

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Российская академия архитектуры  
и строительных наук  
Ассоциация строительных вузов  
Правительство Белгородской области  
Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова

**Международная научно-практическая  
конференция, посвященная 65-летию  
БГТУ им. В.Г. Шухова**

**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ИННОВАЦИИ  
(XXIII научные чтения)**



**Сборник докладов  
Часть 7**

**29 апреля  
Белгород 2019**

УДК 001.2  
ББК 72+65.291  
М 43

**Научно-технические** технологии и инновации: эл. сб. докладов  
М 43   Международ. науч.-практ. конф., Белгород: Изд-во БГТУ, 2019.  
– Ч. 7. – 27 с.

ISBN 978-5-361-00698-4

В сборнике представлены результаты исследований, направленных на совершенствование и разработку эффективных технологических комплексов и оборудования для дробления, помола, прессования, смешивания материалов при производстве строительных материалов.

Материалы сборника предназначены для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и производственных организаций и могут быть полезны для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов вузов.

*Редакционная коллегия:* д-р техн. наук, проф. В.С. Богданов,  
д-р техн. наук, проф. В.С. Севостьянов.

УДК 001.2  
ББК 72+65.291

ISBN 978-5-361-00698-4

© Белгородский государственный  
технологический университет  
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2019

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Кравченко А.А., Секретарев Е.А., Толмачева А.В., Колтунов А.В., Карпачев Д.В.</b> К вопросу о повышении качественных показателей процесса измельчения в струйной мельнице ... ..	4
<b>Кравченко А.А., Лихонина Е.И., Секретарев Е.А., Толмачева А.В.</b> Обоснование выбора конструкции струйного диспергатора .....	9
<b>Мишин Д.А., Черкасов А.В.</b> Возможные проблемы в период пуска новой линии сухого способа производства цемента .....	12
<b>Романович А.А., Пахомов Е.Г.</b> Измельчение клинкера давлением..	16
<b>Шевченко А.В., Кравченко А.А., Карпачев Д.В.</b> Оборудование и технологии для селективного измельчения и перспективы их развития .....	21

## К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Кравченко А.А., аспирант,  
Секретарев Е.А., аспирант,  
Толмачева А.В., магистрант,  
Колтунов А.В., студент,

Карпачев Д.В., канд. техн. наук, доцент  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

**Аннотация.** Рассмотрены основные направления развития и совершенствования струйных мельниц, используемых для тонкого и сверхтонкого измельчения с более высокими качественными характеристиками готового продукта по дисперсности и равномерности гранулометрии.

**Ключевые слова:** струйная мельница, высокоскоростное самоизмельчение, помольная камера.

Анализ состояния техники измельчения и конструкций помольных агрегатов для тонкого и сверхтонкого измельчения позволяет сделать вывод о том, что несмотря на отдельные преимущества, заложенные в конструкции конкретных измельчителей, ни один из них не может удовлетворить главному требованию к мельницам – минимальное загрязнение измельчаемого материала продуктами износа (износ мелющих тел и футеровок корпусов мельниц), которое в ряде случаев определяет саму возможность применения таких тонкоизмельченных материалов.

Избежать этого недостатка можно лишь с помощью реализации принципа самоизмельчения, т.е. измельчением материала самим же материалом путем высокоскоростного удара. Высокоскоростное самоизмельчение позволяет устранить ряд недостатков, присущих оборудованию для тонкого и сверхтонкого помола, а наиболее перспективным оборудованием для его реализации являются струйные измельчители [3, 6, 7, 8].

Первые конструкции струйных мельниц были запатентованы еще в 1880 году. Однако из-за несовершенства первоначальных конструкций и необходимости применения износостойких материалов в некоторых узлах широко их стали применять лишь с середины 40-х годов прошлого столетия.

Струйные мельницы являются разновидностью ударных измельчителей и состоят из разгонного аппарата (одного или нескольких), в котором струя газа-энергоносителя сообщает скорость частицам обрабатываемого материала, и камеры, в которой происходит взаимодействие потоков материала либо со специальными отбойными поверхностями, либо между собой. В качестве энергоносителя в струйных мельницах чаще всего применяют воздух, реже – инертный газ, водяной пар, продукты сгорания. Высокие скорости измельчения обуславливают высокую дисперсность конечного продукта.

Эти мельницы, не имеющие движущихся частей, просты по конструкции и характеризуются большой скоростью процесса измельчения при высокой удельной производительности. Так как измельчающей средой является сам продукт измельчения, то в результате уменьшается удельный износ мелющих тел и загрязнение измельченного материала продуктами износа, увеличивается долговечность мельницы. Кроме того, уменьшаются их размеры, появляется возможность использовать для изготовления или футеровки рабочих поверхностей разгонных трубок и камеры измельчения высокопрочные материалы, износ которых весьма незначителен, но которые из-за их высокой стоимости и крупности не могли быть использованы в обычных мельницах.

Струйный помол дает возможность сочетания помола и разделения со смешением, сушкой и другими технологическими процессами. А работа в замкнутом цикле обеспечивает минимальное выделение пыли в окружающую среду.

В настоящее время известно большое количество струйных мельниц различных типов, отличающихся как видом энергоносителя (воздухоструйные, пароструйные и газоструйные), так и по технологическому назначению (с последовательным измельчением и разделением и с совмещенным измельчением и разделением, осуществляемыми одновременно в одной камере). Но чаще всего струйные мельницы классифицируют по конструктивному признаку, т.е. по типу помольной камеры:

- аппараты с плоской горизонтальной помольной камерой;
- измельчители с трубчатой вертикальной помольной камерой;
- струйные мельницы комбинированной конструкции;
- мельницы с противоточной камерой.

Различные конструкции струйных мельниц нашли своё место во многих отраслях промышленности. Однако, это утверждение в меньшей степени относится к противоточным струйным мельницам. Их

широкому внедрению в промышленность препятствовало конструктивное несовершенство существующих установок. Хотя, если будут созданы достаточно эффективные и надёжные противоточные струйные мельницы, они будут конкурентоспособными с другими традиционными измельчителями, которые используют для сверхтонкого помола.

