



УДК 633.73

## РАЗВИТИЕ СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

**И.А. Серебряник<sup>1</sup>, Д.А.Золотухина<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технических наук, доцент кафедры мировой экономики, Государственное высшее учебное заведение «Иркутский государственный технический университет», г. Иркутск, Россия, e-mail: [nasamolet@yandex.ru](mailto:nasamolet@yandex.ru)

<sup>2</sup>студент Института экономики управления и права, Государственное высшее учебное заведение «Иркутский государственный технический университет», г. Иркутск, Россия, e-mail: [dashusik\\_29@mail.ru](mailto:dashusik_29@mail.ru)

**Аннотация.** В работе проведено теоретическое исследование особенностей струйного помола. Приведены его основные характеристики, особенности. Проанализирована история совершенствования данного вида измельчения.

*Ключевые слова:* струйный помол, струйная мельница, измельчение.

## DEVELOPMENT OF A JET MILLING

**Inna Serebryanik<sup>1</sup>, Daria Zolotuhina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor of the Department of World economy, State Higher Educational Institution “Irkutsk State Technical University”, e-mail: [nasamolet@yandex.ru](mailto:nasamolet@yandex.ru)

<sup>2</sup>student, Institute of economy, management and law, State Higher Educational Institution “Irkutsk State Technical University”, e-mail: [dashusik\\_29@mail.ru](mailto:dashusik_29@mail.ru)

**Abstract.** Theoretical research of peculiarities of a jet grinding are brought. Their basic characteristics and features are denoted. The history of improvement of this grinding type is provided.

*Keywords:* jet grind, jet mill, grinding.

**Введение.** Измельчение твердых материалов, освоенное человечеством еще с доисторических времен, в настоящее время относится к числу наиболее распространенных технологических процессов. Одновременно оно является самым энергоемким и материалоемким. Измельчение, как правило, осуществляют механическим разрушением крупных фрагментов ударным и/или сдавливающим действием в аппаратах всевозможных конструкций. Ежегодно несколько миллиардов тонн различных материалов подвергаются дроблению и измельчению (руды, угли, цементы, минеральные удобрения, стекло).

**Цель работы.** Проблемы дробления и измельчения привлекают исследователей уже более 150 лет. За это время были обнаружены многие закономерности этих процессов, на основе которых разработали методики





расчета мельниц и технологических циклов помола. Как правило, выявленные закономерности имеют эмпирическую природу и касаются ограниченного числа материалов в узком диапазоне дисперсности. Цель нашего исследования выявить общие закономерности, свойственные струйному способу помола.

В последнее время изучение процессов измельчения становится особенно актуальным в связи с тенденциями получения более тонких порошков. Появляется много новых методов измельчения, например, струйное, термическое, электрогидравлическое, ультразвуковое и т.д. Если же говорить о промышленном использовании, то широкое применение находит струйное измельчение, являющееся одним из наиболее старых.

**Материал и результаты исследований.** В струйных мельницах измельчаемый материал разрушают одним из следующих способов:

- при ударе о специально установленную преграду;
- в результате взаимного столкновения частиц при тангенциальной подаче потока газа в камеру для измельчения;
- при столкновении частиц противоположно направленными струями.

Первые конструкции струйных мельниц были запатентованы еще в 1880 г. [5, с.45; 77]. Начало же более масштабной разработки струйных мельниц следует отнести к 1927 г. [1, с.93]. В 1936 г. предприятие И.Г. Фарбениндустри провело испытания опытного образца мельницы, построенной по лицензии американской фирмы «Микронайзер». Результаты испытаний не дали ожидаемого результата. Вещество, полученное в результате испытаний, не превышало дисперсность продуктов, произведенных на других видах измельчителей. Затраты же на помол оказались слишком большими. Ввиду вышеперечисленного, работы на струйных мельницах были прекращены.

В 1938 г. в американской периодической литературе появилась статья с описанием струйной мельницы, построенной фирмой «Микронайзер». Эта мельница имела плоскую горизонтальную камеру. В статье были приведены некоторые технико-экономические показатели мельницы, а также указаны области применения. Однако разработки того времени требовали определенных усовершенствований в области аэродинамики и автоматического регулирования. Поэтому описанная струйная мельница не была рекомендована к промышленному внедрению.

