часть частиц попадает в зазор между стенкой корпуса и цилиндром, где постепенно накапливается, а потом подхватывается струей энергоносителя и через разгонные трубки (5) вновь поступает на измельчение.

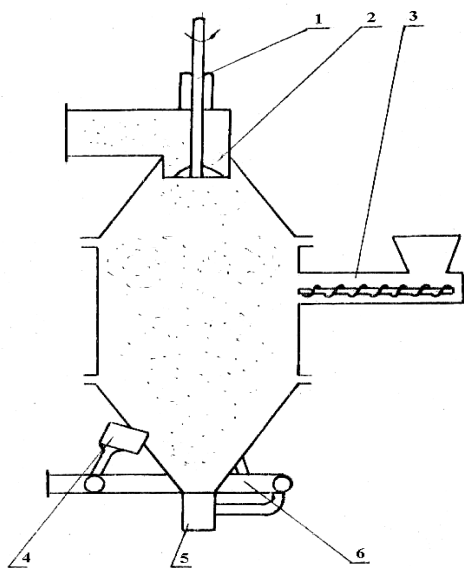


Рис. 10. Струйная мельница с кипящим слоем  
1 - вращающийся отбойник; 2 - разгрузочный патрубок; 3 - шнековый питатель; 4, 5 - сопла; 6 - коллектор

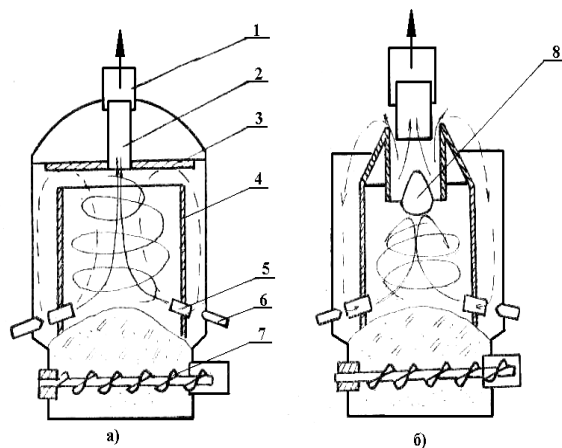


Рис. 11. Измельчитель

1 - разгрузочный патрубок; 2 - выпускное отверстие отбойной плиты; 3 - отбойная плита; 4 - полый цилиндр; 5 - разгонные трубки; 6 - сопла; 7 - шнековый питатель; 8 - отбойник

На кафедре МАХП ИГХТУ разработана принципиальная конструкция аппарата совмещенного действия АКД [14], в котором происходит свертонкий помол в струях энергоносителя и в слое псевдоожиженного материала, схема которого представлена на рис.12.

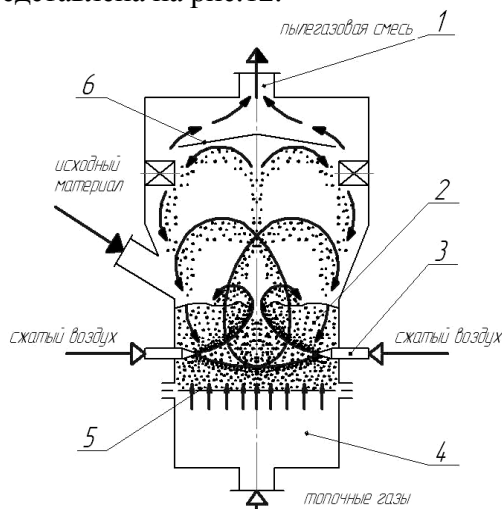


Рис. 12. Аппарат комбинированного действия  
1 – выходной патрубок, 2 – реакционная камера, 3 – напорные сопла, 4 – топочная камера, 5 – газораспределительная решетка, 6 – инерционно-пневматический классификатор

Аппарат работает следующим образом: исходное сырье поступает в реакционную камеру аппарата. Необходимая для протекания реакции температура ( $950^{\circ}$  –  $1000^{\circ}$  С) создается либо за счет псевдоожижения слоя топочными газами, либо за