Одним из направлений развития таких измельчителей является повышение удельной производительности, уменьшение удельного расхода энергоносителя и износа рабочих элементов. При этом следует уделить повышенное внимание оптимизации процесса движения частиц материала, не только на участке их разгона, но и в самой помольной камере, а также времени их нахождения в рабочей зоне установки. Решение данной задачи позволит существенно повысить производительность струйных противоточных мельниц, и снизить энергозатраты на измельчение.

Таким образом, создание конструкции струйного противоточного измельчителя, который бы удовлетворял всем требованиям, предъявляемым к такому классу мельниц, и методики обоснования аэродинамических процессов на стадии измельчения частиц является важной научной задачей и имеет практический интерес в области производства строительных материалов, в частности при получении высокодисперсных порошков глины, используемых в технологии тонкой технической керамики.

При исследовании процессов, происходящих в струйной мельнице, рассматривалась следующая задача: взаимодействие двухфазных струй, направленных навстречу друг другу.

К настоящему времени современной газодинамикой и, в частности, теорией турбулентных струй, достаточно широко исследованы однофазные и двухфазные газовые струи [1, 2, 9]. Не так давно, при решении подобного рода задач, применялись приближенные методы решения, позволяющие получать практически приемлемые результаты. Так, одним из основоположников и создателей струйной помольной техники в России Акуновым В.И., разработана теория струйных мельниц, основные выводы которой базируются на теоретических посылах гидродинамики. При этом энергетическое представление о струйных процессах позволило установить основные количественные зависимости параметров свободных и стесненных струй, а также эжекторов. Газовая струя, несущая твердую фазу, представлена разбитой на четыре участка различной структуры, в том числе с различной формой поверхности раздела. Такое энергетическое

истолкование процесса струеобразования обладает некоторыми преимуществами по сравнению с предложенным Голеевским А.А. [5] методом, при котором участки струи характеризуются величиной коэффициента увлечения.

С помощью Предложенной Акуновым В.И. теории были получены критический весовой расход твердой фазы, предельное и оптимальное значение её концентрации в зависимости от скорости газа и плотности частиц, критический расход газовой фазы [3, 4]. В целом эта методика расчета эжекторов дает результаты, достаточно хорошо приближающиеся к экспериментальным, в силу того, что как раз результаты экспериментальных исследований и служили отправными данными.

Однако следует отметить, что для расчета основных конструктивных параметров эжекторного узла противоточной струйной мельницы, предложены выражения, увязанные с производительностью мельницы, выведенные на основе экспериментальных данных, которые не вполне согласуются с теоретическими посылками. При этом отметим, что размеры помольной камеры являются функциями диаметра разгонных трубок [3, 4].

На наш взгляд, целесообразно определять конструктивные параметры помольной камеры, а также диаметр, длину разгонных трубок и основные поперечные сечения эжекторного узла исходя из газодинамических параметров, получаемых на основе двухскоростной модели течения смеси газа и твердых частиц.

Работу эжекторов струйной мельницы можно анализировать, используя методику, предложенную Баулиным К.К., и уточненную для расчета пневмотранспортных установок Успенским В.А. [10]. На основании выполненных исследований была предложена методика определения оптимальных параметров помольного узла струйной мельницы. Методика расчета состояла из ряда трудоемких этапов. На одном из таких этапов было получено уравнение, выражающее взаимосвязь конструктивных и режимных параметров эжекторов, и являющееся его характеристикой [6].

Однако следует отметить, что все упомянутые теории, в основном ограничивались рассмотрением процессов, протекающих в эжекторных узлах струйных мельниц. Процессы, протекающие непосредственно в помольной камере и узлах, примыкающих к ней, в виду сложности обычно не рассматриваются. Между тем в теории струйным мельниц этот вопрос является одним из основных.

Следовательно, решение вопроса повышения качественных показателей процесса измельчения в противоточной струйной мельнице и снижение энергетических затрат лежит в области теоретического обоснования и экспериментальной проверки конструктивно-технологических параметров помольной камеры и уздов, примыкающих к ней.

#### Список литературы:

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: 3-е изд. М.: Изд-во Наука, 1969. 824 с.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 824с.
3. Акунов В.И. Струйные мельницы: 2-е изд. М.: Машиностроение, 1967. 257 с.
4. Акунов В.И. Струйные мельницы. Элементы теории и расчета. М.: Машгиз, 1962. 264 с.
5. Голеевский А.А. Вопросы механики струйного движения жидкостей и газов. М.: Машгиз, 1957. 824 с.
6. Горобец В.И., Горобец Л.Ж. Новое направление работ по измельчению. М.: Недра, 1977. 183 с.
7. Карпачев Д.В., Уваров В.А., Булгаков С.Б. К вопросу об определении энергии, затрачиваемой на измельчение материала // Актуальные проблемы современного строительства: сб. докл. 55-ой Междунар. науч.-техн. конф. молод. учён. (аспир., докторантов). СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2001. Ч.1. С.35-38.
8. Карпачев Д.В. Совершенствование технологии измельчения и обогащения рудных и нерудных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №2. С.103-107.
9. Логачев И.Н., Семикопенко И.А., Смирнов Д.В. Закономерности движения крупных частиц измельченного материала в криволинейном патрубке возврата дезинтегратора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №12. С.159-162.
10. Успенский В.А. Пневматический транспорт материалов во взвешенном состоянии. Свердловск-М.: Metallurgizdat, 1952. 152 с.



## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ СТРУЙНОГО ДИСПЕРГАТОРА

**Кравченко А.А., аспирант,  
Лихонина Е.И., магистрант,  
Секретарев Е.А., аспирант,  
Толмачева А.В., магистрант**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

**Аннотация.** Указаны параметры, определяющие эффективность процесса струйного измельчения. Представлен ряд положений, формирующих подход при конструировании струйного диспергатора сырьевых материалов различного спектра назначения.

