

Н. Ф. Глухарев

СУХОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОНЕЙТРАЛИЗАЦИИ

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2014

УДК 666.94:621.762

ББК 35.41:34.39

Γ55

Рецензенты:

Академик РАН, научный руководитель НЦ «Порошковое материаловедение» В. Н. Анциферов

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, профессор Пермского национально-исследовательского политехнического университета $B.\ \Phi.\ Oлонцев$

Действительный член (академик) РАЕН, доктор технологических наук, исполнительный директор Института проблем нанотехнологий УрО РАЕН ${\it Л}$. ${\it M. Оленев}$

Глухарев Н. Ф. Сухое измельчение в условиях электронейтрализации / Н. Ф. Глухарев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 192 с.

Монография посвящена вопросу интенсификации сухого измельчения твердых природных и техногенных материалов. Рассмотрены негативные проявления электризации этих материалов при измельчении, действие которой представлено в виде электростатической составляющей сопротивления материалов измельчению.

Экспериментально и теоретически доказана возможность упреждающей нейтрализации активируемых в материале при механическом воздействии электроносителей с помощью разработанного аппаратного нейтрализатора. Приведены многочисленные примеры интенсификации при многовариантных схемах измельчения разнообразных материалов.

Монография представляет интерес для студентов ВУЗов, научных и инженерно-технических работников не только для подробного ознакомления с электрофизической интенсификацией при измельчении, но и для информации о современном оборудовании, на котором испытания технологии проводились за рубежом.

Ил. 72, табл. 28, список литературы 125 названий.

- © Н. Ф. Глухарев, 2014
- © Закрытое акционерное общество «ЭКОФОР», 2014
- © Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014

ISBN 978-5-7422-4320-5

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	7
Глава 1. Измельчение твердых материалов	9
1.1. Твердые коллоидные системы	9
1.2. Способы сухого измельчения	10
1.3. Научные основы измельчения	11
1.4. Роль дефектов структуры при измельчении	15
1.5. Электрофизика измельчения	17
Глава 2. Электризация и нейтрализация при измельчении	21
2.1. Электризация диэлектрических материалов	21
2.2. Исследование электрического потенциала свежеизмельченно	ого
материала	24
2.3. Электрофизические процессы внутри мельницы	26
2.4. Роль заземления при измельчении	28
2.5. Роль поверхностного слоя мелющих тел в интенсификации	
измельчения	30
2.6. Характеристика активного нейтрализатора	33
Глава 3. Конусные дробилки	37
3.1. Конусная эксцентриковая дробилка	37
3.2. Конусная инерционная дробилка	40
Глава 4. Шаровые мельницы открытого цикла помола	47
4.1. Достоинства и недостатки шаровых мельниц	47
4.2. Усовершенствование помола в шаровых мельницах	49
4.3. Электризация в шаровой мельнице	51
4.4. Активная электронейтрализация в шаровой мельнице	53
4.5. Особенности работы шаровой мельницы при электронейтрал	тизации
	58

4.	.6. Условия испытания мельницы, требующие согласования	60
4.	.7. Динамика интенсификации помола при включении устройства	61
4.	.8. Результаты испытаний шаровых мельниц открытого цикла	67
Глава	5. Замкнутые системы помола с шаровыми мельницами	69
5.	.1. Современные мельницы замкнутого цикла помола	69
5.	2. Динамические сепараторы	72
5.	.3. Статический V – сепаратор	78
5.	.4. Современный контроль качества измельчения	80
5.	.5. Особенности работы системы помола замкнутого цикла	85
5.	.6. Рекомендации по работе с системой помола замкнутого цикла	89
5.	.7. Динамика интенсификации помола при включении устройства	92
5.	.8. Экспертная система управления	98
5.	.9. Шаровая мельница сырьевой муки	103
Глава	6. Валковые измельчители	108
6.	.1. Вертикальные валковые мельницы	108
	.2. Системы помола с предварительным измельчением	
6.	.3. Валковая мельница Horomill	129
Глава	7. Совместная работа интенсификаторов помола и активного	
	нейтрализатора	133
Глава	8. Вибрационные мельницы	141
8.	.1. Конструкция вибрационной мельницы	141
8.	2. Помол химически осажденного мела	142
8.	.3. Помол гранулированной серы	145
8.	.4. Помол полистирола ПСН	147
8.	5. Помол кокса непрокаленного	148
8.	.6. Помол доломита	149
8.	.7. Помол полифосфата аммония	151
8.	.8. Помол керамической шихты	152

Глава 9. Центробежно-ударные дробилки и мельницы					
Глава 10. Расширение сферы использования технологии	Глава 10. Расширение сферы использования технологии				
электронейтрализации при переработке материалов	156				
10.1. Универсальность технологии электронейтрализации	156				
10.2. Спекание материалов	157				
10.3. Кристаллизация сплавов	160				
10.4. Производство углеродного восстановителя	161				
10.5. Нагрев и испарение жидкости	162				
Заключение	165				
Приложение 1	166				
Приложение 2	171				
Список литературы	181				

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка технологии электрофизической нейтрализации для интенсификации сухого измельчения выполнена в ЗАО "ЭКОФОР», которое было учреждено несколькими изобретателями в 1992 году как инновационная, научно–производственная компания. Многочисленные испытания этой технологии были проведены под руководством и с участием Н.Ф.Глухарева, а также В.Г. Левинсона, В.С. Морозова, А.П.Боруцкого, В.Т. Макеева, С.А. Кононенко.

Монография написана с использованием материалов публикаций автора в России и за рубежом, в том числе серии статей, опубликованных с 2000 по 2012 год в журнале «Цемент и его применение», редакция которого проявила внимание и поддержку отечественному изобретению.

Автор выражает благодарность за научно—техническое редактирование книги канд. техн. наук Ю.В. Никифорову и за помощь в её оформлении руководителю проекта А.А. Шкурову.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема энергосбережения при измельчении твердых материалов природного и техногенного происхождения весьма актуальна, учитывая ежегодные более двадцати миллиардов тонн их переработки в мире при значительном энергопотреблении.

Существенный вклад в решение этой проблемы в прошлом веке был внесен академиком П.А. Ребиндером [1], открывшем явление адсорбционного понижения хрупкой прочности твердых тел при диспергировании. При этом упругая энергия, накопленная в материале за счет предшествующей деформации, минуя этап его пластифицирования, приводит к более интенсивному образованию новых поверхностей. При дальнейшем увеличении удельной поверхности наступает этап агрегации мельчайших частиц и адгезии их на поверхности мелющих тел, в чём академик Б.В. Дерягин преимущественную роль отдавал электростатическим силам. Механизм адсорбции также определяется силами электростатического взаимодействия и является антистатическим. Это предполагает использование не только реагентных, поверхностно-активных, но и аппаратных, электрофизических средств нейтрализации.

Данная книга является первой монографией, посвященной вопросам электризации твердого материала и его нейтрализации при сухом измельчении. Предложено выделить электростатическую составляющую сопротивления материала механическому воздействию и уменьшить препятствующую измельчению электризацию за счет оригинальной аппаратной нейтрализации. То есть предотвратить негативное действие электрической энергии при измельчении, приводящее к заживлению части трещин после ударов, преждевременной агрегации и налипанию на мелющие тела. При этом доля упругой энергии деформации, ранее переходившая в электрическую энергию, используется полезно для образования дополнительных поверхностей.

В монографии обобщены результаты экспериментального исследования электризации диэлектрического материала при диспергировании. Выявлена роль дислокационного «дебри-слоя» на поверхности мелющих тел и возможность его управляемого реструктурирования для обеспечения стекания излишнего положительного заряда на землю. Разработан активный нейтрализатор, используемый при измельчении для интенсификации образования новых поверхностей, что приводит к снижению удельного расхода электроэнергии при производстве продукта.

В монографии также представлены примеры использования технологии электронейтрализации на различных типах дробилок и мельниц. Исследована возможность интенсификации измельчения в производстве цемента, извести, спека глинозема, палладиевого катализатора, мела, гранулированной серы, непрокаленного кокса, доломита, магнезита, полифосфата аммония, керамической шихты, полистирола ПСН.

Разработаны методики повышения производительности мельницы со снижением её удельного энергопотребления, взаимосвязанного регулирования параметров в системах замкнутого цикла помола.

Приведены результаты электронейтрализации для систем предварительного измельчения, где невозможно использование реагентных интенсификаторов помола. Показаны преимущества совместного использования реагентных и аппаратных средств для максимальной интенсификации работы шаровых мельниц.

Проведя, начиная с 1995 года более 180 предпродажных испытаний в 42 странах мира, технология пережила попытки, как и всё не банальное, её опровергнуть — «не может быть, потому что не может быть никогда!» и уверенно находится на стадии «в этом что-то есть!». Хотелось бы, чтобы появление монографии помогло перейти ей на этап «так это всем известно!».

Глава 1

ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Твердые коллоидные системы

Минералогией описаны несколько тысяч минералов, которые образовались в Земле под действием её внутренней температуры и давления. Такое значительное число продуктов разнообразных естественных реакций является следствием происходивших и происходящих в ней физико-химических процессов. Магма состоит из соединений кремния и содержит все известные элементы. Частично она изливается на поверхность, образуя вулканические породы. Верхние же слои магмы постепенно застывали, силикаты образовывали при этом кристаллические породы. Эти соединения представляют собой твердые многофазные растворы, имеющие коллоидно-электрохимическую природу, которая особо важна для данного исследования. Они включают в себя соединения кремния, кальция, алюминия, железа, магния и многих других элементов. В результате действия Солнца и воды поверхностные горные породы растрескиваются, разрушаются, выветриваются, распадаются на составляющие минералы, с помощью движения воды входят в состав осадочных пород. К осадочным породам относятся глинистые отложения и известковые продукты жизнедеятельности организмов. Освоение и использование, в частности, твердых недр Земли составляет предмет горного дела. Горную породу, представляющую собой поликристаллический материал с анизотропными свойствами, надо добыть, разрушить до слагающих её минералов, и отделить от пустой породы для дальнейшего использования.

Кроме природных твердых материалов человеком искусственно создаются так называемые техногенные твердые материалы. К таким технологиям относится, например, производство цемента из спекаемого цементного клинкера. Он тоже является твердым коллоидным раствором, который требуется измельчить до состояния сверхтонкого порошка.

Таким образом подавляющее большинство материалов, подлежащих разрушению, существуют в коллоидном состоянии и являются дисперсными системами, состоящими из двух или более фаз, которые не смешиваются и химически не реагируют друг с другом, обладая достойными внимания поверхностными свойствами. Эти свойства особенно важны для высокоразвитых поверхностей.

1.2. Способы сухого измельчения

Измельчение или диспергирование твердых материалов, характерное как для природных так и техногенных материалов, является первым этапом их весьма энергозатратной переработки. При этом выделяются три главных направления измельчения: переработка разнообразных руд [2], производство щебня [3] и тонких порошков [4, 5].

Для первых двух направлений достаточно селективно разрушить руду или, например, гранит по относительно слабым местам, находящимся на границах фаз, не задевая зерен минералов. Материал в этом случае характеризуется прочностью, характеризуемой напряжением разрушения, соответствующем энергии атомов на поверхности раздела. Такое измельчение принято считать дроблением.

При измельчении до состояния тонких и сверхтонких порошков с такой прочностью имеют дело только в начале измельчения, а потом с большими напряжениями преодолевается прочность, при которой разрушение идет по объёму кристаллов. Эта прочность соответствует энергии кристаллической решетки. Такое измельчение относится к помолу.

Условная граница между дроблением и помолом проходит на уровне размера материала ~ 5мм [2]. При этом крупное дробление производят на конусных или щековых дробилках до размера кусков материала 100 – 350 мм, среднее – на конусных дробилках до размеров 40 - 100 мм, а мелкое – в конусных дробилках до 10 – 30 мм. Грубый помол до размера 2 – 6 мм сейчас уже редко проводится в стержневых мельницах, тонкий помол в шаровых

мельницах до 0.5 - 1.0 мм, а сверхтонкий в шаровых и последние годы в вертикальных валковых мельницах до размеров 5 - 100мкм. Если требуется получить еще более тонкий помол, необходимо использовать вибрационные мельницы.

Самым неэффективным способом измельчения является раздавливание материала. При такой деформации первоначально вынуждены закрываться зародышевые трещины материала, а напряжение должно превысить максимальный по своей природе предел прочности на сжатие. При раскалывании действует напряжение растяжения и в результате образуется разрыв. В результате изгиба происходит излом материала. При истирании внешние слои материала сдвигаются, и слой за слоем срезаются. При ударе, самом эффективном способе измельчения, нагрузки носят динамический характер.

Измельчение по технологическим требованиям бывает сухим или мокрым. Удельный расход электроэнергии на помол при сухом способе помола на 30% выше, чем мокрого [6], что связано с поверхностно активными, интенсифицирующими свойствами воды. В данной работе исследуется эффективность сухого способа измельчения, вопрос энергосбережения которого более актуален.

1.3. Научные основы измельчения

Научной основой геологических процессов происхождения минералов, их выветривания, образования глинистых пород и отложений, а также их искусственного измельчения является коллоидная химия [1]. Она является разделом физической химии, рассматривающей процессы образования и разрушения дисперсных систем, а также поверхностные свойства на границах раздела фаз в этих системах. Особый интерес для данного исследования представляют электрические свойства поверхностных слоев в дисперсных системах.

Такой обобщающий подход к вопросам измельчения предварялся рассмотрением этого процесса как чисто механического, поскольку теория процесса измельчения основывалась на положениях классической механики сплошной среды [7]. Это было вызвано необходимостью определения мощности, потребной для измельчения, и являлось не простым вопросом, учитывая, что дисперсности продуктов для разного их использования значительно различаются. Первоначально были предложены экспериментально выявленные закономерности для измельчения идеально хрупкого тела, при котором образовавшиеся при измельчении части можно было бы сложить и получить совпадение с исходным. К таким закономерностям относятся:

- закон Реттингера для тонкого измельчения, по которому работа измельчения пропорциональна вновь полученной поверхности;
- закон Кика Кирпичева для крупного дробления, по которому работа, затрачиваемая на измельчение пропорциональна объему перерабатываемого материала;
- закон Бонда для среднего дробления, занимающий промежуточное положение между первыми двумя законами.

На самом деле картина становится более сложной, если учесть, что при разрушении твердых тел имеет место пластическая деформация. Для этих условий было получено уравнение объемного деформирования твердого тела по созданию новых поверхностей с учетом упругих и пластических деформаций [8].