счет сжигания природного газа непосредственно в псевдооживленном слое частиц. Одновременно, через систему сопел подается сжатый воздух. Частицы материала, подхваченные струей газа, разгоняются до критических скоростей, необходимых для измельчения. В реакционной камере аппарата, непосредственно в слое обрабатываемого материала за счет столкновения струй, образуется фонтанирующий слой материала. Частицы, измельченные за счет ударного столкновения и истирания в псевдооживленном слое до требуемого размера, проходя инерционный классификатор, уносятся потоком газа через выходной патрубок, а неизмельченный материал возвращается в слой, где заново подхватывается струями энергоносителя. Классификация частиц осуществляется при помощи инерционно-пневматического классификатора, который может иметь различную конструкцию.

Аппараты подобной конструкции позволяют производить измельчение как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- для тонкого и сверхтонкого измельчения материала целесообразно применять струйные измельчители, которые имеют высокий КПД измельчения, относительно низкие удельные энергозатраты и позволяют получить тонкодисперсный продукт высокой степени чистоты;
- наблюдается тенденция к созданию, на базе струйных измельчителей, аппаратов со сложной гидродинамической обстановкой, что значительно повышает эффективность процесса;
- большее предпочтение отдается конструкциям измельчителей, позволяющим возвращать потоки и твердой и газовой фаз в помольную камеру аппарата, что снижает энергоемкость процесса измельчения;
- в струйных измельчителях стремятся со-

вмещать несколько механизмов разрушения частиц, например, раскалывание при ударе и истирание, либо в кипящем слое зернистого материала, либо о стенки помольной камеры;

- классификацию измельченных частиц по размерам стремятся осуществлять непосредственно в измельчителе, что исключает необходимость применения дополнительных единиц оборудования, существенно снижает их количество и уменьшает габариты аппаратов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горобец В.И. Оптимизация параметров и разработка способов автоматического регулирования газоструйной мельницы. - М.: Машиностроение, 1965.
2. Акунов В.И. Струйные мельницы. - М: Машиностроение, 1967. - 263 с.
3. Патент Японии № 555383 Устройство для дробления и дезинтеграции материала, Б.И. № 10, 1980.
4. А.с. СССР № 1662689 Газоструйный измельчитель. Б.И. № 26, 1991.
5. А.с. № 309735, Б.И. № 23, 1971.
6. Патент ФРГ № DE 3152041 C2 Inherhald von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden, Б.И. № 43, 1986.
7. Патент США № 4581205 Closed cyclone FCC system with provisions for surge capacity, Б.И. № 42, 1986.
8. Патент ФРГ № P 3430633 1 Fließbettapparat, Б.И. № 42, 1986.
9. А.с. № 990303 Противоточная струйная мельница, Смирнов Н.Ю., Блиничев В.Н., Б.И. № 3, 1983.
10. А.с. № 1082483 Способ измельчения зернистого материала, Смирнов Н.Ю., Блиничев В.Н., Афонин С.Б. и др., Б.И. № 12, 1984.
11. А.с. № 333970 Гуляев Ф.А. Струйная мельница, Б.И. № 12, 1972.
12. Патент США № 4602743 Струйная мельница с кипящим слоем, Б.И. № 42, 1986.
13. Патент США № 4579283 Fluidized bed jet mill eliminated courses of mill wear, Chem. Prozess, 1984, № 47, p. 76.
14. Постникова И.В., Блиничев В.Н. Системный подход к расчету процессов в аппарате комбинированного действия // ТОХТ. – 2014. - Т. 48. - №3. - С. 260-267.

*Рукопись поступила в редакцию 17.03.2015.*

#### JET MILLS

*I. Postnikova, V. Blinichev, J. Krawczyk*

In the article a comparative review of jet reducer constructions is given. The advantages and disadvantages of different mill types for granular materials are considered.

Key words: jet grinding, fine and ultrafine grinding.