**Ключевые слова:** Струйный диспергатор, двухфазный поток, селективное измельчение

Эффективность измельчения в струйных установках определяется как физико-механическими, так и аэродинамическими условиями. Последние, в свою очередь, зависят от конструктивных параметров элементов измельчительной установки. Поэтому при проектировании струйных измельчителей наряду с определением вида энергоносителя и варианта его источника необходимо выбирать конструктивные и режимные параметры мельницы и пылеулавливающих устройств.

Существующие методики расчета конструктивных параметров таких аппаратов, в основном базируются на экспериментальных данных и не учитывают физико-механических свойств измельчаемого материала, его гранулометрический состав, двухфазный состав измельчаемого потока [1, 2].

Для расчета аэродинамических и конструктивных параметров струйных мельниц следует рассмотреть поведение частиц в условиях протекания процесса измельчения. Кроме этого, интерес представляет изучение поведения газоматериального потока при столкновении со встречным потоком или неподвижным препятствием с высокой скоростью [3, 4].

Качество получаемых порошков, определяемое в первую очередь гранулометрическим составом, напрямую зависит от типа струйного измельчителя. Тонкость получаемого в противоточных струйных мельницах продукта несколько грубее, чем в мельницах с трубчатой и плоской помольной камерой. Однако, при доведении конструктивных и технологических параметров струйных мельниц до рациональных

значений, качественные показатели получаемого в них продукта можно существенно повысить.

Подход при конструировании струйного диспергатора должен складываться из следующих положений.

1. Достижение максимально возможной производительности. Производительность струйных противоточных мельниц может достигать до 160 т/ч и более, что значительно превышает производительность любого другого типа струйных измельчителей.

2. Струйный диспергатор должен удовлетворять требованию достижения наименее возможных энергозатрат на измельчение. Энергозатраты в струйном диспергаторе, работающем в замкнутом цикле, складываются из затрат энергии на разгон частиц материала, т.е. на энергоноситель (например сжатый воздух, вырабатываемый компрессором) и затрат энергии на сепарацию и отсос отработанных газов на очистку в фильтры. Как правило, мощность, затрачиваемая на привод сепаратора и вентилятора на порядок меньше мощности привода компрессора. Следовательно, расход воздуха должен быть минимально возможным. Расход энергоносителя, в свою очередь, зависит от диаметра подающих сопел и их количества (при условии постоянства давления). В отличие от прочих конструкций струйных измельчителей, противоточная мельница имеет два сопла, а при наличии отбойной плиты – одно, что можно отнести к ее преимуществам.

3. Учитывая высокую скорость измельчаемого потока (более 200 м/с) в помольной камере струйных измельчителей немаловажным является вопрос подбора футеровочных материалов. При их высокой стоимости необходимо стремиться к уменьшению рабочих поверхностей, подвергающихся футеровке.

4. Возможность организации в противоточных струйных мельницах селективного измельчения материала одновременно с выводом одного из компонентов из зоны измельчения для снижения степени загрязненности получаемых тонкодисперсных порошков нежелательными примесями трудноразмалываемых частиц.

#### **Список литературы:**

1. Акунов В.И., Буслаева И.Ж. Закономерности измельчения строительных материалов на противоточной струйной мельнице // Цемент. 1988. №1. С.20-23.
2. Акунов В.И. Газодинамика помольной камеры противоточной струйной мельницы // Научные труды. НИИЦемент. 1982. С.111-116.

3. Богданов В.С., Булгаков С.Б., Карпачёв Д.В., Семикопенко И.А. Получение сверхтонких порошков в струйной противоточной мельнице // Проблемы производства и использования мела в промышленности и сельском хозяйстве: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2001. С.29-32.
4. Хлудеев В.И., Уваров В.А., Воронов В.П., Карпачев Д.В., Поздняков С.С. Расчет эффективного взаимодействия измельчаемых материалов в помольной камере противоточной струйной мельницы // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: сб. науч. тр. / Белгород: Изд-во БГТУ, 2004. С.46-50.

## **ВОЗМОЖНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В ПЕРИОД ПУСКА НОВОЙ ЛИНИИ СУХОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА**

**Мишин Д.А., канд. техн. наук, доцент,**

**Черкасов А.В., канд. техн. наук, доцент**

*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

**Аннотация:** В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с проблемой пуска цементного завода сухого способа производства, при ошибках в монтаже оборудования или строительстве капитальных зданий и сооружений которые отражаются в дальнейшем на этапе пуска завода и в дальнейшем на эксплуатацию технологической линии.

**Ключевые слова:** Цементный завод по сухому способу производства, пуск завода, сырьевые материалы, клинкер, цемент, угольное топливо.

Строительство новых цементных заводов по сухому способу производства, получил в настоящее время самое большое распространение в России и странах СНГ, так большая часть предприятий выпускают цемент по мокрому способу, являющимся более энергоемким. Все этапы строительства и монтажа оборудования являются важными. Ошибки в монтаже оборудования или строительстве капитальных зданий и сооружений отражаются в дальнейшем на этапе пуска завода и в дальнейшем на эксплуатацию технологической линии.

Таким образом, целью работы является освещение некоторых проблем пуска завода на некоторых переделах технологической линии.

Первый пуск завода следует проводить до начала периода установления отрицательных температур окружающей среды. Это связано с тем, что довольно часто основным проектировщиком является заграничная фирма, у которой отсутствует опыт проектирования цементного завода и его пуска при погодных условиях, соответствующих России и стран СНГ. Кроме этого заказчик строительства завода, также в большинстве случаев не имеет такого опыта. Это приводит к срывам пуска завода из-за неготовности оборудования к работе в таких условиях. Опыт работы современных заводов сухого способа производства, показывает, что пусковые работы завода занимают продолжительное время от полугода до 2 лет. В некоторых случаях из-за проблем, связанных с ошибками в проектировании, предприятие работает с перебоями вплоть до

проведения реконструкции проблемного узла оборудования или части технологической линии.