Реальные значения предела прочности твердого тела почти на порядок меньше её теоретических значений, рассчитанных на основании сил межатомных связей. В 1920 году английский ученый А. Гриффитс предположил, что эта разница является следствием преимущественного наличия на поверхности твердого тела зародышевых микротрещин, в которых концентрируются прилагаемые напряжения, и разработал энергетический критерий существования трещины [9]. Процесс разрушения, приводящий к образованию новых поверхностей, происходит за счет упругой энергии, накопленной в теле за счет предшествующей деформации. В соответствии с энергетическим критерием трещина самопроизвольно растет вплоть до разрушения, если

освобождающаяся часть энергии упругой деформации больше, чем это необходимо для образования новой поверхности с соответствующей энергией, как результат реализации трещины. Таким образом, возникла гипотеза, которая послужила основой для дальнейшего развития представления о процессе разрушения, как процессе возникновения и роста трещин [10].

В коллоидной химии был выделен раздел физико-химической механики, которая изучает закономерности формирования и разрушения твердых тел, образования дисперсных систем. Его возникновение связано с трудами П.А. Ребиндера [1, 11], который, изучая поверхностные явления в дисперсных системах, открыл явление адсорбционного влияния среды на механические свойства вещества, в том числе адсорбционного понижения хрупкой прочности твердых тел. Организационно исследования в этих областях проводились в основанном в 1939 году Коллоидном электрохимическом институте АН СССР, который в дальнейшем был преобразован в Институт физической химии и электрохимии АН СССР. Общим для этих двух институтов РАН и в настоящее время является научное направление по изучению поверхностных явлений в коллоидно-дисперсных системах, физико-химическая механика и адсорбционные процессы.

Прочность твердого тела зависит от сил сцепления молекул, атомов, ионов. Часть вещества, находящаяся на поверхности раздела фаз, обладает свойствами, отличными от свойств этого вещества в объеме [12]. Силы сцепления для поверхности твердых коллоидных растворов в определенной степени аналогичны силам поверхностного натяжения в жидкостях. На границе раздела поверхности твердого тела интенсивность межмолекулярного взаимодействия слабее, чем в его объеме. Равнодействующая этих сил направлена вглубь твердого тела. Они способствуют стремлению молекул поверхностного слоя переместиться в глубину твердой фазы, и таким образом имеет место сжатие поверхности [13]. Это связано и с понятием поверхностной энергии, как избытка энергии на границе раздела, которая необходима для

существования этой поверхности. Адсорбционные слои поверхностноактивного вещества (ПАВ) на поверхности твердого тела отвлекают на себя межмолекулярные силы сцепления, которые связывают поверхностные частицы дисперсной фазы. Поверхностная энергия снижается, также как и работа по образованию новой поверхности на границе с ПАВ.

Коллоидная структура твердых тел имеет сетку микротрещин. Новые поверхности образуются в первую очередь при деформациях на основе этих слабых мест, причем наиболее эффективно, если новые поверхности успевают покрыться адсорбционными слоями ПАВ. Наибольшую чувствительность проявляют трещины, выходящие своими устьями на поверхность. В природе таким ПАВ выступает вода, которая вследствие адсорбции, способствует процессам разрушения природных твердых тел. В технике используются более активные жидкости.

Разупрочняющий механизм действия ПАВ первоначально объясняли проникновением их в трещины с расклинивающим действием. Это справедливо для трещин значительного размера и медленной скорости нагружения твердого тела. Но часть поперечного сечения трещин и микропор в материале меньше поперечного сечения молекул ПАВ, они не могут проникнуть внутрь измельчаемого материала.

В дальнейшем механизм действия ПАВ объяснили тем [14], что при образовании трещины ионы материала приходят в неравновесное состояние, не уравновешенное разорванными связями. Находясь в активированном состоянии, они смещаются в сторону притягивающих их к себе мигрирующих ионов ПАВ, в том числе в устья трещин. Адсорбционные слои, мигрируя по поверхности и достигая устьев трещин, препятствуют их смыканию. При этом молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности полярными группами к твердому телу, как это показано на рисунке 1.1. С увеличением концентрации ПАВ усиливается взаимодействие углеводородных цепей между собой, что благоприятствует вертикальной ориентации их молекул и максимальной адсорбции.

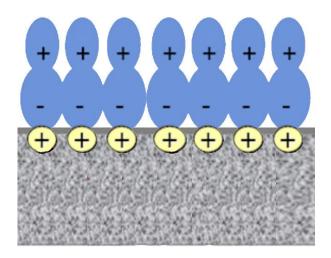


Рисунок 1.1. – Адсорбция молекул ПАВ на поверхности твердого тела

Поверхностные явления при деформировании и разрушении требуют затраты энергии на образование новых поверхностей. Эффект П.А.Ребиндера заключается в снижении пластичности и прочности твердых тел вследствие снижения поверхностной энергии во время деформации и развития трещины. То есть новые микротрещины, в том числе в самих кристаллах, могут в этом случае образовываться при меньших напряжениях.

Кроме улучшения размалываемости твердого материала при использовании ПАВ предотвращается адгезия измельченного материала в виде образования твердой оболочки на мелющих телах и отодвигается в область более высоких значений удельной поверхности агрегация сверхтонких частиц.

1.4. Роль дефектов структуры при измельчении

Подход к вопросам деформации твердого тела строится с учетом его неоднородностей и дефектов внутреннего строения. Процесс его разрушения многостадиен [15] и начинается в местах скопления этих дефектов.

Кристаллическая решетка с элементарными частицами, атомами или ионами в узлах, имеет большое количество дефектов её строения [9]. К ним относятся точечные, линейные и поверхностные дефекты.

Точечными дефектами являются свободные места в узлах решетки – в основном тепловые вакансии от мигрирующих атомов, называемые дефектами Шотки. Сместившиеся из узлов решетки в межузельные промежутки атомы названы дефектами Френкеля. Как в узлах, так и в межузлиях встречаются примесные атомы. Точечные дефекты увеличивают сопротивление решетки дальнейшему смещению атомов, что способствует упрочнению кристаллов.

К линейным, наиболее важным дефектам, являющимся инструментом механизма пластической деформации, относятся дислокации: краевые с лишней атомной полуплоскостью и винтовые с нарушением параллельности атомных слоев. Дислокациям условно была присвоена полярность, положительная и отрицательная. Причем дислокации одного знака отталкиваются друг от друга, а противоположного притягиваются и аннигилируются. Деформация же твердого тела происходит не путем одновременного смещения целых атомных плоскостей, а более легким путем за счет перемещения дислокаций.

К поверхностным дефектам относятся места стыков по-разному ориентированных участков кристаллической решетки, границы зерен и фрагментов.

Ко времени открытия эффекта П.А.Ребиндера теория дислокаций ещё не сформировалась. Впоследствии на эти неустойчивые, с избыточной энергией дефекты кристаллической структуры было обращено серьезное внимание. Все твердые тела обладают такими дефектами структуры, они составляют приблизительно один процент всех кристаллических связей. Дислокации стремятся выйти на поверхность твердого тела, а процесс его деформации рассматривается с учетом теории дислокаций.

Хрупкому разрушению предшествует пластическая деформация, вызываемая движением дислокаций в кристаллах. Их движение тормозится примесными атомами и границами зерен. При разрушении развитие уже существующей трещины связано с работой по созданию свободной поверхност-

ной энергии и удельной работы пластической деформации, которая во много раз больше свободной поверхностной энергии.

На стадии развития микротрещины большое значение имеют ПАВ, ослабляющие связи на поверхности материала. Поскольку дислокации обладают избыточной свободной энергией, то на них происходит активная адсорбция ПАВ и увеличивается количество трещин, приводящих к разрушению материала. Причем, чем больше дефектов, тем сильнее действие ПАВ, а на бездефектных структурах оно отсутствует.

Адсорбционный слой ПАВ препятствует выходу дислокаций на поверхность и исключает затраты энергии на пластическую деформацию. При торможении дислокации скапливаются на разного рода препятствиях, пластическая деформация прекращается. Это приводит к концентрации напряжений в этих местах и образованию зародышевых микротрещин путем растяжения или сдвига. Развитие и объединение этих трещин проявляется в образовании магистральной трещины разрушения твердого тела на несколько частей.

Таким образом, современная теория зарождения трещин в кристалле основывается на дислокационной модели.

1.5. Электрофизика измельчения

Известно, что ни одно изменение в природе не происходит без сопровождения его какими-либо электрическими явлениями. Это относится и к изменениям, происходящим в процессе измельчения неоднородных твердых материалов. Процесс разрушения твердого тела не является лишь чисто механическим процессом его деления, а сопровождается электрофизическими явлениями, в том числе разрывом двойных электрических слоев, которые образовались ориентированными полярными молекулами в соприкасающихся фазах при их стремлении к уменьшению поверхностной энергии. Причем, чем быстрее происходит разрыв двойного электрического слоя, тем более высокого уровня достигает плотность заряда.

У молекул вновь образованного поверхностного слоя имеется избыток свободной энергии из-за нескомпенсированности поверхностных сил сцепления. Электрические заряды на поверхности измельченных частиц материала как форма проявления этой энергии являются действующим фактором, поскольку свежие поверхности после разрушения твердых тел становятся динамически неравновесными, возбужденными системами [16]. Эти поверхности, оказываясь электрически заряженными, потребляют часть работы разрушения [17]. Из тонкого поверхностного слоя происходит также и излучение заряженных частиц в виде механоэмиссии электронов. Сама же поверхность материала при этом имеет избыточный положительный заряд. Он создаёт напряженность электрического поля, которая может достигать пробоя при коронном разряде.

Правило уравнивания полярностей П.А.Ребиндера свидетельствует о том, что при использовании ПАВ процесс адсорбции идет в сторону выравнивания полярностей фаз и тем сильнее, чем больше первоначальная разность полярностей. Тенденция системы к уменьшению сил поверхностного сцепления, обусловленная разностью полярностей двух фаз, определяет ориентацию молекул ПАВ в поверхностном слое. Такие поверхности, как уже указывалось, имеют свободные связи и электрически заряжены. Полярные группы ПАВ ориентируются к полярной фазе, а углеводородные радикалы — к неполярной. Полярные ПАВ насыщают вновь образованные положительно заряженные поверхности, возникают Ван-дер-Ваальсовы силы между поляризованными частицами. Они ответственны за физическую адсорбцию на поверхности твердых тел, поскольку характерные для хемосорбции химические связи в этом случае отсутствуют.

Таким образом, имеет место реагентная нейтрализация заряда поверхности материала с помощью адсорбции ПАВ [18]. Определение адсорбции, как процесса перехода растворенного вещества из объемной фазы в поверхностный слой, связанный с изменением свободной поверхностной энергии слоя, никак этому не противоречит. Правило уравнивания полярностей

П.А.Ребиндера можно трактовать, как правило нейтрализации при адсорбции. Нейтрализованные в результате адсорбции поверхности уже не могут сомкнуться после ударов, как это было ранее под действием разнополярных зарядов, и размалываемость материала улучшается.

При достижении удельной поверхностью измельченного продукта уровня около 3200 см²/г, если не используются ПАВ, наблюдается агрегация сверхтонких частиц и налипание их на мелющие тела. Это снижает производительность мельницы и повышает удельные затраты на помол материала. Агрегация, как пространственная группировка, и адгезия дисперсных частиц в более крупные вторичные частицы, происходят по причине высокой свободной энергии, связанной с электризацией измельчаемого материала [19].

Металлы имеют очень высокую поверхностную энергию, поэтому адгезии измельченных частиц на мелющих металлических телах очень прочна. При разработке теории адгезии твердых тел Б.В. Дерягин [16] уделял особое значение электростатической составляющей силы адгезии, которая обусловлена двойным электрическим слоем на межфазных границах. Экспериментально было доказано, что адгезия определяется в основном электростатическими силами и что величина электрических сил адгезии выше сил межмолекулярного сцепления. Современные исследования двойного электрического слоя показали [20], что распределение заряда по поверхности твердого тела носит не непрерывный, а дискретный характер. Высказана также гипотеза, что перенос электрического заряда при этом носит туннельный характер [21].

Предотвращение влияния электростатической составляющей силы адгезии интенсифицирует процесс измельчения твердых тел за счет исключения налипания на мелющие тела и агрегации порошка.

При анализе совокупности физико-механических эффектов и явлений было показано [5, 22], что при протекании процесса измельчения наряду с образованием полезной свободной энергии новой поверхности, энергии структурных преобразований, кинетической энергии осколков, тепловой энергии образуется и электрическая энергия. Она препятствует процессу из-

мельчения. Поэтому для повышения эффективности измельчения необходимо снизить эту часть бесполезной для процесса измельчения энергии, как это происходит, например, со снижением потерь энергии на пластифицирование материала с применением ПАВ.

В данной работе обращено внимание на необходимость снижения затрат энергии на электризацию измельчаемого материала, её предотвращение, что сказывается на улучшении размалываемости материала, снижении агрегации сверхтонкого порошка и его адгезии к мелющим телам, а в итоге на уменьшении удельного расхода энергии при измельчении. Эти результаты в определенной степени достижимы с применением адсорбционного, нейтрализирующего воздействия ПАВ, имеющего, тем не менее, расходный характер. Дополнительно, а в ряде случаев альтернативно к технологии применения ПАВ разработано и внедряется аппаратное, безрасходное средство для снижения негативных проявлений электризации материала во время измельчения — активный нейтрализатор (в дальнейшем устройство ЭКОФОР®) [23, 24].

Глава 2

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ И НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ

2.1. Электризация диэлектрических материалов

Теоретическое обоснование электризация получила в наибольшей степени в физике диэлектрических материалов [25, 26]. Исходя из интересов электротехники, физика диэлектриков в основном рассматривала вопросы их поляризации во внешнем электрическом поле. Перемещение заряда в диэлектрике происходит в пределах молекулы. Это упругое перемещение в пространстве большого количества заряженных частиц, но на очень малые расстояния, приводит к возникновению емкостного тока смещения.

При поляризации в объеме диэлектрик остается электрически нейтральным кроме тонкого слоя у его поверхности, где обнажаются так называемые связанные заряды. В случае неоднородного диэлектрика связанные заряды появляются на границах раздела частей диэлектрика, как на границах раздела фаз, обладающих различными диэлектрическими проницаемостями. Даже в случае теоретически проработанной поляризации во внешнем электрическом поле неоднородные диэлектрические системы имеют очень сложную картину поляризации в постоянном и переменном электрическом поле.

Ещё сложнее выглядит процесс электризации в диспергирующих средах. По Л.Д. Ландау [27] в общем случае произвольной дисперсии оказывается невозможным какое-либо разумное определение электромагнитной энергии как термодинамической величины. Это обусловлено тем, что наличие дисперсии связано с одновременным рассеиванием энергии. Диспергируемая среда является поглощающей, а рассеивание сопровождается выделением тепла. Диэлектрические свойства твердого тела меняются и при сдвиговых деформациях, становятся зависимыми от их направления диэлектрические свойства материала.