По окончании второй мировой войны совершенствование струйных мельниц продолжалось. В течение 1945-1961 гг. ежегодно появлялись одна-две обзорные статьи или рекламные проспекты по струйным мельницам, в которых рассматривали ограниченный круг данных, относящихся



главным образом к некоторым областям применения мельниц, дисперсности измельченных продуктов. Все эти сведения были необходимы для привлечения потребителя. Механика струйных мельниц и методика их расчета практически не рассматривалась. Лишь в 1959-1960 гг. в иностранной литературе вновь появляются статьи с изложением некоторых вопросов теории струйных мельниц.

Первые струйные мельницы изготавливались сначала в США и не продавались за границу. Лишь в 1955-1956 гг. английская фирма «Берк и Ко» предложила СССР струйные мельницы с плоской горизонтальной камерой для сверхтонкого помола двуокиси титана. При всем этом, в СССР существовали свои разработки, касающиеся струйного измельчения. Так, в 1925 г. была изготовлена мельница ударного действия под названием «Пушка» для измельчения фрезерного торфа. Однако вследствие целого ряда недостатков, промышленного применения она не получила.

В 1957 г. фирма «Макро Редакшн процессис лимитед» поставила в СССР две струйные мельницы с вертикальными трубчатыми камерами, а в 1958 г. были завезены образцы с плоскими горизонтальными камерами диаметром 200 и 50 мм, изготовленные в ГДР.

В СССР также велись разработки, касающиеся струйного измельчения, акцент ставился на струйные мельницы ударного типа. В лаборатории Центрального котлотурбинного института была разработана высокоскоростная мельница, в которой в качестве энергоносителя использовался воздух, нагретый до 250 °С. Испытания мельницы не показали хороших результатов. Во-первых, наблюдался высокий удельный расход электроэнергии (70-140 кВт·ч/т), во-вторых, большая степень переизмельчения угля.

Далее развитие струйного измельчения шло по пути усовершенствования мельниц ударного типа. Примером тому служит пневмомельница «Ангера», разработанная Всесоюзным теплотехническим институтом. Ее средняя величина была высока (до 40 т/ч), а энергозатраты сравнимы с энергозатратами шаровой мельницы (14-16 кВт·ч/т). К недостаткам этой мельницы можно отнести большую металлоемкость, повышенный износ разгонного аппарата при измельчении абразивных топлив, сложность поддержания номинальных режимов работы вследствие повышенных подсосов воздуха. Перечисленные недостатки значительно влияли на производительность мельницы, вследствие чего, широкого распространения она не нашла. Следует заметить, что в дальнейшем все пневмомельницы, подвергавшиеся испытаниям, характеризовались низкой скоростью рабочего газа-энергоносителя (до 250 м/с). Это ограничивало область их применения при измельчении материалов с низкой прочностью.



В 1934 г. была разработана струйная мельница «Микронайзер» с плоской цилиндрической помольной камерой, в которой действовали струи газа, направленные из сопел, располагающиеся по периферии камеры, и тангенциальным вводом измельчаемого материала. На материал, который подается в камеру для измельчения, крупность измельчаемого материала изменялась регулированием подачи материала и начальным давлением газа. Материал классифицируется под действием центробежных сил, удерживающих крупные частицы в зоне измельчения ближе к периферии. Мелкие частицы перемещаются к выходному отверстию. Технико-экономические показатели работы таких мельниц также зависят от физико-механических свойств измельчаемого материала и вида энергоносителя. Зарубежные источники признают этот метод наиболее распространенным при измельчении материалов с высокой дисперсностью.

Следующий этап развития струйных мельниц – появление мельниц «Джет-о-Майзер» с трубчатой помольной камерой, которые были впервые применены для тонкого измельчения каменного угля. Основным преимуществом такой мельницы была простота изготовления и конструкции помольной камеры. Недостатком являлся быстрый износ их вследствие того, что основная масса материала движется в пристеночной области трубы. Такой принцип измельчения впоследствии использовали для специальной конструкции с одновременной с непрерывным измельчением химической обработки силиконовой стекломассы под большим давлением. Производительность мельницы при этом достигала 4,5 т/ч.