Проведение пуска завода в период наступления отрицательных температур в дневное и ночное время, чревато смерзанием сырьевых материалов на складе, в транспорте при их транспортировке, образование конденсата и его замерзания в бункерах и т.д. В случае, когда рабочим телом системы охлаждения оборудования является вода, то ее необходимо заменить, на жидкость с более низкой температурой замерзания, чтобы исключить разрыв трубок при выходе из строя насоса в период длительного простоя оборудования в периоде между пусками.

Производство портландцемента включает ряд технологических операций:

- 1) приготовление сырьевой смеси заданного химического состава и поддержание его постоянства;
- 2) обжиг сырьевой смеси в печи;
- 3) измельчение клинкера совместно с гипсом и активными минеральными добавками.

При использовании пластичных сырьевых материалов (глины и суглинки) без использования сушки, возникает проблема их дозировки из бункера сырья на весовой дозатор. Влажный материал налипает на транспортер, замазывает ленту, куски материала могут попасть между звездочкой и цепью, а в зимний период происходит смерзание материала, что приводит к повышению крупности подаваемого материала и нарушению режима работы взвешивающего элемента.

Для стабильной работы, при повышенной влажности связанной с сезонными условиями, необходимы конструктивные изменения разгрузочной части бункера, необходимо предусмотреть установку антиадгезионных покрытий, для работы в зимний период установить греющий кабель по периметру бункера и его теплоизоляцию.

Точность работы дозирующих устройств перед сырьевыми мельницами, позволяет осуществлять регулирование и корректирование химического состава сырьевых компонентов путем изменения состава порций. Состав сырьевой смеси и клинкера задается значениями коэффициента насыщения, силикатного и глиноземного модулей.

Сушка сырья, при неработающей печи, происходит горячими газами от генератора горячих газов. Для устойчивой работы генератора горячих газов, работающего на дизельном топливе, необходимо установить кран для плавного регулирования подачи топлива (при его отсутствии) на горелку в помещении, где установлена топка. Для

возможности нормальной работы топки в зимнее время необходимо обеспечить обогрев помещения, в котором находится бак с топливом. В помещении должна поддерживаться температура не ниже  $+5^{\circ}\text{C}$ . При охлаждении уже до  $+5^{\circ}\text{C}$  вязкость дизельного топлива повышается, ее продвижение по трубопроводу ухудшается, и нарушается стабильность подачи топлива в горелку теплогенератора. Трубы, ведущие к горелке теплогенератора, должны быть обязательно утеплены.

В период пусковых работ часто возникают проблемы с транспортировкой готовой сырьевой смеси в аэрожелобах. Аэрожелоб предназначен для транспортирования со скоростью 2 - 4 м/с сыпучих материалов в направлении действия силы тяжести под углом  $4-10^{\circ}$  к горизонту. *Аэрожелоб* длиной до 40 м обслуживается одним вентилятором с полным напором до 400 - 500 мм вод. ст. При большей длине транспортирования необходимо устанавливать дополнительные вентиляторы из расчета один вентилятор на каждые 40 м длины. Возможна установка дополнительных вентиляторов на случай поломки одного, т.к. это приводит к остановке технологической линии.

Для обеспечения надежной работы пневматических транспортных желобов необходимо обратить внимание на качество монтажа аэрожелоба. Секции должны быть состыкованы так, чтобы не было щелей, как по наружной поверхности сочленения секций, так и в месте стыковки поперечных пористых перегородок, делящих короб на два потока. При обнаружении щели внутри короба через технологический люк, следует рассоединить все секции и заново собрать аэрожелоб, исправляя обнаруженные неплотности, порывы ткани и т.д. При пуске аэрожелоба возможно образование пробки материала после длительного простоя аэрожелоба в результате конденсата, скапливаемого на пористой перегородке, что увеличивает ее сопротивление. В результате плохой продуваемости перегородки материал в месте, где уже не происходит аэрация слоя материала в должной мере, происходит торможение движущего слоя и происходит заполнение поперечного сечения желоба материалом, который движется сверху. Представителями нескольких заводов отмечалось, что как только аэрожелоб прогревался, он начинал стабильно работать. В связи с этим можно рекомендовать предварительную просушку аэрожелоба теплым воздухом, подаваемым через вентилятор аэрожелоба или проведение его предварительного прогрева тепловым электрическим кабелем, обмотанным вокруг короба.

Использование в качестве основного топлива угля, увеличивает вероятность взрыва угольного порошка или возгорания в бункере при длительном его хранении, особенно при высоком содержании летучих.

При высоком содержании летучих в топливе целесообразно увеличить влажность угольного порошка более 2% для снижения вероятности его взрыва или возгорания. Перед остановкой печи угольный порошок должен быть выработан из расходного силоса угольного топлива и всех бункеров. После проведения сварочных работ на угольных трактах обязательно должна быть проведена тщательная уборка ремонтируемого места (вплоть до уборки промышленным пылесосом) для удаления горячих частиц металла и шлака, которые могут провоцировать возгорание угольного порошка и его взрыва. Все оборудование, перемещающее пылевидное угольное топливо, не должно при трении движущихся частей создавать искры, от которых легко возгорается угольный порошок. Самовоспламенение и большая удельная поверхность делают пыль взрывоопасной при появлении искры механического или электрического происхождения.

Наиболее частые взрывы угольной пыли и пожары в угольном отделении происходят при запуске. Поэтому перед пуском мельницы следует проверить, нет ли очагов горения. Вначале вся система угледоготовки прогревается при подаче ограниченного количества теплоносителя, мельница прогревается, проворачиваясь на 0,5 оборота через каждые 30 мин. Необходим постоянный контроль, за температурой в мельнице. Все трубопроводы должны быть герметичны. Перед остановкой мельницу следует выработать. При пуске угольной мельницы подачу материала производят постепенно. Если мельница останавливается на срок более одних суток, следует выработать уголь полностью из всей системы.