По этим причинам вопросы электризации при измельчении, например, в производстве цемента, ранее не рассматривались. Механизм электризации

после мельницы проявляется слабо, был малопонятен, даже несмотря на работы Института физической химии АН СССР. С точки зрения фундаментальной науки наличие электрических поверхностных явлений в дисперсных системах было подтверждено и обоснована картина происходящего на базе физико-химической механики, теории двойного электрического слоя и теории дислокаций. Известен был также эффект Степанова [28, 29], который обнаружил электрический потенциал на поверхности деформированных кристаллов при отсутствии внешнего электрического поля и объяснил это заряженностью движущихся дислокаций. Но, когда в 1996 году группой изобретателей был предложен [30] электрофизический способ интенсификации процесса помола цемента, это вызвало у некоторых специалистов сомнение вплоть до неприятия.

Тем не менее, фазовые контакты неизбежно развиваются в клинкере при спекании с образованием кристаллических, смешанных соединений. В результате развивается твердая, коллоидная, частично пористая диэлектрическая структура, представленная на рисунке 2.1.

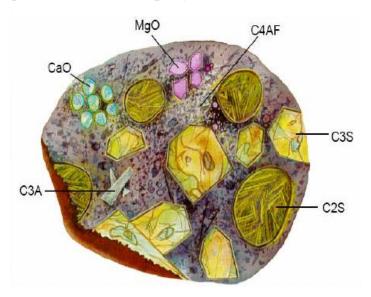


Рисунок 2.1. – Структура цементного клинкера

Такая неоднородная дисперсная система, с наличием большого количества двойных электрических слоев на границах раздела фаз, подлежит значительной структурной электризации при внешнем механическом воздействии.

Другим подтверждением электризации диэлектрических материалов при механическом воздействии является пьезоэлектричество. Физическая химия силикатов [31] при изучении свойств твердых материалов обращает внимание на пьезоэлектрики — кристаллические диэлектрики без центра симметрии, которые при механической деформации продуцируют электрический заряд. К таким материалам, с которым встречаются при производстве цемента, например, относится кальцит, являющийся природной формой карбоната кальция и который заметно электризуется при сжатии [32]. В технике используются менее одного процента известных пьезоэлектриков с сильно выраженными свойствами, но остальные не лишены этих свойств и проявляют их в различных ситуациях [33, 34].

Например, изучены пьезоэлектрические свойства различных горных пород, связь их диэлектрической проницаемости и поляризации с минеральным составом [35]. На этой основе теоретически исследован и разработан пьезоэлектрический метод поиска и разведки полезных ископаемых [36]. Метод используется в геологоразведке в поликристаллических средах, какими являются горные породы. Они проранжированы по пьезоактивности, что позволяет за счет тарированных механических воздействий с поверхности земли дистанционно их идентифицировать чувствительными приборами в полевых условиях [37]. В данном случае электризация горных пород при механическом воздействии используется человеком для облегчения труда геологов по поиску полезных ископаемых.

При измельчении твердых тел электризация играет негативную роль, противодействует достижению возможной размалываемости материала, способствует агрегации сверхтонких размолотых частиц и налипанию их на мелющие тела. Поэтому было предложено [38] рассматривать эти электрофизические проявления как результат действия электростатической составляющей

силы сопротивления материала его измельчению и интенсифицировать помол за счет её нейтрализации.

2.2. Исследование электрического потенциала свежеизмельченного материала

В 1998 году проводились испытания устройства ЭКОФОР в штате Колорадо США на заводе HOLNAM Inc. Portland Plant. К этому времени на базе патента России [39] на способ получения дисперсионно-кондиционированного, нейтрализованного порошка были поданы заявки на европейские патенты [40, 41], патенты Китая [42] и США [43].

При испытании использовалось одно устройство, которое было подключено параллельно к шаровой мельнице и динамическому сепаратору.

Таблица 2.1. – Результаты испытаний на Holnam Portland Plant, США

	Усредненные данные за сутки				
Число	Производительность, т/час	Удельная поверхность, см ² /г	Расход жидкого интенсификатора, см ³ /мин		
До включения ЭКОФОР					
03.02.1998	42,5	3800	400		
ЭКОФОР включен на мельницу и сепаратор					
04.02.1998	49,5	3950	350		
05.02.1998	50,3	4080	300		
06.02.1998	53,7	3890	300		
07.02.1998	54,3	3905	325		
08.02.1998	53,9	3850	230		

Как видно из таблицы 2.1, при сохранении качества помола цемента производительность мельницы за счет электронейтрализации была повышена на 27% и одновременно, при такой производительности, вдвое снижено потребление жидкого интенсификатора помола, являющегося анионоактивным ПАВ (в дальнейшем интенсификатор помола).

Эти результаты подняли в среде цементников США ряд вопросов, касающихся электростатического заряда при помоле в цементных мельницах. В частности, как измерить этот заряд и какова его полярность и величина? В итоге цементная ассоциация США (Portland Cement Association USA) инициировала исследования электростатического заряда при помоле в шаровой мельнице [44]. На первом этапе измерялась и определялась величина и полярность электрического потенциала при производстве цемента с использованием как интенсификатора помола, так и без него. Целью следующего этапа была оптимизация количества интенсификатора помола, необходимого для снижения уровня электростатического заряда.

Исследования проводились в 2002 году на мельнице № 5 Monarch Cement Company в Канзасе. Измерения производились электростическим измерителем поля ETS модель 222 со специально изготовленным индикаторным зондом, который позволял измерять относительно земли электрический потенциал продукта в закрытом лотке. Индикаторный зонд был смонтирован в тефлоновом фланце, таким образом изолированном от земли, и был погружен в поток материала. Имелся источник 1,0 кВ для калибровки измерителя. Окружающая температура во время измерений изменялась незначительно от 20,4 до 20,8°C и влажность от 24,3 до 30,2% на протяжении трех часов. Для очистки системы от интенсификатора помола они были отключены за 17 часов до начала измерений, которые производились на входе и выходе из мельницы. Интенсификатор помола был включен для второй серии измерений с расходом 380 г/т цемента. Производительность мельницы в обоих случаях поддерживалась на одинаковом уровне.

Таблица 2.2. – Электрический потенциал свежего цемента

	Электрический потенциал материала, кВ		
Место измерения	Без интенсификатора	С интенсификатором	
	помола (31,5 т/час)	помола (31,6 т/час)	
На входе в мельницу	+ 0,23	+ 0,29	
На выходе из мельницы	+ 4,65	- 0,43	

Исследования показали, как это представлено в таблице 2.2., что материал на входе в мельницу имел небольшой положительный, связанный с трением его при пересыпании, потенциал.

При помоле без интенсификатора помола цемент имел в разгрузочном трубопроводе электрический потенциал также положительной полярности, который стабилизировался на уровне около + 5 кВ. При подаче интенсификатора потенциал свежего цемента снижался до нескольких сотен вольт и изменял полярность на отрицательную. В итоге был сделан вывод, что интенсификатор помола действует как антистатик, снижающий положительный электрический потенциал свежего цемента вплоть до отрицательного значения.

Такой вывод, сделанный на основе натурного испытания, соответствует представлениям, высказанным ранее [45] об электрофизическом механизме действия интенсификаторов помола. Они обладают антистатическими свойствами, реализующимися в мельнице в объеме перерабатываемого материала.

Через год исследования электрозаряженности свежего цемента были продолжены на том же заводе, но на мельнице с производительностью 100 т/час, снабженной высокоэффективным сепаратором. Наличие высокого положительного потенциала свежего цемента без использования интенсификатора помола подтвердилось.

2.3. Электрофизические процессы внутри мельницы

В соответствии с классификацией, существующей в сейсморазведочной геофизике [37], цементный клинкер можно отнести к диэлектрическим материалам с малой, но, тем не менее, достаточной пьезоактивностью, чтобы создавать трудности при помоле, связанные с его электризацией.

Измеренный электрический потенциал свежего цемента косвенно характеризовал результат происходивших в мельнице электрофизических процессов. В ней при помоле материала только малая часть потребляемой мощности

двигателя используется эффективно для образования новых поверхностей. К экономически неэффективным затратам, снижающим коэффициент полезного действия мельницы, могут быть отнесены и потери на электризацию измельчаемого материала. Есть все основания полагать, что суммарный уровень электризации материала внутри мельницы, как и в зонах фрикционного контакта [46], находится на уровне 30-45 кВ. На рисунке 2.2, представлена диаграмма, предположительно характеризующая процессы электризации и нейтрализации материала по длине мельницы.

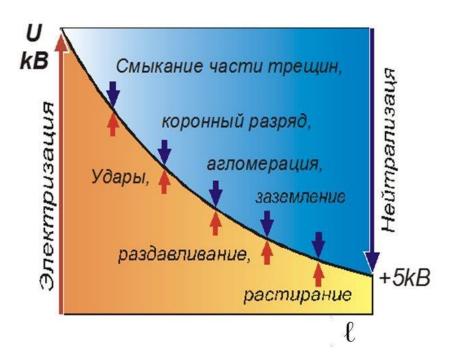


Рисунок 2.2. – Электризация и нейтрализация внутри мельницы

На выходе из мельницы оказалось возможным наблюдать только оставшуюся часть положительного электрического заряда, большая часть которого нейтрализуется внутри мельницы при стремлении освобожденной поверхностной энергии к минимуму в соответствии с принципом максимума энтропии. Возникновение заряда и его нейтрализация происходят одновременно, так как в свободном виде электрические заряды не могут оставаться надолго. Заряд накапливается и остается на поверхности, если время разрушения связей в материале меньше времени релаксации заряда. Чем интенсивней идет процесс разделения поверхностей, тем больший заряд на них остается. Электризация происходит в результате ударов, раздавливания и истирания материала. Нейтрализация частиц по экспоненциальному закону происходите изза того, что часть зародившихся трещин в материале смыкаются после ударов под действием разноименных зарядов, которые таким образом нейтрализуются, а возможная размалываемость материала не достигается. Мелющие тела покрываются твердой оболочкой из измельчаемого электрозаряженного материала. В результате этого удары демпфируются, а их эффективность снижается. Налипший на мелющие тела материал служит сопротивлением в цепи заземления, нарушая электрическую связь с ней материала. Частично агрегируют противоположно заряженные мельчайшие частицы. Образовавшиеся агрегаты мешают выходу материала из мельницы, а вышедшие частично возвращаются в мельницу, если используется сепаратор.

Эти явления полезно предотвратить или уменьшить, так как они снижают эффективность помола. Другая часть электрического заряда, в зависимости от влажности воздуха, взаимно нейтрализуется коронными разрядами и наконец, релаксация - стекание ещё одной части заряда производится с помощью системы заземления. Эти составляющие нейтрализации не вредят помолу, их действие следует усилить. Исследование показало, что именно положительный заряд является для мельницы избыточным, если в мельнице не используются какие-либо дополнительные средства для нейтрализации образовавшегося заряда.

2.4. Роль заземления при измельчении

Заземление оборудования является обязательным мероприятием по правилам устройства электроустановок. Сама Земля всегда имеет отрицательный электрический заряд, напряженность электрического поля около её поверхности составляет в среднем 130 В/м [47]. Верхние слои атмосферы, в связи с электризацией воды в капельной или кристаллической форме в облаках, заряжены относительно Земли положительно. В ясную погоду от Земли имеет

место максимальный поток рассеяния отрицательных зарядов. Молнии возвращают их на поверхность Земли. Наблюдается тесная связь между напряженностью поля и метеорологическими элементами и явлениями - температурой, влажностью, дождем, туманом, грозой. Имеется и другое обоснование восстановления заряда Земли, связанное с её вращением, как электрогенератора в магнитном поле, и ежедневной тектонической активностью литосферы. Всвязи с этим напряженность электрического поля атмосферы нестабильна — зимой больше, чем летом, в течение суток максимальна между 18-00 и 19-00 часами, а минимальна около 3-00. Опытные операторы ощущают зависимость производительности мельниц от погодных условий и времени.

Метеорологические изменения отражаются на вариациях отрицательного электрического потенциала Земли, находящейся в цепи релаксации заряда, возникающего в мельнице. С увеличением эффективности релаксации снижаются негативные проявления электризации материала, и тем самым создаются условия для повышения производительности мельницы.

Мельница сухого помола является не только генератором новой поверхности, но и генерирует снижающий эффективность помола положительный электрический заряд. Бытует представление, что обязательное заземление оборудования гарантирует отсутствие электрического заряда на нем и готовом продукте. Но заземление не является защитой от зарядов статического электричества, оно необходимо только для ограничения предельного заряда. Постоянная времени стекания заряда с объекта на заземляющее устройство принимается не более 0,1 с. То есть оно обладает значительными, но, тем не менее, ограниченными возможностями для релаксации заряда. Если возможности локального заземления по релаксации заряда исчерпаны, то, несмотря на естественную нейтрализацию значительной части положительного электрического заряда внутри мельницы, свежеизмельченный материал выносит его излишки наружу. В дальнейшем он постепенно разряжается на землю или вновь возникает при пересыпании и транспортировке. Поскольку заземление в месте расположения мельницы не может релаксировать заряд полностью

из—за насыщения, то необходимо техническими средствами добиться более существенной нейтрализации положительного заряда внутри мельницы, устранив его негативное воздействие на помол материала. С 1930 года эту функцию выполняют жидкие интенсификаторы помола. А в конце XX века появилось дополнительное средство интенсификации аппаратного типа — устройство ЭКОФОР, что в переводе с греческого означает «экономию несущий».

2.5. Роль поверхностного слоя мелющих тел в интенсификации измельчения

На поверхности мелющих тел, подвергающихся деформации в цементной мельнице, образуется слой толщиной 5 – 30 мкм с повышенной плотностью дислокаций, так называемый «дебри-слой». Свойства этого слоя изучены [48] всвязи с исследованием эффекта А.Ф.Иоффе на металлах в Институте машиноведения РАН. Эффект повышения прочности кристаллов деформируемого кристаллического вещества в результате растворения и устранения поверхностного «дебри-слоя» был реализован там в процессе электрохимического полирования поверхности металла.

Естественная положительная заряженность металлической поверхности, связанная с переходом части электронов металла в газовую фазу на границе металла с воздухом, в значительной степени увеличивается при деформации за счет движения дислокаций к поверхности нагруженного металла. Дислокации, число которых составляет $10^8 \div 10^{12}$ / см² поверхности металла, несут на себе положительные заряды, соответствующие атомной структуре кристаллов металла. Во время деформации дислокации мелющих тел являются носителями дислокационных токов. Роль дислокаций в кристаллах не соответствует только условному делению их на положительные и отрицательные без привязки к электрическому заряду, как это было ранее при объяснении пластических свойств металла. Их электрическая заряженность реально подтверждена [49, 50, 51]. В результате её на поверхности деформируемого металла из разраженность реально подтверждена [49, 50, 51].