Промышленное применение струйных мельниц началось с изобретением противоточной мельницы. Первоначально такая мельница была создана в 1917 г. фирмой «Маяк» на основе патента Виллоуби. Затем на базе этой модели создали целый ряд конструкций как в нашей стране (мельницы типа СП), так и за рубежом (мельницы фирм «Блоу Нокс» и «Маяк»), в которых использовали энергию двух встречных струй: разрушение частиц происходит в результате их взаимного столкновения. Поэтому износ элементов мельницы и загрязнение измельчаемого материала продуктами износа невелики по сравнению с другими более ранними конструкциями.

Следующей разновидностью противоточной струйной мельницы стала мельница, предложенная в 1931 г. Н. Эндрюсом и В. Виллоуби. В такой мельнице помольная камера изготовлена в виде кольца с смонтированными по его периметру двумя рядами инжекторных узлов. В результате в центре помольной камеры сталкиваются сразу несколько струй смеси газа с измельчаемым материалом, который разделяется по крупности за счет изменения аэродинамического режима потока по пути его движения в классификационном пространстве. Недоизмельченный материал по тру-



бам возвращается на измельчение, а готовый продукт выносится из мельницы. Образцы таких мельниц были переданы в серийное производство в 1964 г.

Сейчас совершенствование в области струйного измельчения идет по пути создания конструкций с большей производительностью. Из практики известно, что нецелесообразно применять воздух в струйных мельницах с диаметром помольной камеры более 100 мм. При этом отдается предпочтение энергоносителю повышенной температуры – перегретому пару, несмотря на достаточно сложную подготовку к процессу.

Чтобы упростить схему подготовки энергоносителя, в 1956 г. Б.К. Тельновым была предложена конструкция противоточной газоструйной мельницы, работающей на продуктах сгорания керосина температурой 550-630 °С. Данный тип имеет следующие особенности:

- инжекторные камеры и разгонные трубки заменены лотковым соплом;
- для подготовки энергоносителя использованы камеры сгорания реактивных двигателей, работающие на жидком топливе.

Спроектированная мельница оказалась близкой по энергоемкости к шаровой при измельчении железных руд. При меньших габаритах она характеризуется меньшей производительностью. Это объясняется использованием энергоносителя с низким начальным давлением (50-60 кПа).

В 1957 г. впервые описана промышленная установка струйной мельницы с двумя помольными инжекторами.

В 1959 г. появились сообщения о разработке в США опытного образца мельницы типа СП производительностью 30 т/ч.

Дальнейшие исследования [2,3,4] отечественных и зарубежных ученых направлены на поиски путей снижения энергоемкости струйных мельниц. Так, в монографии В.И. Акунова [1] сделана попытка систематизировать и обобщить накопленный экспериментальный материал по струйному измельчению. В дальнейших работах особое внимание уделено новому направлению в области струйного измельчения – газоструйному методу, основанному на использовании газового энергоносителя высокой температуры.

Сегодня под названием «струйная измельчительная установка» понимается комплекс агрегатов и узлов системы, обеспечивающий получение материала заданной крупности за счет энергии газов или пара.

Основными узлами струйной измельчительной установки являются источники газового энергоносителя, собственно мельница и пылеулавливающая система с устройствами для транспортировки материала и газа.



Как показала практика, струйный метод измельчения обладает многими преимуществами, а именно:

- 1) высокой интенсивностью разрушения материала;
- 2) низкой металлоемкостью;
- 3) максимально четкой классификацией частиц по размерам;
- 4) однородной крупностью конечного продукта;
- 5) минимальной степенью загрязнения измельчаемого материала (конструкционная возможность выполнить небольшие участки, подвергающиеся интенсивному локальному воздействию, из высокой образивостойкой керамики или твердых сплавов определяют малые величины загрязнения конечного продукта материалами износа);
- 6) возможностью совмещения измельчения с другими процессами – химическая обработка, сушка, обжиг;
- 7) простотой устройства и отсутствием движущихся частей в струйных измельчителях;
- 8) относительной малогабаритностью. Поскольку частицы довольно быстро приобретают требуемую для разрушения скорость на относительно коротких участках, струйные мельницы обладают значительно меньшими размерами, нежели другие типы измельчителей;
- 9) долговечностью. Отсутствие существенных механических напряжений в конструкциях помольной камеры делает эти машины весьма долговечными.