Пуск завода является ответственным мероприятием в ходе которого выявляются проблемы в работе оборудования, связанные как с ошибками при монтаже, так и при работе в природных условиях, не предусмотренных проектом. Первый пуск завода не рекомендуем проводить в сезон с постоянными отрицательными температурами, приводящими к дополнительным осложнениям в работе всей технологической линии.

## ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ КЛИНКЕРА ДАВЛЕНИЕМ

**Романович А.А., д-р техн. наук, профессор,  
Пахомов Е.Г., магистрант,  
Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова**

**Аннотация.** В статье рассмотрен процесс измельчения давлением с целью изучения влияния давления прессования на тонкость помола при различной его гранулометрии. Были проведены экспериментальные исследования посвященные изучению влияния высоты сжимаемого слоя на тонкость измельчения клинкера с учетом исходной гранулометрии, что позволило сделать определить, как с увеличением давления прессования тонкость измельчения повышается, упругое расширение возрастает с увеличением давления и зависит от исходной гранулометрии.

**Ключевые слова:** клинкер, давление, тонкость измельчения, гранулометрия, валковые пресса.

В производстве цемента наиболее энергоемким технологическим процессом является тонкое измельчение клинкера и добавок. Повышением эффективности работы помольного оборудования занимались многие ученые как у нас в стране, так и за рубежом [1-2]. Одним из перспективных способов снижения энергозатрат является его поэтапное измельчение материалов с выносом стадии грубого помола за пределы шаровой мельницы в валковые пресса [3-4].

Однако процесс измельчения давлением слабо изучен, с этой целью были проведены исследования для изучения влияния давления прессования на тонкость помола клинкера при различной его гранулометрии и высоте сжимаемого слоя. В качестве исследуемого материала был принят клинкер Белгородского цементного завода, имеющий следующий минералогический состав:  $C_3S$  - 66%;  $C_2S$  - 13.2%;  $C_3A$  - 47%;  $C_2A$  - 14%. Исследования проводились на гидравлическом прессе ПСУ -50 с точностью измерения 4 МПа в цилиндрической пресс-форме диаметром  $4 \times 10^{-2}$  м. Результаты экспериментальных проведенных исследований представлены в виде графических зависимостей на рисунках 1-3. Проведенные исследования (рис.1) позволили установить что с увеличением давления прессования остаток на ситах  $R_{02}$  и  $R_{008}$  уменьшается и наиболее эффективно этот процесс происходит при давлении от 30 до 90 МПа. С увеличением исходной крупности зерен клинкера тонкость измельчения при фиксированном



давлении возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением зерна удельная прочность и площадь контактов на единицу объема уменьшается[5].

Дальнейшие экспериментальные исследования были, посвящены изучению влияния высоты сжимаемого слоя на тонкость измельчения клинкера с учетом исходной гранулометрии (рис. 2). Исследования проводились для клинкера с высотой насыпи от  $10 \times 10^{-3}$  до  $40 \times 10^{-3}$  м, при постоянном давлении прессования, равном 50 МПа.

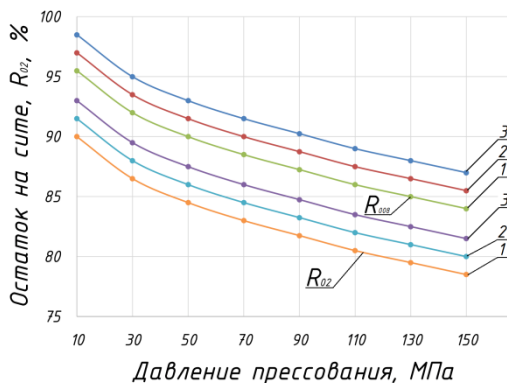


Рисунок 1 - Влияние давления прессования на тонкость измельчения при различной гранулометрии клинкера:  $(10...7) \cdot 10^{-3}$  м (1);  $(7...5) \cdot 10^{-3}$  м (2);  $(5...3) \cdot 10^{-3}$  м (3); - остаток на сите  $R_{008}$ : - остаток на сите  $R_{02}$

Анализ графической зависимости рис. 2 позволил установить, что с увеличением высоты исходного слоя клинкера эффективность процесса измельчения уменьшается, но остается достаточно высокой. Это свидетельствует о том, что измельчение материалов осуществляется не только по поверхности взаимодействия зерен с пуансоном, но и внутри слоя, а также о возможности установления в указанном диапазоне зазора между валками пресса, используемого для практической реализации предварительного измельчения клинкера. Известно, что при прессовании упругое расширение отрицательно влияет на плотность материала [6], а измельчение является процессом обратным прессованию. Исходя из этого, были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния давления прессования при различной исходной гранулометрии клинкера на величину упругого

расширения. Исследования проводились на стендовой установке (рис.3). Величина упругой деформации фиксировалась с помощью двух микрометров индикаторного типа с точностью измерения  $0,01 \times 10^{-3}$  м.

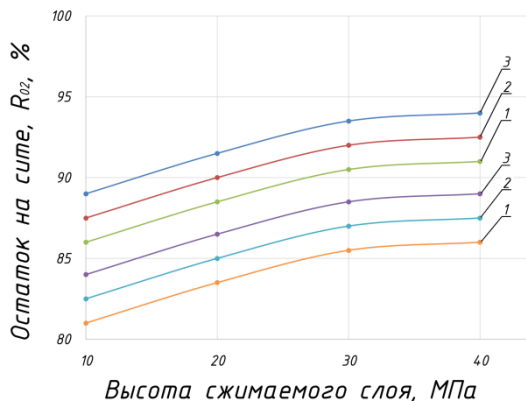


Рисунок 2 - Влияние высоты сжимаемого слоя на тонкость измельчения клинкера при различной исходной гранулометрии:  $(10 \dots 7) \cdot 10^{-3}$  м (1);  $(7 \dots 5) \cdot 10^{-3}$  м (2);  $(5 \dots 3) \cdot 10^{-3}$  м (3); остаток на сите  $R_{008}$ : остаток на сите  $R_{02}$