талла возникает электродвижущая сила, вызванная этими положительными зарядами.

Начиная с подвергающегося измельчению заряженного материала, контактирующая с ним рабочая поверхность мелющих тел находится в составе распределенной электрической цепи релаксации зарядов, проходящей далее через бронеплиты, корпус мельницы и валы с подшипниками, корпуса которых подключены к системе заземления. Вал шаровой мельницы, учитывая массу её вращающейся части и незначительную скорость вращения, всегда имеет перемещающуюся со временем дорожку контакта с какой-либо выступающей вершиной неровности баббита подшипника. Поскольку рабочая поверхность мелющих тел заряжена положительно, то её заряд противостоит положительным зарядам частиц материала и уменьшает эффективность стекания этих зарядов на землю со всеми указанными выше негативными последствиями для производительности мельницы.

На рисунке 2.3.а) в разрезе показан положительно заряженный приповерхностный слой мелющего тела с хаотической решеткой «дебри-слоя». При производстве бездобавочного цемента происходит налипание на мелющую поверхность отрицательно заряженных частиц материала, а положительно заряженные появляются на выходе из мельницы.

Устройство ЭКОФОР предназначено для дополнительной нейтрализации положительных зарядов при помоле цемента. При этом оно активно использует поверхность мелющих тел, которая доступна к различного рода воздействиям.

Устройство постепенно по распределенной электрической цепи за счет пульсирующего потенциала небольшой величины производит преобразование приповерхностного «дебри-слоя», как это показано на рисунке 2.3.б). Скопления положительно заряженных дислокаций уничтожаются. Улучшается даже внешний вид поверхности мелющих тел. Она становится гладкой, блестящей, выглядит полированной.

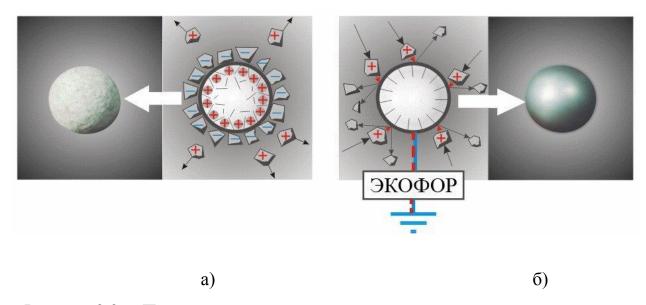


Рисунок 2.3. – Последствия упорядочивания приповерхностной структуры мелющих тел

Со временем положительный заряд на поверхности мелющих тел уменьшается и возможности для стекания положительных зарядов с измельчаемого материала через мелющие тела на землю улучшаются. Негативные проявления электризации вследствие этого уменьшаются. С исключением избыточной положительной заряженности металлической поверхности она медленно очищается от налипшей оболочки и упрочняется. Эффективность механических воздействий в мельнице и размалываемость материала улучшаются. На поверхности мелющих тел, являющимися в этом случае как бы электродами внешнего электрического потенциала устройства ЭКОФОР, происходит не только измельчение, но и разряжение частичек цемента, в том числе дислокаций в устьях трещин кристаллов измельчаемого материала. Начало агрегации мельчайших частиц сдвигается в область более высоких значений удельной поверхности готового продукта.

Сходством технологий с использованием жидких интенсификаторов помола и активной нейтрализации является их нейтрализующее действие. Интенсификаторы помола действуют во всем объеме измельчаемого материала с постоянной времени не более часа, а устройство ЭКОФОР действует на ма-

териал посредством изменения поверхности мелющих тел, на первоначальное преобразование которых требуется большее время.

На фоне использования интенсификаторов помола применение устройства ЭКОФОР дополнительно увеличивает производительность мельницы на 8–12% или на 12–25%, если интенсификаторы не используются. Удельный расход электроэнергии на помол тонны цемента с применением этого устройства снижается на 3 – 7 кВт час. С учетом того, что производство цемента в мире составляет около 3,6 миллиарда тонн в год [52], энергосбережение с использованием устройства ЭКОФОР не только экономически выгодно для производителей цемента, но может внести вклад в энергосбережение и сохранение экологии Земли.

2.6. Характеристика активного нейтрализатора

Активный нейтрализатор — устройство ЭКОФОР, второго поколения, модель ЭФ-01-03 выпускается по ТУ 4218-002-59456824-2007 и в соответствии с патентами России на изобретения [53,54]. Оно предназначено для интенсификации процессов сухого дробления и помола.

Устройство обеспечивает увеличение производительности дробилок и мельниц сухого помола на 8-25% в зависимости от перерабатываемого материала, со снижением удельного расхода электроэнергии на 8-20%. При использовании в технологии жидких интенсификаторов помола их потребление одновременно снижается на 25-30% или они заменяются устройством при производительности мельницы до 50 т/час.

Напряжение питающей сети устройства 230В, частота тока 50 – 60 Гц, потребляемый ток не более 0,5 А, допустимое предельное отклонение напряжения питающей сети -10, +5%. Второе поколение устройства предусматривает универсальность использования его электропитания от сети как с заземленной, так и изолированной нейтралью.

Режим работы устройства длительный, масса не превышает 11,5 кг.

Исполнение устройства по степени защиты составляет IP65. Однако рекомендуется использовать легкосъемный защитный чехол, чтобы не заносить пыль внутрь устройства при сервисном обслуживании. Устройство рассчитано на работу при температуре окружающего воздуха от +50°C до -40°C.

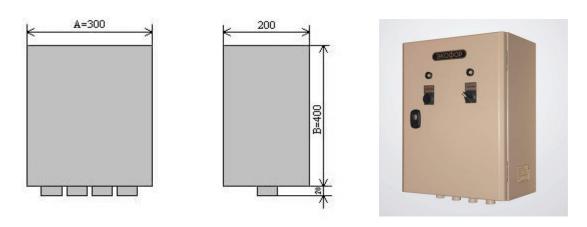


Рисунок 2.4. – Габаритные размеры устройства ЭФ-01- 03

Оно конструктивно, как это показано на рисунке 2.4., выполнено в виде стального навесного шкафа. На двери шкафа установлены выключатель и световой индикатор питания, а также кнопочный выключатель и световой индикатор для контроля исправности линии, соединяющей устройство с объектом.

В нижней части шкафа установлены защитные предохранители и клеммный набор для подключения проводов питания и связи с объектом, а также, если потребуется, то и с компьютерной системой управления.

Для исключения попадания пыли внутрь шкафа при закрытой двери между ней и корпусом установлены резиновые прокладки, а ввод проводов или кабелей в устройство осуществляется через герметичные сальники.

Устройство содержит трансформатор, опломбированный конвертер, в том числе с генератором пульсирующего потенциала, выключатель питания, кнопочный выключатель, светодиодные индикаторы, защитные предохранители, плату соединительную и клеммный набор.

Устройство включается выключателем питания с одновременной световой индикацией.

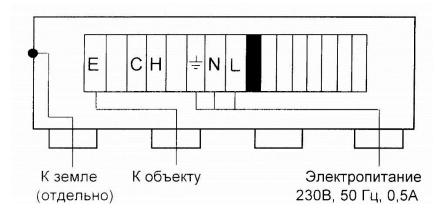


Рисунок 2.5. – Схема подключения устройства ЭФ-01-03

Металлическая часть оборудования, которая находится в непосредственном контакте с измельчаемым материалом, подключается в соответствии с рисунком 2.5. к клемме "Е" устройства, связанной с конвертером, который подключатся также и к заземляющему устройству объекта

Конвертер обеспечивает более полное снятие электрических зарядов с обрабатываемого материала. Параметры работы конвертера устанавливаются при настройке устройства изготовителем.

Корпус устройства должен быть надежно заземлен внутри шкафа отдельной линией.

Устройство безопасно для обслуживающего персонала и не оказывает негативного воздействия на оборудование в соответствии с сертификатом безопасности № РОСС RU ME 48 HO2713.

Устройство следует устанавливать на расстоянии не более 25 метров, предпочтительно 5-7 метров, от оборудования. Установку производят вертикально с помощью комплектуемых проушин, которые крепятся извне в отверстиях на задней стенке шкафа.

При подключении электрического питания к устройству необходимо обратить особое внимание на необходимость его фазировки в соответствии с схемой подключения. При нарушении фазировки плавкая вставка 100 мА пе-

регорает, и светодиодный индикатор контроль не включается. Необходимо в этом случае установить правильную фазировку и заменить плавкую вставку 100 мА.

Устройство не требует отключения во время эксплуатационных остановок оборудования. Срок его службы составляет 10 лет. Оно используется для интенсификации конусных дробилок, шаровых мельниц открытого и замкнутого цикла помола, в том числе и с применением жидких интенсификаторов помола, а также вертикальных валковых мельниц. Эффективна его работа на системах предварительного измельчения, вибрационных и центробежно-ударных мельницах. В последующих главах монографии будут приведены данные о работе устройства с различным дробильным и помольным оборудованием.

Глава 3 КОНУСНЫЕ ДРОБИЛКИ

3.1. Конусная эксцентриковая дробилка

Основным оборудованием по дроблению природных твердых материалов на горно-обогатительных комбинатах и карьерах по производству щебня являются конусные эксцентриковые дробилки. Они выпускаются машиностроительной корпорацией «Уралмаш» для крупного, среднего и мелкого дробления, производительностью от 30 до 2800 м³/час. Известны также эксцентриковые дробилки под торговой маркой «Саймонс» и «Гидрокон».

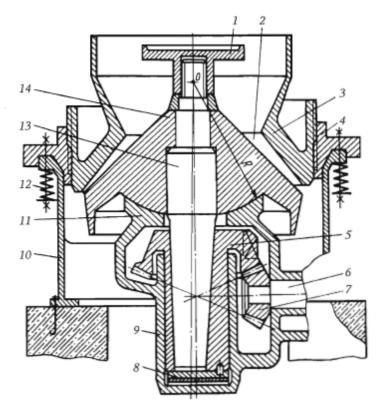


Рисунок 3.1. – Схема конусной эксцентриковой дробилки

Дробилка имеет литой корпус 10, устанавливаемый на фундаменте. К верхнему фланцу корпуса подпружиненными болтами крепится установочное кольцо 4. Верхняя неподвижная чаша 3, имеющая внутреннюю коническую форму, ввинчивается в нарезку на внутренней поверхности установочного кольца. На кольцевом кожухе укреплена футерованная приемная ворон-

ка. В нижней части корпуса имеется цилиндрическая втулка 9, в которую вставляется эксцентриковый стакан 5. Между втулкой и эксцентриковым стаканом находится бронзовая втулка, являющаяся подшипником эксцентрикового стакана. Эксцентриковый стакан опирается на подпятник 8.

Динамическая рабочая часть дробилки в виде дробящего конуса 14, закреплена на валу 13 и опирается на массивный сферический подшипник 11. Таким образом, вал как бы подвешен в точке 0, а его нижний конец вставлен в эксцентриковый стакан. Эксцентриковый стакан приводится во вращение от электродвигателя через передаточный вал 6 с помощью шестерен 7.

При вращении эксцентрикового стакана ось вала 13 описывает движение по конической поверхности с вершиной в точке 0. При этом дробящий конус совершает круговые качания, приближаясь и удаляясь от стенок конической чаши. В момент приближения к конической чаше происходит дробление материала, а при удалении — разгрузка раздробленного материала в специальный желоб и транспортную систему. Внутренняя поверхность чаши и дробящий конус имеют кольцевую футеровку из марганцовистой стали.

Загружаемый в дробилку материал должен поступать из питателя вертикально на загрузочную тарелку 1 и равномерно распределяться вокруг дробящего конуса в приемной щели 2.

Установочные болты предотвращают чашу от повреждений при попадании посторонних металлических включений. При этом чаша приподнимается, разгрузочное отверстие увеличивается, и металл удаляется из дробилки, не нанося ей повреждений.

Каждый кусок дробимого материала в процессе вращения дробящего конуса подвергается по данным [15] двум — трем сжатиям в параллельной зоне. Наименьшее расстояние между дробящим конусом и конической чашей определяет минимальный размер дробленого продукта. Это расстояние устанавливается немного меньше требуемого размера продукта. Изменение крупности готового продукта достигается перемещением чаши в резьбе установочного кольца при помощи специального поворотного устройства.

Дробилка выполняет функцию селективного дробления, производя разделение материала по его слабым поверхностям на границах раздела фаз и не затрагивая кристаллическую структуру минералов. Однако, и в этом случае при разрыве двойного электрического слоя на границах раздела фаз возникает электростатические силы, удерживающие материал от разрушения. Устройство ЭКОФОР, подавляя электрический заряд на разделяющихся поверхностях, способствует повышению эффективности дробления.

Испытание устройства ЭКОФОР проводилось на дробилке КМДТ-1750, используемой АООТ «Бокситогорский глинозем». Алюминат натрия после спекания во вращающейся печи дробился на конусной эксцентриковой дробилке до размеров — 8 + 1 мм. Гранулы спека размером более 8 мм после грохочения отправлялись на повторное дробление, так как они недостаточно выщелачивались. Мелочь менее 1 мм при выщелачивании не использовалась. Устройство ЭКОФОР было подключено к верхней части корпуса мельницы. Сравнение фракционного состава дробленного спека до и после включения ЭКОФОР представлено в таблице 3.1.

Таблица 3.1. – Результаты испытаний на дробилке КМДТ-1750

Время 04.1996	Фракционный состав дробленного спека, мм в $\%$						
	+8	- 8 + 6	- 6 + 1	- 1			
15:30	6,1	11,0	65,0	17,9			
ЭКОФОР включен в 16:00							
17:30	4,8	11,8	65,9	17,5			
19:30	1,6	7,2	71,6	19,6			
21:30	2,8	7,1	74,7	15,4			
0:00	3,5	13,0	69,0	14,5			

Результаты испытания показывают, что доля возвратной на дробление фракции + 8 мм уменьшилась более, чем в два раза. Уменьшилась и некондиционная доля – 1мм. Гранулометрический состав дробленого спека вцелом

стал уже. Таким образом, эффективность устройства ЭКОФОР на широко используемой в горнорудной промышленности дробилке КМДТ была подтверждена.

3.2. Конусная инерционная дробилка

На базе анализа преимуществ и недостатков конусной эксцентриковой дробилки институтом «Механобр» [15] с участием ПО «Уралмаш», начиная с середины прошлого века, была разработана и выпускалась серия конусных дробилок нового поколения.