Необходимо также выделить недостатки, присущие струйному помолу, среди которых можно назвать:

- 1) значительный износ разгонного аппарата. В струйных мельницах значительно изнашивается разгонный аппарат и, прежде всего, конфузур, расположенный в начале разгонной трубки, а также отбойная плита. Тем не менее, общий расход металла на износ струйных мельниц ниже, чем у шаровых;
- 2) значительно большие, по сравнению с шаровым измельчением, энергозатраты. В среднем струйная мельница, размалывая в тончайший порошок 1 т породы, тратит свыше 8 000 кВт;
- 3) потери материала, уносимого отработанным газом;
- 4) дополнительные затраты на очистку отработанного газа.

В настоящее время известно большое количество различных типов струйных мельниц (рисунок 1). Отличаются они как по типу энергоносителя (воздухоструйные, пароструйные и газоструйные), так и по давлению газа энергоносителя перед мельницей (высоконапорные – с давлением перед соплом от 2 до 15 атм., низконапорные – от 0,2-0,3 до 2 атм., вентиляторные – до 0,2-0,3 атм.).



Рисунок 1- Классификация струйных мельниц

Принцип работы воздушноструйной мельницы заключается в следующем (рисунок 2). Воздух из атмосферы очищается с помощью масляного фильтра 2 при засасывании компрессором 3.

Сжатый воздух поступает на охлаждение в холодильник 4. Затем повторно очищается в фильтре 5, после чего поступает в сопла камеры измельчения, откуда подаётся элеватором 6 в приёмный бункер 7, из которого вибропитателем 8 направляется в трубу подсоса 9. Далее материал с дополнительно подсосанным воздухом поступает в трубу, соединяющую камеру измельчения 4 и классификатор 10, работающий под разрежением. В трубе и классификаторе происходит отделение крупных частиц материала, которые по трубопроводам направляются в приёмники эжекторов. Мелкий и тонкий продукты помола, увлекаемые воздухом, поступают в центробежный осадитель или циклон 12 с последующей очисткой сбрасываемого в атмосферу воздуха.

Обычно применяемые разделители с механическими завихрителями позволяют получать продукты, дисперсность которых характеризуется максимальным размером частицы – 200-60 мкм. В некоторых случаях эта граница отодвигается до 20-30 мкм за счет нерационального снижения производительности.

Отличительная особенность мельниц с вынесенными разделителями заключается во встречном расположении струй запыленного газа. Удвоенная скорость сталкивающихся частиц измельчаемого материала повышает эффективность помола. Эти мельницы предназначены для получения тонкоизмельченных продуктов.