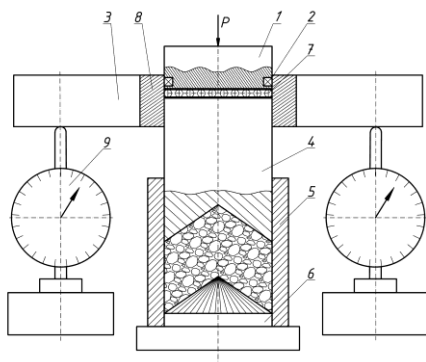


Рисунок 3 - Стендовая установка: 1 – прессующий пуансон; 2 – опорный подшипник; 3 – упор; 4 – подвижный прессующий пуансон с конической рабочей поверхностью; 5 – пресс – матрица; 6 – неподвижный прессующий пуансон; 7 – упорный подшипник; 8 – болтовое соединение, 9- микрометры

Микрометры располагались по обе стороны пресс-формы и, согласно среднему арифметическому от показателей микрометров индикаторного типа, строились графические зависимости, проанализировав которые установили, что величина упругого расширения для клинкера увеличивается с ростом давления.

В результате проведенных исследований (рис.4) было установлено, что рост исходной величины зерен отрицательно влияет на величину упругого расширения, так как разрушение зерен при прессовании осуществляется при меньшем давлении с уменьшением исходного размера зерна клинкера, т.е. все меньшая часть приложенного давления тратится на необратимые деформации. Следовательно, доля напряженного объема возрастает, что и вызывает рост упругого расширения с уменьшением исходных размеров зерен.

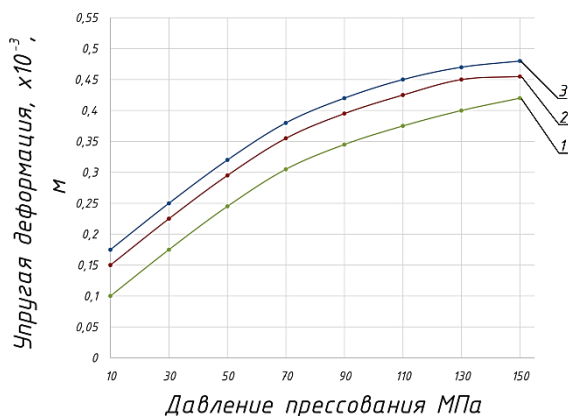


Рисунок 4 - Влияние давления прессования на упругое расширение клинкера при различной исходной его гранулометрии:  $(10...7) \cdot 10^{-3}$  м (1);  $(7...5) \cdot 10^{-3}$  м (2);  $(5...3) \cdot 10^{-3}$  м (3); - остаток на сите  $R_{008}$ ; - остаток на сите  $R_{02}$

### Выводы:

С увеличением давления прессования тонкость измельчения повышается, наиболее интенсивно прочес измельчения в пределах 30...90 МПа.

С увеличением высоты измельчаемого слоя от 10 до  $40 \times 10^{-3}$  м тонкость измельчения уменьшается на 10...15%.

Упругое расширение возрастает с увеличением давления и зависит от исходной granulometрии. Однако прирост величины упругого расширения уменьшается с ростом исходной величины зерен.

#### Список литературы:

1. Romanovich A.A., Romanovich M.A., Belov A.I., Chekhovskoy E.I. Energy-saving technology of obtaining composite binders using technogenic wastes // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Т. 1118. № 012035.
2. Romanovich A.A., Kolesnikov R.S., Romanovich M.A. Study of device for precompaction and uniform supply of materials to working bodies of aggregate // Materials Science and Engineering: Conf. Series. 2018. № 042052.
3. Малов П.Н., Тарабанов Н.С. О влиянии упругого последствия на свойства прессованных углеродистых материалов // Химия топлива. 1968. №1. С. 132-133.
4. Валкевич В.Л., Фмедлидер Г.И., Фортунатов Т.В. Диспергация и упругое расширение окисных зернистых масс при прессовании // Огнеупоры. 1970. №8. С. 45-48.
5. Попильский Р.Я., Кондрашев Ф.В. Прессование керамических порошков. Металлургия 1988. С. 27-28.
6. Романович А.А. Исследование влияния скорости вращения валков на выходные показатели процесса измельчения и разработка рекомендаций по повышению износостойкости их рабочих поверхностей // Вестник белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. №4. С. 71-73.
7. Пироцкий В.З. Совершенствование техники и технологии измельчения портландцементного клинкера: оценка эффективности помольных систем. М., 1986. С. 3-23 (Сб.тр./НИИЦемент, вып. 90)

## **ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ**

**Шевченко А.В., магистрант,  
Кравченко А.А., аспирант,  
Карпачев Д.В., канд. техн. наук, доцент**  
*Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова*

**Аннотация.** Рассмотрены способы отделения (раскрытия) рудных минералов от нерудных. Указаны принципы выбора агрегата для селективного измельчения горных пород. Отмечено, что струйный диспергатор удовлетворяет принципам селективного измельчения и требованиям на их основе, предъявляемым к организации процесса измельчения.

**Ключевые слова:** селективное измельчение, дезинтеграция, струйный диспергатор, рудный минерал.

При обогащении руд процессы измельчения занимают важное место. Эффективность обогащения руды в значительной степени определяется степенью раскрытия минералов в исходном сырье. Раскрытие минералов осуществляется путем измельчения руды до необходимой крупности, после чего выделяют полезный продукт [2, 10].

Применительно к обогащению руд селективное измельчение (дезинтеграция) рассматривается как способ наиболее полного отделения (раскрытия) рудных минералов от нерудных. Горная порода должна быть разделена на составляющие кристаллы минералов таким образом, чтобы полностью высвободить их, иначе говоря, раскрыть, разъединить сростки для того, чтобы затем разделить освобожденные зерна минералов, пользуясь различиями в их физико-химических свойствах [4, 7, 8, 9].