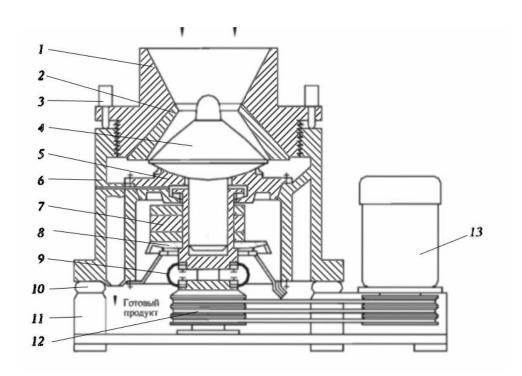


Рисунок 3.2. – Схема конусной инерционной (вибрационной) дробилки, где

- 1 наружный конус, 2 броня наружного корпуса, 3 гидродомкрат,
- 4 внутренний конус, 5- сферическая опора, 6 корпус,
- 7 дебалансный ротор-вибратор, 8 подшипник ротора-вибратора,
- 9 эластичная муфта, 10 резиновый амортизатор, 11— металлическая опора, 12- клиноременная передача, 13 электродвигатель

Эти дробилки с производительностью от 2 до 500 т/час имели значительно улучшенные по сравнению с эксцентриковыми технические характеристики. По сравнению с конусной эксцентриковой дробилкой конусная

инерционная, представленная на рисунке 3.2, имеет удельные затраты электроэнергии в 1,5 раза меньше, но обеспечивает прирост вновь образованной поверхности в 2 раза больше.

Дробилка приводится в движение от электродвигателя через клиноременную передачу. Через эластичную муфту крутящий момент передается дебалансному ротору-вибратору, который, вращаясь с опорой на подшипник, развивает центробежную силу, заставляющую внутренний конус совершать круговые качания на сферической опоре. Бегущее по окружности сближение конусов заставляет куски материала, находящиеся в слое между конусами, разрушаться друг о друга.

Во время сближения конусов наружный конус, закрепленный на резиновых амортизаторах, получает зарядку кинетической энергией, которую, с большей частотой, чем частота вращении вибратора, отдает измельчаемому материалу, осуществляя его сдвиг. То есть вместо жесткой кинематической связи между конусами в конусных эксцентриковых дробилках, в конусных вибрационных имеет место динамическая связь. Она создаёт ещё одну составляющую дробящей силы, что приводит к сдвиговым деформациям в измельчаемом материале. Их действие проиллюстрировано на рисунках 3.3. и 3.4. по данным [3].

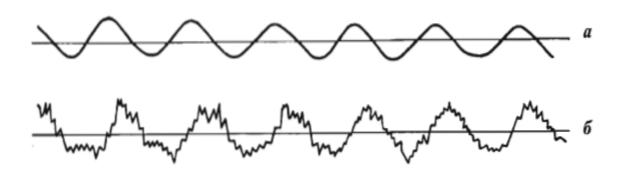


Рисунок 3.3. – Характер колебаний дробящей силы в эксцентриковой а) и инерционной конусных дробилках б)

Такая система давления на измельчаемый материал позволила увеличить частоту воздействия на слой материала и, увеличив толщину этого слоя, увеличить производительность дробилки. Материал в дробилке подвергается

интенсивному вибрационному воздействию. Стало возможным также осуществлять пуск и остановку дробилки под нагрузкой.

Число колебаний дробящей силы за один оборот обкатки внутреннего конуса через слой материала, соответствующее одному обороту дебалансного ротора-вибратора доходит до тридцати.

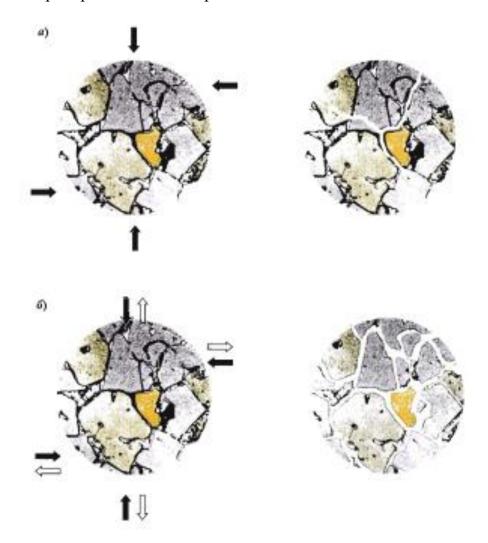


Рисунок 3.4. – Действие дробящих сил в конусных эксцентриковой a) и инерционной б) дробилках

Материал за полный проход через дробилку, задерживаясь в ней на несколько секунд, получает около тысячи импульсных сжатий с одновременным сдвигом. За каждый цикл перемещения частица материала меняет ориентировку по отношению к соседним частицам, создаются условия для при-

нудительного самоизмельчения. Частицы с малыми дефектами структуры разрушают соседние, более дефектные.

Крупность готового продукта регулируется частотой вращения дебалансного вибратора и его статическим моментом за счет смены грузов дебаланса. Степень дробления может быть настроена от 4 до 30.

Предварительное измельчение цементного клинкера проводилось на конусной дробилке, изготовленной в Турции компанией МТГ. Она представлена на рисунке 3.5 в составе технологической линии турецкого завода Nuhbeton.



Рисунок 3.5. – Конусная вибрационная дробилка MULTICON -1000 в работе на заводе Nuh beton a.s.

Для проведения предварительного измельчения цементного клинкера перед подачей его в шаровую мельницу конструкция дробилки была переработана [55]. В отличие от гранита цементный клинкер представляет собой более вязкий материал, что вызвало необходимость изменения узла подшипника дебалансного вибратора.

Дробилка MULTICON – 1000 имеет производительность по цементному клинкеру 100 т/час при мощности электродвигателя 160 кВт. Она представляет собой предварительный измельчитель для финишных шаровых цементных мельниц, который снижает удельный расход электроэнергии на помол цемента вцелом на 30-35%, обеспечивая повышение производительности мельниц закрытого цикла на 30-40%.

В таблице 3.2. представлены данные для сравнительного анализа гранулометрического состава цементного клинкера, обыкновенно подаваемого в мельницу помола цемента и продукта дробления этого клинкера, прошедшего через конусную вибрационную мельницу.

Таблица 3.2. – Интегральное распределение частиц клинкера и продукта его дробления по размерам на конусной вибрационной мельнице

Розмор но отни ма	Интегральное распределение, %		
Размер частиц, мм	Клинкер	Дробленый клинкер	
53	100	100	
38	99,79	100	
19	80,32	100	
13,2	64,18	100	
9,5	48,03	100	
6,3	36,16	98,37	
3,55	24,64	93,07	
2	16,34	82,22	
1,4	13,63	75,80	
1	9,25	70,21	
0,5	7,53	51,14	
0,2	6,16	46,12	
0,09	4,83	30,83	
0,036	3,01	14,74	

Сравнение результатов дробления показывает, что 50% клинкера, имевшие размеры более 10 мм, перешли в размер дробленого продукта менее 10мм. Доля частиц размером менее 3,55 мм увеличилась в 4,9 раз, а частиц цемента размером 36 мкм стало больше в 4,9 раз. Такой дробленый продукт

следует направлять не в мельницу, а сначала в её сепаратор для отделения уже готового цемента, не нагружая им мельницу.

Результаты показывают, что применение конусных вибрационных дробилок для предварительного измельчения цементного клинкера, учитывая, что удельные затраты электроэнергии при этом составляют всего 1,6 кВт час/т, эффективно для помольной системы в целом.

В ноябре 1995 года одно из первых испытаний устройства ЭКОФОР первого поколения было проведено в НТЦ «Техноген» на конусно-инерционной дробилке КИД-100. При измельчении клинкера для производства жаростойкого цемента производительность дробилки была увеличена на 15-20% с увеличением содержания более тонких фракций помола.

Использование устройства на конусно-инерционной дробилке КИД-300 при дроблении алюминиево-палладиевого катализатора АПК на АОЗТ «Юнвист» значительно улучшило выход тонких фракций.

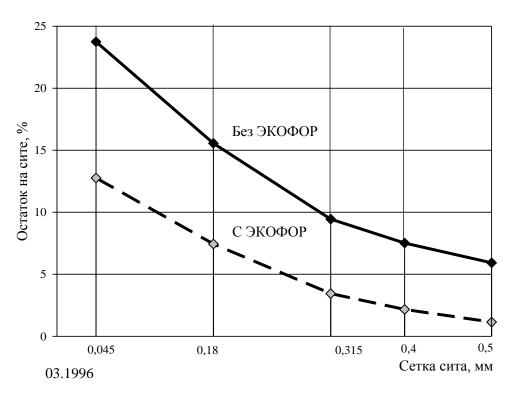


Рисунок 3.6. – Результаты интенсификации дробления катализатора АПК

Так в соответствии с рисунком 3.6. остаток на сите 45 мкм уменьшился с 23,7% до 12,7%, почти в два раза. Устройство подключалось к верхней части корпуса дробилки.

Катализатор АПК представлял собой вязкий материал, который при измельчении создавал перегрузку подшипника дебалансного вибратора. Результатом этого являлся периодический режим работы дробилки с остановкой её на охлаждение. Устройство ЭКОФОР дополнительно снизило трибоэлектрические потери [56] в подшипнике дебалансного вибратора, обеспечив длительный режим работы дробилки. Как уже указывалось ранее, конусная вибрационная дробилка в настоящее время оснащена модернизированным подшипником, обеспечивающим её работу с вязкими материалами.

Таким образом устройство ЭКОФОР доказало возможность дополнительного улучшения показателей работы конусной вибрационной дробилки за счет электронейтрализации измельчаемого материала.

Глава 4

ШАРОВЫЕ МЕЛЬНИЦЫ ОТКРЫТОГО ЦИКЛА ПОМОЛА

4.1. Достоинства и недостатки шаровых мельниц

Шаровая мельница является традиционным, на протяжении уже более ста лет, оборудованием для достижения требуемой тонкости помола при многотоннажном производстве. В эксплуатации в России на отдельных заводах ещё находятся мельницы производительностью 25 т/час при максимально достигнутой в мире производительности 320 т/час.

На рисунке 4.1. представлены две компоновки современных шаровых мельниц. Они обе имеют опоры на башмаки подшипников скольжения гидродинамического типа. Одна из них имеет боковой редукторный привод, а вторая центральный.

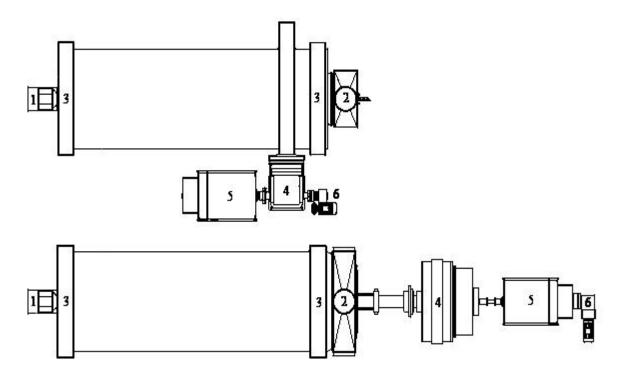


Рисунок 4.1. – Компоновка современных шаровых мельниц, где:

1 — загрузка мельницы, 2 — разгрузка мельницы, 3 — опоры башмаков подшипников скольжения, 4 — главный редуктор, 5 — двигатель мельницы, 6 — вспомогательный привод

Достоинствами шаровых мельниц кроме большой единичной мощности, достижения тонкости помола, соответствующей удельной поверхности 5000 см²/г, простоты конструкции, высокой надежности, является также хорошо разработанное научное обоснование, в которое внесла вклад и советская цементная наука. При этом был рассмотрен механизм измельчения с образованием первой и последующих трещин в измельчаемом материале с использованием аппарата дислокаций, а также обнаружено наличие на новой поверхности ненасыщенных валентных связей при разрыве сплошных кристаллов [57, 58]. Исследовалась кинетика измельчения клинкера [59, 60], представляющего собой сложную ионно–ковалентную, смешанную со стеклообразной фазой, частично пористую структуру. Разрабатывались математические модели структуры потока материала в мельницах [61, 62, 63], вопросы интенсификации их работы [64] и управления зерновым составом цемента [65]. Изучался также и зарубежный опыт [66].

К недостаткам шаровых мельниц относится их значительные металлоемкость и износ мелющих тел, а также сильный шум. Большая часть энергии при работе шаровой мельницы теряется бесполезно, коэффициент полезного действия низок — по разным оценкам от 2 до 20% [6]. Но даже значительный удельный расход электроэнергии на помол цемента окупается полезным эффектом при использовании мельницы. Это не исключает поиска решений по экономии электроэнергии при помоле, чем и занимаются цементники всего мира.

Ещё одним недостатком шаровых мельниц открытого цикла является переизмельчение порошка. Оно связано с необходимостью совместного разрушения отличающихся по размалываемости компонентов [67], таких как клинкер, гипс, гранулированный шлак и других добавок. Невозможна ситуация, при которой частица, достигшая требуемого размера, была бы выведена из мельницы, а размалывающие силы использовались бы только для частиц завышенного размера. Наоборот эта частица должна ждать, когда трудно размалываемая достигнет требуемого размера, а сама к этому времени пере-

измельчается. То есть ради необходимого по тонине измельчения трудно размалываемых составляющих цемента производится переизмельчение его легче размалываемых частей. Для открытых циклов помола всё, что выходит из мельницы, должно уже быть цементом. При переизмельчении частицы, задержавшиеся в мельнице, получают окатанную форму, и гидравлическая активность их снижается. Так для одинаковой прочности при компенсации этого недостатка, удельная поверхность цемента, произведенного в мельнице открытого цикла, должна быть на 300 см²/г больше чем для замкнутого.

4.2. Усовершенствование помола в шаровых мельницах

Тенденции развития технологии помола в шаровых мельницах просматриваются в сравнении нового и старого оборудования, длительно находящегося в эксплуатации.

При строительстве новых цементных заводов наращивалась единичная производительность шаровых мельниц. Крупные системы вводились в Юго-Восточной Азии. Развитие коснулось отказа от открытого цикла помола. Мельницы были оснащены сепараторами, которые в своем развитии прошли несколько поколений.

За длительное время жизни шаровой мельницы из-за износа не один раз сменяются комплекты мелющих тел. Остается неизменным вращающийся барабан, который служит базой для последующих модернизаций. Старые мельницы переоснащались, а новые оснащались современными бронеплитами с оптимизированной геометрией, износостойкими мелющими шарами смешанного ассортимента, заменившими цильпебс [68], и регулируемыми диафрагмами. Цапфовые опоры уже более двадцати лет не используются, в новых мельницах они заменены опорами на башмаки подшипников скольжения гидродинамического типа. Используются также боковые редукторные приводы.