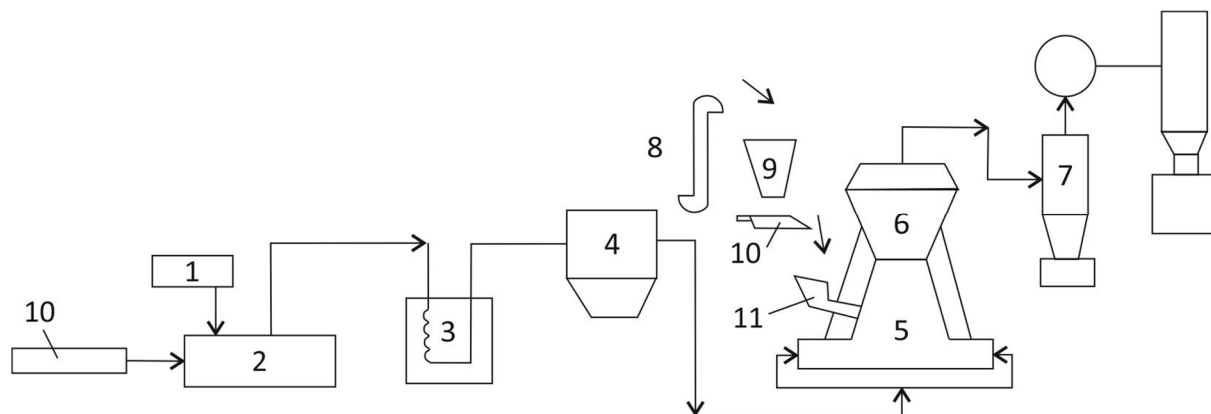


Рисунок 2 - Схема установки воздушоструйной мельницы:

- 1 – вибропитатель; 2 – масляный фильтр, 3 – компрессор; 4 – холодильник;  
 5 – фильтр; 6 – элеватор; 7 – приемный бункер; 8 – вибропитатель;  
 9 – труба подсоса; 10 – классификатор; 11 – камера измельчения;  
 12 – циклон

Наиболее распространенным типом являются двуструйные противоточные мельницы, применяющиеся либо с вынесенным классификатором, либо с совмещенной помольно-классификационной схемой.

Газоструйные и частично пароструйные мельницы могут быть использованы для совмещенного помола и сушки. Газоструйные мельницы при повышении температуры энергоносителя могут быть использованы для совмещенного помола и обжига, т.е. для механической обработки.

В литературе [1] указывается, что на струйных мельницах в различных отраслях промышленности успешно измельчаются более 1 000 материалов (см. таблицу 1):

Таблица 1 – Материалы, измельчаемые струйным помолом

Отрасль промышленности	Измельчаемый материал
Атомная	Ториевые материалы
Лакокрасочная	Пигменты, красители, земляные краски
Резиновая	Слюда, тальк, мел
Различные отрасли химической промышленности	Силикагель, пластмассы, естественные и искусственные смолы, каучук, органические химикалии
Нерудные ископаемые	Графит, известняк, бентонит, полевой шпат, магнезит, фосфаты, кварц, глина, цирконий
Металлические порошки	Алюминий, чугун, свинец





Продолжение таблицы 1

Отрасль промышленности	Измельчаемый материал
Пищевая	Злаки, крупы, сушеные овощи, ядра орехов, кислоты жирного ряда, кормовое зерно
Фармацевтическая	Лекарственные растения, пенициллин, стрептомицин и т.д.
Сельское хозяйство	Оксихлорид меди, линдан, сера, тиокарбонат
Разные материалы	Железная руда, корунд, пробка, древесина, косметические материалы, сернокислый кальций

**Вывод.** Таким образом, струйный помол широко применяется в производстве. Объясняется это не только возможностью получения высокодиспергированных материалов со средним размером частиц менее 1 мкм, но и высокой чистотой продукта.

Получение высокодисперсного продукта с минимальным количеством крупных частиц требует точного режима измельчения, в частности, дисперсности исходного продукта, производительности, а также температуры и давления энергоносителя. Так, современные струйные аппараты снабжаются электронными регуляторами, поддерживающими постоянные температуру и давление. Для питания мельницы применяют весовые дозаторы с автоматическим регулированием производительности.

Качество струйного помола постоянно улучшается, начиная с 1880 г., до сегодняшнего дня. Оптимизация идет как по пути повышения производительности измельчительных установок, так и по пути снижения энергоемкости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Акунов В.И. Струйные мельницы. Монография. М.: Машиностроение, 1967. – 264 с.
2. Барский М.Д. Фракционирование порошков. М.: Недра, 1980. – 327 с.
3. Вердиян М.А., Кафаров В.В. Математическое моделирование помольных агрегатов // Цемент. 1976. – №12. – С.13-14.
4. Горобец В.И., Елисеева О.К. Исследование процессов измельчения и классификации материалов в газоструйной установке с применением вероятностной математической модели. Днепропетровск: Свидлер, 1993. – 55 с.
5. Хакен Г., Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991. – 248 с.