Наряду с общими принципами выбор конкретного способа и агрегата для избирательного измельчения руд (материала) должен соответствовать физико-химическим свойствам и минералогическому составу конкретной руды (материала). Наиболее эффективно применение избирательного измельчения руд, состоящих из минералов существенно различающихся по физико-химическим свойствам и геометрическим размерам.

Принципы, заложенные в основу традиционного измельчения материалов, и применяемое оборудование не вполне соответствуют задачам избирательного выделения минералов при обогащении руд,

поэтому довольно часто используют термин «дезинтеграция» – разделение, который наиболее полно соответствует цели разрушения рудных пород при обогащении.

Измельчение объекта по поверхностям раздела фаз – состоит из двух частей. Первую часть называют принципом геометрической селективности (избирательности), а вторую – принципом энергетической селективности (избирательности) [9].

Селективной дезинтеграцией называется процесс разрушения горных пород, протекающий и геометрически и энергетически. Фазой считают часть минерального вещества горной породы, обладающую определенным составом и структурой строения, отличающимися ее от других фаз и отграниченную от них поверхностью раздела.

С энергетической точки зрения образование полезной и избыточной частей новой поверхности при измельчении есть процесс упорядоченного преобразования энергии, поступающей от внешних источников. Энергетически селективным называется такое разрушение, при котором подводимая энергия расходуется только на образование новой поверхности.

Энергетическая проблема разрушения состоит в том, что коэффициент использования энергии составляет в лучшем случае десятые доли процента, т. е. подавляющая часть подводимой энергии не идет на образование новой поверхности, а рассеивается в материале.

Рациональная организация процесса селективного разрушения предусматривает на первом этапе направленное изменение свойств минералов и уже затем, на втором этапе, собственно селективное измельчение.

Подготовка руды к раскрытию минералов заключается в ее разупрочнении, которое проводится по межзерненным границам и обеспечивает необходимую избирательность в процессе измельчения.

Предварительной обработке должен подвергаться весь кусок руды и в этом случае разрушение приобретает объемный характер и может осуществляться в одну стадию. Начальные условия для разупрочнения созданы самой природой. На межфазной поверхности, как правило, наиболее высокая концентрация дислокаций и различных дефектов, которые создают на границе раздела энергетическую напряженность. В местах такой напряженности возникают зародышевые трещины, способствующие наиболее полному раскрытию минералов.

Для реализации условий селективного разрушения существует несколько способов. Для минералов, значительно отличающихся по

упругим свойствам, могут использоваться механические способы разрушения: сжатие при высоком давлении, низкочастотное знакопеременное напряжение или многократные, но малоинтенсивные соударения кусков материала друг о друга или о какую-либо поверхность.

Термический способ применяется для минералов, значительно различающихся термическим коэффициентом расширения. При наличии градиента температур на границах зерен возникают напряжения  $\sim 105$  Па при нагревании на один градус. Протекание термических эффектов, например полиморфных превращений, существенно усиливает процессы разрушения.

Акустический способ заключается в воздействии на руду колебаний высокой частоты. При прохождении через куски руды часть волновой энергии отражается, а часть поглощается на границах зерен вследствие различной пропускной способности и на границах зерен возникают интенсивные растягивающие напряжения.

Магнитострикционный способ применяется для ферромагнитных материалов. Воздействие переменных магнитных полей определенной частоты развивает напряжения на границах зерен или магнитных фаз в результате эффекта магнитострикции.

Вместе с тем нельзя не упомянуть о попытках поиска технологий селективного измельчения, периодически предпринимавшихся в течение длительного времени и не без некоторого успеха, но хаотично, в результате отдельных интуитивных озарений. Во многом ситуацию усугубляет бытующее мнение, что не может произойти коренных изменений в технике и технологии дробления и измельчения руд. Между тем уже в настоящее время имеются прообразы машин и отдельные элементы технологий Селективного измельчения, подготовленные к промышленному внедрению.

Для селективного измельчения горных пород, межзерновые границы в которых представлены структурами механического преобразования, открытых для доступа окружающей газовой среды, весьма эффективен способ дезинтеграции энергией сжатой газообразной среды. Сущность его сводится к нагнетанию под давлением воздуха, газа или пара в межзерновые промежутки с последующим резким сбросом давления в рабочей камере.

Измельчение взрывом по сравнению с традиционным механическим измельчением характеризуется значительно большей долей энергии, расходуемой полезно, по имеющимся данным на порядок. Такая ситуация объясняется тем, что по физической

организации взрыв более соответствует модели селективного измельчения [1].

Взрывное измельчение происходит в основном путем развития длинных трещин под действием растягивающих напряжений, образующихся в массиве, и расклинивающего действия газов. Места возникновения трещин не случайны. Они, как правило, берут начало от микродефектов в структуре массива.

Физическая сущность электроимпульсного (плазменного) измельчения заключается в том, что в этом случае расклинивающие и разрывные напряжения в межзерновых промежутках создаются за счет расширяющейся плазмы, образующейся при прохождении по межзерновым поверхностям высоковольтного разряда.

По сравнению с другими известными электрофизическими способами дезинтеграции электроимпульсный процесс имеет лучшие энергетические показатели, в частности, его энергоселективность на порядок выше, чем энергоселективность электрогидравлического способа.

Рассмотренные способы дезинтеграции являются наиболее перспективными с точки зрения селективного измельчения многофазных полиминеральных горных пород, но все они находятся в стадии разработки. Существуют другие, менее избирательные, но более реальные для широкого промышленного внедрения способы. К ним относятся: высокоскоростной удар и разрушение в слое материала.

В настоящее время наиболее распространенным и применяемым в различных областях производства является способ ударной дезинтеграции.

В момент удара в телах возникает сложное поле напряжений и деформаций в результате взаимодействия ударных волн: продольной, поперечной, поверхностной и отраженной. На межфазных границах минералов происходят поглощение ударных волн, что вызывает образование в этих зонах микротрещин и последующее межкристаллитное разрушение.