В середине прошлого века с началом использования интенсификаторов помола был совершен рывок в повышении производительности шаровых

мельниц. Внедрением впрыска воды в зону мелкого измельчения мельницы был решен вопрос со стабилизацией температуры цемента, не достигающей температуры его ложного схватывания, и дополнительно повышена производительность.

Мельницы оснащались компьтерными системами управления, лазерными гранулометрами, работающими в потоке цемента. Быстродействие этих систем позволило разработать и внедрить экспертные системы управления мельницами, исключившими участие в этом оператора.

Использование устройств ЭКОФОР [69, 70, 71, 72] для дополнительного повышения производительности работающих мельниц с одновременным снижением удельного расхода электроэнергии позволяет надеяться на очередной шаг в усовершенствовании помола.

Технология помола цемента в России отстала от зарубежной, высокие результаты достигались за счет квалификации цементников. В связи с дешевизной электроэнергии в СССР было принято ошибочное решение о повсеместном использовании открытого цикла помола цемента и только в 80-х годах были построены несколько заводов сухого способа производства, где использовались замкнутые системы помола на базе отечественного оборудования. Рост единичной производительности мельниц, выпускаемых заводом «Волгоцеммаш» и достигший 100 т/час, был остановлен переориентацией на иностранных производителей.

В настоящее время заканчивается переоснащение мельниц весовыми дозаторами вместо объемных. Многие заводы произвели модернизацию отдельных мельниц с установкой сепараторов. Новые заводы строятся с участием зарубежных фирм с использованием современных замкнутых систем помола и автоматизации [73]. Но большинство цементных мельниц в России продолжают использоваться в открытом цикле помола и поэтому необходимо улучшать показатели их работы. Остается ориентация на использование во второй камере старых мельниц цильпебса и пневмокамерных насосов в системе их разгрузки. На многих заводах имеются трудности со сжатым воз-

духом, и это ограничивает возможности по повышению производительности мельниц.

На ОАО «Осколцемент» была предпринята попытка внедрения на базе шаровой мельницы открытого цикла оригинальной непрерывно—дискретной системы помола [74] с внутренним рециклом и устройством регулирования выгрузки материала на выходе мельницы. Эта новация расширяла возможности открытых систем помола. Был получен обнадеживающий научный результат, но из—за низкой надежности дискретной системы выгрузки внедрение было остановлено.

4.3. Электризация в шаровой мельнице

Измельчение по ходу шаровой мельницы идет с нарастающим сопротивлением материала. Сначала трещины проходят через крупные поры, поскольку пористость клинкера составляет 17–26%. Потом количество пор уменьшается, и молоть становится тяжелее. Далее до удельной поверхности 1500 – 1700 см²/г измельчение идет по границам раздела фаз, а после 2500 см²/г сопротивление помолу начинает резко расти, происходит разрушение уже отдельных кристаллов [59].

Этот процесс был рассмотрен с позиций физики диэлектриков [75], поскольку клинкер, гипс, шлак и другие добавки являются диэлектриками. В общем сопротивлении измельчению была выделена электростатическая составляющая, поскольку клинкер относится к кристаллическим классам, которые электризуются — приобретают электрический заряд под действием механических сил.

Появление свободных электрических зарядов в материале при этом соответствует принципу термодинамического подвижного равновесия Ле Шателье. Этот принцип предусматривает возникновение в системе, находившейся в состоянии равновесия и оказавшейся под каким-либо воздействием, процессов, ослабляющих это воздействие. Так, при измельчении имеет место процесс электризации материала, который ослабляет силовое механическое воздействие.

То есть вследствие механических воздействий, таких как удар, сдавливание и истирание измельчаемого материала, в нем появляется свободные электрические носители. Действие этих носителей электрического заряда следует рассматривать как реакцию материала на энергетическое, в данном случае механическое, воздействие. Поступающие на измельчение материалы стремятся сохранить состояние термодинамического равновесия. Они сопротивляются измельчению, но с помощью механического воздействия это сопротивление подавляется. Применением активной электронейтрализации удалось ослабить действие свободных электрических носителей при помоле. Электростатическая реакция измельчаемого материала, его противодействие, были снижены и в результате этого получены необходимые технологические преимущества.

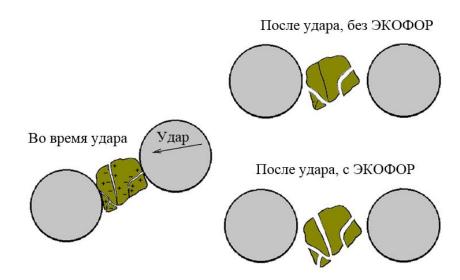


Рисунок 4.2. – Последствие удара по материалу

Несмотря на то, что мельница заземлена, часть освобожденных электрических носителей остается на материале, поскольку заземление может принять и релаксировать только ограниченное количество электричества. Удары производят трещины в измельчаемом материале, на стенках этих трещин появляется электрический заряд [76]. Часть гранул материала, как это показано

на рисунке 4.2., раскалывается по трещинам на более мелкие куски, а некоторые трещины смыкаются после удара под действием противоположных по знаку зарядов. При этом наиболее сложная ситуация создается в последней камере мельницы, где помол происходит на уровне кристаллов. Перед выходом материала из мельницы в результате электростатического взаимодействия размолотых сверхтонких частиц происходит их агрегация. Такие дисперсные системы частично утрачивают текучесть. Недостаточная текучесть цемента снижает производительность пневмокамерных насосов и тем самым ограничивает потенциальные возможности мельниц, а также увеличивает время выгрузки цемента. Агрегация, возникающая при помоле, является обратимой, способной при определенных условиях к разобщению частиц. Если не используются интенсификаторы помола или производится цемент без добавки шлака, то на мелющих рабочих поверхностях и перегородках вследствие адгезии, сила которой имеет электростатическую составляющую, образуется твердая, демпфирующая удары, не способствующая помолу оболочка. Налипание усиливается при выпуске цементов высоких марок, а также при повышенной температуре клинкера.

Таким образом свободные электрические носители, возникающие в процессе помола, снижают его эффективность, а их возникновение является проявлением электростатической составляющей сопротивления обрабатываемого материала механическому воздействию [77].

4.4. Активная электронейтрализация в шаровой мельнице

Устройство ЭКОФОР нейтрализует свободные электрические носители в ходе помола. Оно действует в мельнице совместно с естественно происходящей нейтрализацией заряда в результате коронного разряда и действия заземления. Таким образом оно дополнительно снижает электростатические проявления в ходе помола и устраняет их негативные последствия. При этом активно используется металлическая поверхность мелющих тел. Устройство преобразует процессы, протекающие на границе измельчаемого материала и

приповерхностного слоя мелющих тел, обеспечивая воздействие на обе вза-имодействующие фазы.

Подключение устройств к цапфе выходного подшипника мельницы показано на рисунке 4.3. При подключении место контакта для обеспечения его надежности должно быть очищено от масла и цементной пыли. Подключение должно быть выполнено медным проводом сечением не менее, чем 1,5 мм², защищенным от механических воздействий. Прокладка провода должна исключать воздействие на него силовых и высокочастотных электрических полей.



Рисунок 4.3. – Место подключение устройства ЭКОФОР к шаровой мельнице

Измельчаемый материал связан с устройством по распределенной электрической цепи через мелющие тела, броневые плиты, корпус и вал мельницы, корпус подшипника и вход устройства.

Динамика улучшения зависит от наличия оболочки на поверхности мелющих тел до подключения устройства. Если она имеется, то после подключения устройства мельница должна поработать с устройством 8...12 часов без изменения подачи. Это дает возможность разрядить «дебри—слой» дислокаций на поверхности мелющих тел. С нормализацией структуры их приповерхностных слоев они начнут очищаться от налипшей оболочки и образо-

вывать вероятностную металлическую токопроводящую связь между измельчаемым материалом и входом устройства ЭКОФОР. При этом остаток на контрольном сите в первые часы может увеличиться, что связано с очисткой от твердой оболочки выходной диафрагмы и части мелющих тел, находящихся рядом с ней. Через несколько часов рост остатка на контрольном сите прекращается. Полная очистка мелющих тел происходит не ранее трех — пяти дней работы, а иногда в связи с крайне тяжелыми условиями помола достижимой является лишь "рябая" их поверхность, однако, достаточная для отвода заряда.

При использовании интенсификаторов помола или выпуске цемента с добавкой шлака мелющие тела, как правило, не имеют оболочки даже у разгрузочной части. В этом случае уже в течение первого часа после включения устройства происходит разрушение агрегатов и залповый вынос составляющих их мелких частиц из мельницы. Это можно заметить по импульсному в течение нескольких минут увеличению нагрузки электродвигателя элеватора или временному уменьшению времени заполнения емкостей пневмокамерных насосов.

Размалываемость материала постепенно улучшается, поскольку большее количество трещин с нейтрализованной поверхностью открывается после ударов. Пропускная способность мельницы увеличивается, она продолжает освобождаться от материала. Наблюдается временное, пока мельница очень сильно не опустела, улучшение качества помола, которым необходимо воспользоваться для повышения производительности мельницы.

Скорость прохождения материала через мельницу, текучесть цемента и шум мельницы постепено увеличиваются. Если своевременно не отреагировать на улучшение качества помола, то значительная часть материала может покинуть мельницу, а качество помола ухудшится.

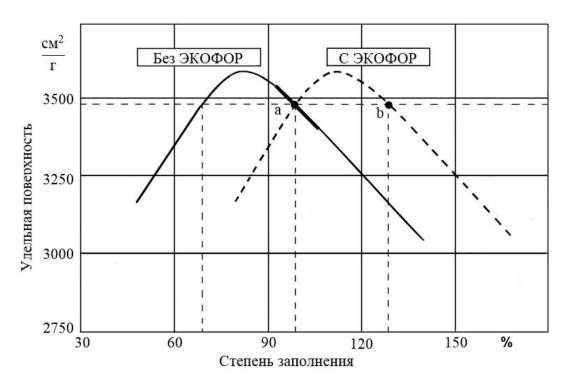


Рисунок 4.4. – Пример зависимости качества помола от заполнения пространства между мелющими телами

Для мельницы характерна оптимальная зависимость качества помола, например, удельной поверхности от содержания в ней материала, представленная на рисунке 4.4. Жирно выделена та часть этой характеристики, в пределах которой обычно работает оператор. За 100% принимается степень заполнения, при которой материал при остановке мельницы находится на уровне мелющих тел. Скорость измельчения материала в соответствии с уравнением кинетики измельчения [60] прямо пропорциональна количеству материала, находящегося в мельнице. То есть чем его меньше, тем меньше и вероятность попадания частиц под удар при прохождении через мельницу. Этим определяется левая падающая ветвь зависимости, представленной на рисунке 4.4. Наличие же правой её падающей части обусловлено тем, что увеличение содержания материала в мельнице приводит к смягчению ударов мелющих тел, нарушению их траектории, а, следовательно, к снижению качества помола.

Оптимальный по качеству помола уровень измельчаемого материала в мельнице при включении устройства постепенно сдвигается в сторону его увеличения. Устройство предоставляет возможность увеличить содержание материала внутри на 10 – 30 %, без всякой опасности переполнить («заработать») мельницу. Это нужно также для лучшего истирания материала в последней камере мельницы. Необходимо за счет увеличенного питания перевести работу мельницы из точки «а» в точку «b». Если этого не сделать, то мельница останется работать на левой, необычной для оператора ветви новой, переместившейся оптимальной зависимости. Например, если оператор, привыкший снижать питание при ухудшении качества помола, будет в новых условиях поступать аналогично, то он усугубит ситуацию. Работа мельницы на уровне прежней производительности будет сопровождаться большим шумом, а новые возможности по повышению питания не будут использованы. Производительность же необходимо ступенчато увеличить суммарно на 12 – 25 %, причем в большей степени при выпуске высоких марок цемента.

Питание мельницы после получения данных об улучшенном показателе качества помола следует увеличивать из расчета, что каждые $100 \text{ см}^2/\text{г}$ удельной поверхности, превышающие норматив, требуют 4% дополнительного питания. Таким образом, увеличенное питание будет гарантировать нахождение новой рабочей точки на правой ветви переместившейся оптимальной характеристики. В дальнейшем увеличение питания может идти по 1-2 т/час после получения очередного превышающего норматив показателя качества помола. Не следует перегружать мельницу, а если это случилось, то необходимо резко уменьшить подачу материала на 5-15 минут, так как по пропускной способности мельница нечувствительна для небольшого снижения питания после её переполнения.

Разрежение на выходе мельницы, если температура цемента это позволяет, должно быть снижено на 20 - 40% для удержания в ней ставшего более текучим материала. Это помогает и в том случае, если материал «убегает» из первой камеры во вторую, то есть для баланса загрузки камер. Звук первой

камеры должен при этом стать глуше, чем раньше, а второй более четким и звонким.

Износ мелющих тел снижается под воздействием устройств ЭКОФОР в результате преобразования приповерхностной структуры мелющих тел. При этом количество дефектов этой поверхности уменьшается и происходит её упрочнение. По данным завода на Кипре Vassiliko Cement Works Ltd, использовавших пять устройств ЭКОФОР в течение двенадцати лет, износ мелющих тел марки Hardalloy бельгийской фирмы Magotteaux на трех помольных системах уменьшился в результате действия устройств ЭКОФОР с 25–40 г/т цемента до 9–13 г/т, то есть почти в три раза.

4.5. Особенности работы шаровой мельницы при электронейтрализации

Медленная, продолжительностью несколько часов, реакция мельницы на включение устройства связана с необходимостью постепенной аннигиляции дислокаций «дебри — слоя» поверхности мелющих тел. Их рабочая поверхность становится более гладкой, приобретает большую твердость. Не следует сравнивать эту реакцию с реакцией на подачу интенсификаторов помола, которые показывают первый результат уже через час. Интенсификаторы действуют в объёме измельчаемого материала, а электронейтрализация проводится по распределенной металлической цепи через поверхность мелющих тел, которая претерпевает значительные изменения с течением времени.

Действие интенсификаторов помола заканчивается также в основном через один час после прекращения их подачи. Устройство ЭКОФОР обладает длительным последействием – до трёх недель для систем помола открытого цикла.

После отключения устройства, например, при перестановке его для демонстрации на следующую систему помола, мельница продолжает длительное время работать с улучшенными, медленно возвращающимися к прежнему уровню показателями, пока не износится упрочненная, ставшая малодефектной, поверхность мелющих тел.

Мельница под воздействием устройства должна содержать внутри на 10–30% большее количество материала. Это достигается увеличением питания мельницы и, если это возможно по условиям охлаждения, снижением уровня аспирации – разрежения на её выходе. Мощность, потребляемая электродвигателем мельницы, при этом несколько уменьшается.

Обновляется оптимальная зависимость качества помола от степени заполнения мельницы материалом. Появляется ошибочная возможность работы с прежней производительностью в неоптимальном режиме.

Повышается текучесть измельченного, нейтрализованного цемента. Так, время разгрузки камер пневмокамерного насоса на китайском заводе «Дианнан», где в январе 1997 года проводилось испытание устройств ЭКО-ФОР и особое внимание уделялось текучести цемента, уменьшилось на 27%.

Возможности по повышению производительности мельниц открытого цикла и снижению удельного расхода электроэнергии на производство тонны цемента при использовании устройства представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Эффективность устройства для шаровой мельницы

Тип цикла помола	Интенси- фикаторы помола	Питание мельницы, т/час	Увеличение питания, %	Снижение удельного расхода энергии, %	Количество устройств, шт.
Открытый	Нет	25 - 100	12 - 25	11 - 20	1
Открытый	Есть	25 - 100	8 - 12	8 – 11	1

Увеличение выпуска продукции для мельниц производительностью менее 20 т/час иногда достигало 40 - 60%. Режим работы мельницы с устройством всегда носит более стабильный характер. Если не требуется увеличение объемов выпуска цемента, то появляется возможность сократить рабочее время мельницы, а, следовательно, и затраты электроэнергии.

4.6. Условия испытания мельницы, требующие согласования

Для того, чтобы получить достоверный результат и исключить технологические помехи и психологические сложности, следует перед испытанием согласовать условия его проведения.

- Испытания должны проводиться на помольной системе, если её вспомогательное оборудование имеет резерв повышения производительности.
 Например, если пневмокамерные насосы или элеватор работают на пределе своей производительности, то они не смогут принять от мельницы дополнительное количество материала;
- Для сравнимости результатов необходимо использовать клинкер с относительно стабильными характеристиками, такими же, как и до подключения устройства;
- Не допускается изменять калибровку весоизмерительных устройств в течение испытания для обеспечения сравнимости результатов;
- Перед подключением устройства необходимо усреднить и зафиксировать с ответственным за испытание заводским специалистом усредненные значения питания мельницы и качества помола за период 8 12 часов её стабильной работы;
 - Измерение питания и качества помола нужно делать каждый час;
- Составляющие питания мельницы (клинкер, гипс, другие добавки)
 необходимо изменять в постоянной пропорции;
- Операторы всех рабочих смен должны быть осведомлены о проходящем испытании и должны быть ознакомлены с инструкцией по работе с устройством;
- После включения устройства требуется его адаптация к оборудованию в течение 2 – 12 часов;
- После улучшения качества помола и/или опустошения мельницы питание должно быть увеличено ступенчато. Для мельниц производительно-

стью 45-60 т/час сначала на 3 т/час затем по 1 т/час. Для мельниц 100 т/час сначала на 7 т/час затем по 2-1 т/час;

- Решение об изменении питания принимается каждый час в зависимости от текущего значения качества помола. Процесс изменения питания может продолжаться в течение 12 – 24 часов работы;
- При разбалансировке работы камер мельницы или её повышенном шуме необходимо снизить разрежение на её выходе на 20 – 40%, но не допускать перегрев цемента;
- Необходимо достичь уровня питания, близкого к максимальному, при нормативном качестве помола и стабилизировать режим в течение не менее 8
 12 часов;
- Определение прироста производительности мельницы производится по усредненным значениям питания стабильных режимов после и до включения устройства при выпуске одной и той же марки цемента;
- После выключения устройства мельница продолжает работать с повышенной производительностью в течение длительного времени пока не износится упрочненная под действием устройства поверхность мелющих тел.

4.7. Динамика интенсификации помола при включении устройства

Первое испытание устройства ЭКОФОР по помолу цемента было проведено в 1995 году на опытном заводе Гипроцемент на мельнице производительностью 10 т/час при производстве жаростойкого цемента. Устройство было подключено к редуктору бокового привода мельницы. Остаток на сите 80 мкм после включения устройства, как это показано на рисунке 4.5 уменьшился со временем с 11 до 7%. Такое повышение качества помола свидетельствовало о возможности увеличения производительности мельницы и о целесообразности проведения испытаний в заводских условиях.

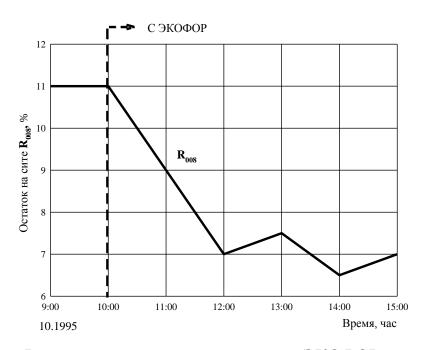


Рисунок 4.5. – Результаты испытания устройства ЭКОФОР на опытной мельнице Гипроцемент

На рисунке 4.6. представлены результаты испытания устройства в цехе силикатного кирпича [78] АО «Стройматериалы», г. Белгород.

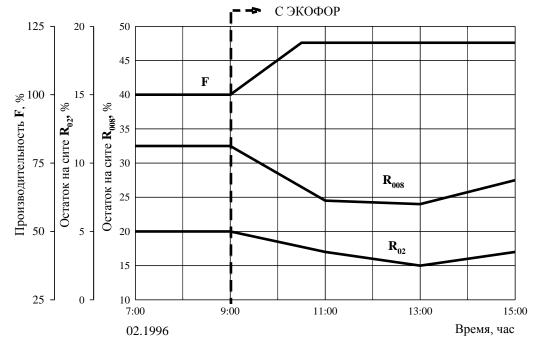


Рисунок 4.6. – Результаты испытания в АО «Стройматериалы»

Устройство подключалось к выходному подшипнику мельницы. Результаты оценивались по времени освобождения бункера извести и по качеству

помола. Бункер извести без устройства освобождался за 130 минут, а с устройством за 105 минут. Повышение производительности мельницы составило 19,2%., а качество помола осталось в допуске.

В 1996 году началось внедрение устройств ЭКОФОР за рубежом [79, 80]. Сначала они были внедрены на четырех заводах Египта: Tourah Portland Cement, Helwan Portland Cement, Ameriyah Cement, Alexandria Portland Cement и на Кипре на Vassiliko Cement Works. За прошедшие годы проведены испытания в 42 странах мира. Идет активное внедрение устройств на цементных заводах Турции [81], где министерство энергетики требует снизить электропотребление цементных заводов на 10%.

На Tourah Cement — рисунок 4.7. после включения устройства удельная поверхность цемента увеличилась на 300 см²/г, после чего питание мельницы было в два приема увеличено с 75 до 85 т/час, то есть на 13%.

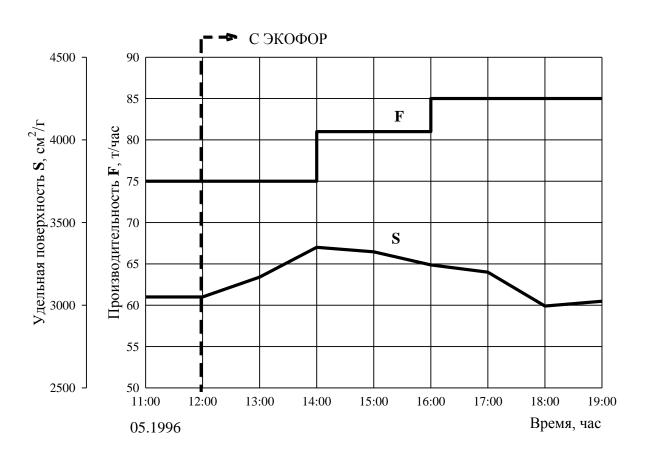


Рисунок 4.7. – Результаты испытания в Tourah Cement Company, Египет

На Ameriyah Cement в Египте до и после испытания из мельницы вынимали мелющие шары, представленные на рисунке 4.8. Шары оказались полностью очищенными от имевшейся на них до испытания твердой оболочки. Питание мельницы было увеличено с 87.0 до 100.5 т/час, на 15%.

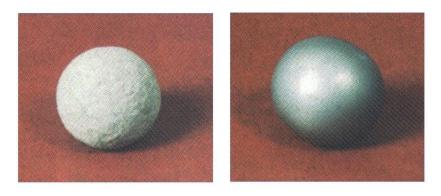


Рисунок 4.8. – Мелющие шары до и после ЭКОФОР

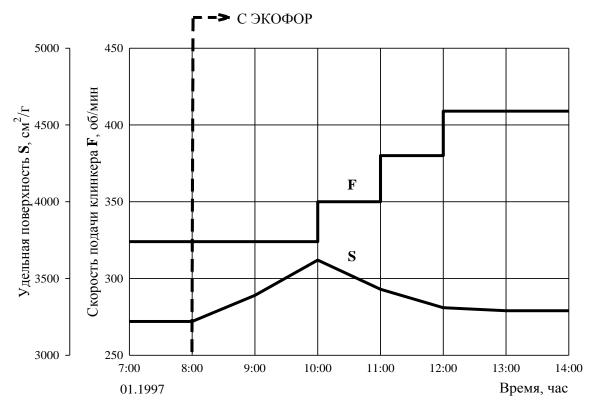


Рисунок 4.9. – Результаты испытания на заводе «Китай», КНР

На рисунке 4.9. представлены результаты испытания устройства в Китае на одноименном цементном заводе «Китай», на трехкамерной мельнице про-

изводительностью 18 т/час с наружным водяным охлаждением. Её питание регулировали изменением оборотов привода транспортера дозатора. После включения устройства мельница значительно, на 400 см²/г увеличила удельную поверхность. После этого её питание было в три приема увеличено на 26%. Получено снижение удельного расхода электроэнергии на 9,0 кВт час/т цемента.

В Казахстане на Бухтарминской цементной компании цемент ПЦ500 Д0 производился с использованием триэтаноламина. После включения устройства ЭКОФОР мельница опустошилась, удельная поверхность цемента выросла на 600 см²/г. Производительность была увеличена, как это показано на рисунке 4.10., с 18,9 до 22.9 т/час, то есть на 21%. Снижение удельного расхода электроэнергии составило 8 кВт час/т цемента.

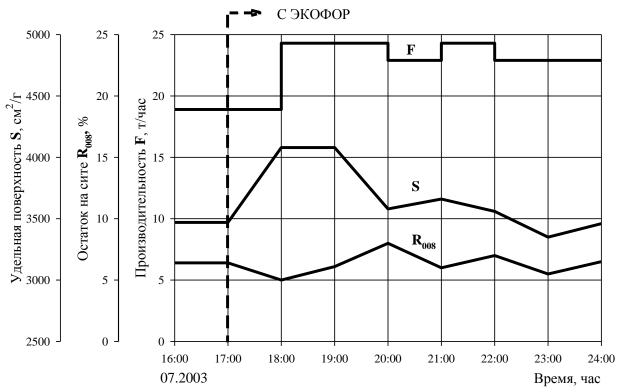


Рисунок 4.10. – Результаты испытания на Бухтарминской цементной компании, Казахстан

На рисунке 4.11 представлена диаграмма роста производительности мельницы ОАО «Сухоложцемент» после включения устройства ЭКОФОР

при производстве цемента ПЦТ I-50. Питание мельницы увеличено с 35,6 до 39 т/час, на 9,5%. Снижение удельного расхода энергии 5 кВт час/т цемента.

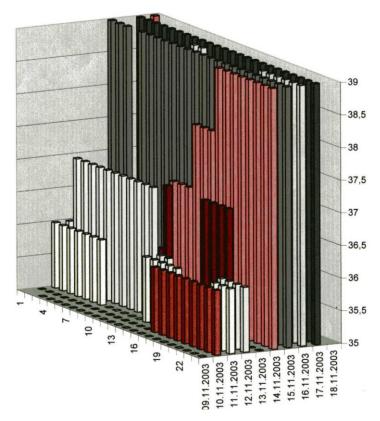


Рисунок 4.11. – Результаты испытания на ОАО «Сухоложцемент»

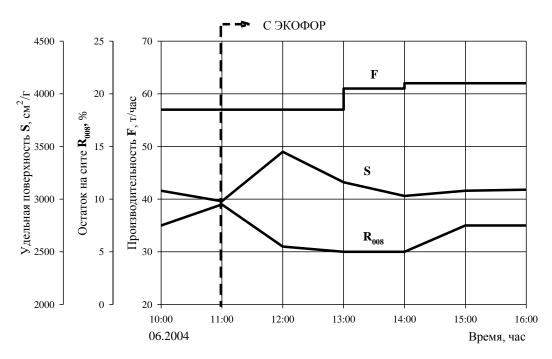


Рисунок 4.12. – Результаты испытания на ЗАО «Пикалевский цемент»

На рисунке 4.12 представлены результаты испытания устройства на мельнице ЗАО «Пикалевский цемент» при производстве цемента ПЦ400-Д20. После включения устройства питание мельницы увеличено с 57 до 62 т/час, на 9,0%. Снижение удельного расхода энергии составило 3 кВт час/т.

На рисунке 4.13 представлены результаты испытания устройства на мельнице ОАО «Жигулевские стройматериалы» при производстве цемента ПЦ500-Д0. После включения устройства питание мельницы увеличено с 35 до 46 т/час, то есть на 31,0%. Снижение удельного расхода энергии составило 10 кВт час/т цемента.

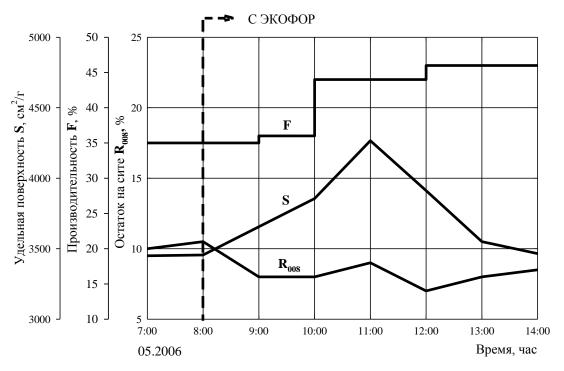


Рисунок 4.13. – Результаты испытания на ОАО «Жигулевские стройматериалы»

4.8. Результаты испытаний шаровых мельниц открытого цикла

В приложении 1 приведены данные по испытаниям, проведенным на системах помола открытого цикла с применением устройства ЭКОФОР, с 1995 по 2010 год. Это 57 мельниц, из них 23 в России, 20 в странах СНГ и 14 в дальнем зарубежье. Они представляют третью часть всех проведенных испытаний, остальные прошли на мельницах замкнутого цикла помола.

Диапазон полученного повышения производительности мельниц составлял от 3 до 30%, также как это отмечается [5] для жидких интенсификаторов помола.