Динамичный характер нагружения при высокоскоростном ударе, возможность свободного разрушения единичных кусков, а также немедленного вывода продуктов разрушения из рабочей зоны создают предпосылки для рациональной организации ударной дезинтеграции.

Использование ударных дробилок и мельниц для селективного измельчения требует выбора и отработки оптимальной конструкции и, что самое главное, тонкого расчета режимных параметров, так как селективность процесса сильно зависит от точного соотношения значительного числа факторов: скорости ударного взаимодействия,



направления удара, жесткости соударяющихся тел и др.

Имеется несколько примеров удачного промышленного внедрения ударной селективной дезинтеграции при подготовке к обогащению специальных видов минерального сырья, когда требования к селективности раскрытия минералов имеют особое значение для технологии.

Применение ударных мельниц для рудного сырья требует повышения их энергонапряженности, что сдерживается достигнутым пределом скоростей соударения. Превышение скорости 100 м/с позволит выйти на новый качественный уровень.

Наиболее целесообразно в данной мельнице осуществлять процесс селективного измельчения, который основан на неодинаковой степени измельчения прочных и слабых пород. В зависимости от физико-механических свойств минералов, слагающих исходные куски, подбирая необходимое число ступеней измельчения и скорость вращения ротора, на выходе можно достигнуть определенной степени обогащения материала. Компоненты материала, имеющие малую прочность, будут измельчаться и, пройдя через зазоры между стержнями, попадут в бункер, а недоизмельченные частицы более прочного материала через патрубок будут удалены из мельницы.

Таким образом, при использовании данной конструкции многоступенчатой мельницы имеются более широкие возможности для осуществления селективного измельчения.

Для селективного измельчения ударным способом с целью подготовки материала к обогащению наиболее эффективны механические центробежные дезинтеграторы бильного типа и струйные мельницы [3, 5, 6].

Широкое применение техники для ударного избирательного измельчения в промышленном масштабе пока сдерживается нехваткой агрегатов высокой единичной мощности. Конструкции этих аппаратов общеизвестны, но для работы в режиме селективного измельчения они также требуют доработки и оснащения системой точного регулирования и управления процессом.

Более широкие возможности с точки зрения верхнего предела крепости перерабатываемого материала – у газоструйной техники. В настоящее время по ряду различных причин практически прекращены конструкторские разработки в данном направлении, а серийный выпуск, судя по анализу литературных и рекламных источников, мельниц в России не осуществляется.

Недостаток этих агрегатов, помимо низкой единичной мощности –

высокий удельный расход электроэнергии, который более чем вдвое превышает соответствующие затраты шаровых мельниц. Однако, при раскрытии промпродуктов, переработке весьма тонковкрапленных руд, при получении сырья для порошковой металлургии и механической активации концентратов перед гидрометаллургическими и химическими процессами переработки, а также при необходимости совмещения измельчения с сушкой или обжигом применение струйных мельниц может стать экономически более выгодным.

В ходе проведения анализа было отмечено, что различные конструкции оборудования для измельчения нашли своё место в современных технологиях для селективного измельчения. Однако это утверждение в меньшей степени относится к пневмоструйным мельницам. Их широкому внедрению препятствовало конструктивное несовершенство существующих установок применительно к технологии избирательной рудоподготовки моно- и полимерных руд с выделением (или без выделения) трудноизмельчаемых компонентов. Хотя, если будут созданы достаточно эффективные и надёжные струйные мельницы, они будут конкурентоспособными с другими традиционными измельчителями, которые используют для селективного измельчения.

Анализ современного состояния теории и практики процессов измельчения в струйных мельницах позволяет сделать вывод о том, что одними из направлений развития таких измельчителей является повышение удельной производительности, уменьшение удельного расхода энергоносителя и износа рабочих элементов. При этом следует уделить повышенное внимание не только оптимизации процесса движения частиц материала на участке их разгона и в самой помольной камере, а также времени их нахождения в помольной камере и других рабочих трактах (органах) подобных установок. Решение данной задачи позволит существенно повысить производительность струйных противоточных мельниц, и снизить энергозатраты при использовании в технологии селективного измельчения и обогащения материалов.

Таким образом, создание конструкции струйного измельчителя, который бы удовлетворял принципам селективного измельчения и требованиям на их основе, предъявляемым к организации процесса селективного измельчения, является важной задачей и имеет практический интерес в области производства высококачественных строительных материалов с выделением (или без выделения) трудноизмельчаемых компонентов; керамической, полимерной, лакокрасочной и других промышленности.

### Список литературы:

1. Гейман Л.М. Взрыв. М.: Наука, 1978.
2. Емелин М.А., Морозов В.Н. и др. Новые методы разрушения горных пород. М.: Недра, 1990. 240 с.
3. Каляцкий И.И., Курец В.И., Финкельштейн А.Г., Цукерман В.А. Основы электроимпульсной дезинтеграции и перспективы ее применения в промышленности // Обогащение руд. 1980. №2 С.6-11.
4. Карпачев Д.В., Уваров В.А., Степанов А.В. К вопросу о теории хрупкого разрушения неметаллических материалов // Сб. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. молодых уч. / Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 1999. Ч.3. С.48-53.
5. Карпачев Д.В. Совершенствование технологии измельчения и обогащения рудных и нерудных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №2. С.103-107.
6. Клочков Н.В., Пискунов А.В. Динамика формирования грансостава полимерного материала при измельчении в центробежной мельнице // Интенсификация процессов механической переработки сыпучих материалов: Межвуз. сб. науч. тр. Иваново, 1987. С.22-25.
7. Линч А.Д. Цикл дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. М.: Недра, 1981. 343 с.
8. Макклinton Ф., Аргон А. Деформация и разрушение материалов. М.: Мир, 1970. 443 с.
9. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др. Селективное разрушение материалов. М.: Недра, 1988. 286 с.
10. Троицкий В.В. Обогащение нерудных строительных материалов. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 192 с.