Снижение удельного расхода электроэнергии на помол тонны цемента находится при этом в диапазоне от 3 до 11 кВт час/ т, в среднем 7 кВт час/т. Если принять среднюю производительность цементной мельницы в России 45 т/час, то одно устройство ЭКОФОР на такой средне—статистической мельнице может сберечь 300 кВт час за каждый час её работы.

Отличия в эффективности устройств зависят от технического состояния оборудования и в основном от размалываемости клинкера. Она определяется его пористостью, химическим и минералогическим составом, микроструктурой клинкера и кристаллографией клинкерных материалов [82].

Не удалось повысить производительность мельницы на цемзаводе «Октябрь» ОАО «Новоросцемент». При производстве сульфатостойкого цемента ССПЦ400 Д20 с добавкой 10% опоки она работала на уровне 58 т/час, больше чем аналогичная мельница без использования опоки. Измерения цифровым мультиметром электрического потенциала опоки по отношению к земле показали, что эта добавка имеет отрицательный потенциал на уровне - 500 ... 800 мВ. То есть она играет роль природного интенсификатора помола, за счет аниона кислотного остатка кремнезема нейтрализуя положительный заряд материала и повышая производительность мельницы. Такими свойствами обладает также пуццолан, и некоторые другие добавки. На фоне пуццолана и опоки ЭКОФОР и интенсификаторы помола не могут дать эффекта.

Глава 5

ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ ПОМОЛА С ШАРОВЫМИ МЕЛЬНИЦАМИ

5.1. Современные мельницы замкнутого цикла помола

Преимущества замкнутых систем помола цемента в настоящее время неоспоримы. Примерно 30% энергии, потребляемой при помоле в открытом цикле, экономятся введением сепаратора. Кроме этого таким системам доступны высокие марки цементов, которые невозможно получить системами помола открытого цикла.

На рисунке 5.1. представлена современная мельница замкнутого цикла производительностью 320 т/час, которая является чемпионом среди шаровых мельниц мира. Она произведена датской компанией FLSmidth и работает на заводе Nuh Cimento в Турции. Мельница имеет электродвигатель мощностью



Рисунок 5.1. – Шаровая мельница производительностью 320 т/час

10000 кВт, боковой редукторный привод и опоры на башмаки подшипников скольжения гидродинамического типа.

Эта рекордная мельница в 2009 году отреагировала на подключение двух устройств ЭКОФОР также рекордным на 41 т/час увеличением производительности при производстве цемента марки РКСb.

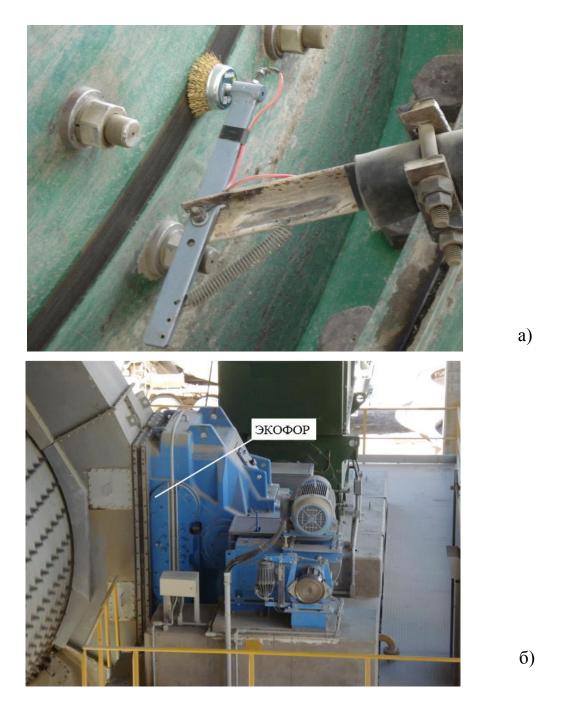


Рисунок 5.2. – Места подключения устройства к шаровой мельнице с опорами на башмаки подшипников скольжения

Подключение устройства ЭКОФОР в соответствии с рисунком 5.2. к современным шаровым мельницам с опорами на башмаки подшипников скольжения производится: а) — для центрального привода через щеточный, подпружиненный, изолированный от земли контакт, или б) — при боковом редукторном приводе к корпусу этого редуктора.

Подключение к мельницам замкнутого цикла с цапфовыми подшипниками производится в соответствии с рисунком 4.3., также как и для мельниц открытого цикла помола.

Используемый в системе замкнутого цикла сепаратор дает возможность контролировать верхний размер частиц, выводимых из помольной цепи как готовый продукт, а частицы больше требуемого размера, называемые крупкой, отправляются, как это показано на рисунке 5.3., на повторный помол и составляют вместе со свежим питанием циркулирующую нагрузку мельницы. Поскольку измельчение происходит только в мельнице, то, выводя из оборота мелкую фракцию, сепаратор облегчает ей работу, предотвращает переизмельчение тонких частиц и расширяет возможности совместного помола материалов с различной размалываемостью.

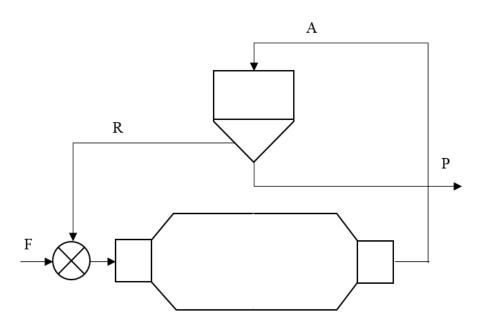


Рисунок 5.3. – Структура системы помола замкнутого цикла

5.2. Динамические сепараторы

Опыт работы с устройством ЭКОФОР за рубежом с 1996 года на более чем ста двадцати замкнутых системах помола дал возможность оценить в работе все существующие поколения воздушных сепараторов и выявить возможности их оперативного управления. Улучшение их конструкций заняло у известных западных производителей достаточно длительное время, в настоящий момент ожидается появление сепаратора уже четвертого поколения.

Первые конструкции динамических сепараторов были недостаточно эффективны, значительное количество готового продукта возвращалось вместе с крупкой на повторный помол. Для оценки уровня этой части возврата использовалось понятие байпаса сепаратора, структура которого, как обводного сепаратор пути, представлена на рисунке 5.4.

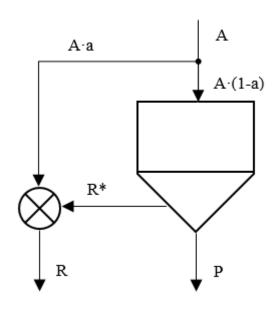


Рисунок 5.4. – Структура сепаратора с байпасом «а»

С развитием конструкции сепаратора в части повышения его эффективности и уменьшением байпаса, а особенно с развитием гранулометрического способа оценки качества измельчения с помощью лазерного гранулометра, оказалось, что проще и более детально эффективность сепаратора оценивается при помощи кривой Тромпа. То, что выше этой кривой, уходит из сепаратора, как готовый продукт, а то, что ниже отправляется обратно в мельницу. Кривая строится в соответствии с пропорцией веса отдельных

фракций крупности частиц в цементе и крупке. Для каждой фракции крупности определяется величина пропорции между содержанием этой фракции в цементе и крупке, так называемое число разделения или селективность, и откладывается по оси ординат. Размер зерен каждой фракции в логарифмиче-

ском масштабе откладывается по оси абсцисс. Часть мельчайшего порошка поступает в сепаратор в виде агрегатов, частично уходит из него вместе с крупкой, но выявляется при гранулометрии. Его наличие в крупке представляет резерв дальнейшего повышения эффективности сепаратора за счет разрушения этих агрегатов устройством ЭКОФОР в процессе сепарации.

На рисунке 5.5. приведены кривые Тромпа для трех поколений воздушных цементных сепараторов.

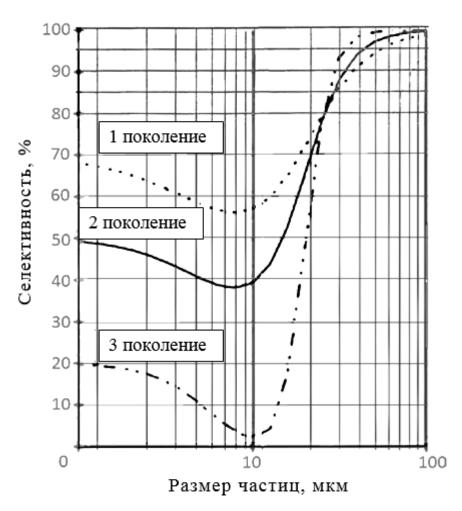


Рисунок 5.5. – Сравнение кривых Тромпа для различных поколений сепараторов

Сравнение эффективности сепараторов показывает направленность разработки их конструкции с целью уменьшения байпаса. Если для первого поколения доля частиц размером 10 мкм в возврате составляла 57%, то для второго поколения она была уже 38 %, а для третьего поколения составляет все-

го 3%. Но полной дезагрегации мелких частиц, размером менее 10 мкм, добиться пока не удалось.

Во время испытаний устройства ЭКОФОР были выявлены их возможности в части электронейтрализации измельченного продукта.

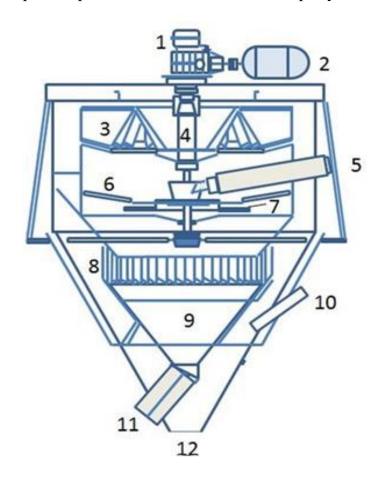


Рисунок 5.6. – Сепаратор первого поколения, где

1 — редуктор, 2 — двигатель, 3 — рабочее колесо вентилятора, 4 — вал, 5 — ввод питания, 6 — направляющие лопатки, 7 — распределительная тарелка, 8 — воздушные лопатки, 9 — хвостовой конус, 10 — выход воздуха, 11 — выход крупки, 12 — выход готового продукта.

Первое поколение динамических сепараторов, представленное на рисунке 5.6., имело установленные внутри направляющие лопатки и рабочее колесо вентилятора. Питание вводилось в сепаратор сверху по течке на поверхность распределительной тарелки. Распределительная тарелка и рабочее колесо вентилятора приводились во вращение извне. Воздух вводился сбоку и поднимал частицы с распределительной тарелки сквозь направляющие ло-

патки. Центробежные силы отбрасывали грубые частицы к стенкам, и они попадали во внешний конус возврата. Воздух вместе с тонкими частицами попадал через вентилятор в камеру тонкого продукта. Инерция и гравитация собирали тонкомолотые частицы в конусе для готового продукта. Тонкость помола таким образом могла поддерживаться в пределах 2500-6000 см²/г. Она настраивалась направляющими лопатками и положением лопаток рабочего колеса вентилятора, а также задвижкой в контуре внутреннего вентилятора. Увеличенное количество направляющих лопаток обеспечивало более тонкий продукт и увеличение объема возвращаемой крупки. Открытие заслонки внутреннего вентилятора также приводило к укрупнению частиц продукта, соответственно, при закрытии продукт становился тоньше. Сепараторы первого поколения имели фиксированную скорость вращения распределительной тарелки. Это не обеспечивало дистанционности и гибкости их управления. Такого сепаратора следует избегать при модернизации системы помола открытого типа.

Второе поколение динамических сепараторов, представленное на рисунке 5.7., имеет направляющие лопатки и внешний вентилятор. Питание подается в сепаратор сверху через течку на распределительную тарелку. Распределительная тарелка и направляющие лопатки приводятся во вращение сверху извне. Воздух циркулирует с помощью вентилятора.

Частицы отбрасываются с распределительной тарелки и поднимаются воздухом сквозь направляющие лопатки. Центробежные силы прижимают крупные частицы к стенкам, и они падают в конус возврата. Тонкие частицы проходят сквозь направляющие лопатки и выводятся вместе с циркулирующим воздухом во внешние циклоны, где они оседают и выводятся в качестве готового продукта. Выходящий воздух очищается с помощью фильтров системы обеспыливания.

Предварительная настройка тонкости происходит посредством изменения количества и позиции направляющих лопаток и скорости воздушного

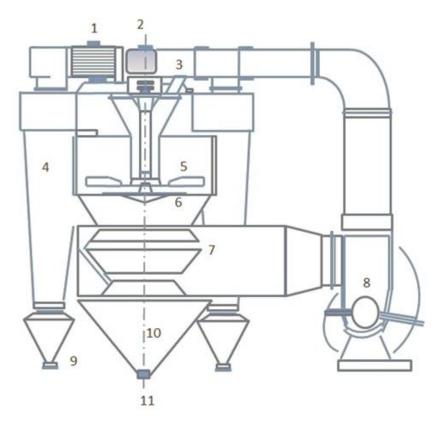


Рисунок 5.7. – Сепаратор второго поколения, где

1 — двигатель, 2 — редуктор, 3 — ввод питания, 4 — циклоны, 5 — направляющие лопатки, 6 — распределительная тарелка, 7 — воздушные лопатки, 8 — вентилятор, 9 — выход готового продукта, 10 — конус возврата, 11 — выход крупки.

потока, который может регулироваться за счет изменяемой скорости вращения рабочего колеса вентилятора или положения заслонки. Основным является изменение скорости вращения распределительной тарелки. Увеличение скорости вращения тарелки до определенного предела приводит к получению более тонкого продукта и увеличению возврата.

Сепараторы второго поколения предоставили ряд преимуществ по сравнению с сепараторами первого поколения. Отдельная настройка скорости вращения распределительной тарелки и потока воздуха дает большие возможности для дистанционной работы и лучшую эффективность по отделению тонких частиц. Небольшие циклоны обеспечивают эффективный сбор порошка, меньший возврат тонких частиц и, соответственно, большую эффективность. Тонкость настраивается дистанционно во время работы.

Третье поколение динамических сепараторов, представленное на рисунке 5.8., имеет корзину, внешние привод и вентилятор. Материал вводится в сепаратор сверху через две или четыре течки, расположенные вокруг по верху корпуса сепаратора.

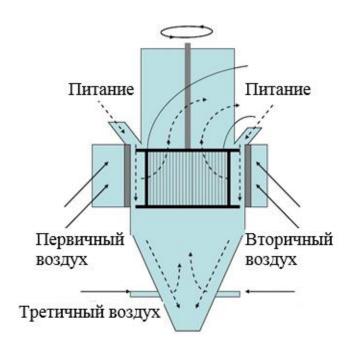


Рисунок 5.8. – Сепаратор третьего поколения

Первичный и вторичный воздух вдувается в сепаратор в зону сепарации по касательной через направляющие неподвижные лопасти. Первичным воздухом могут быть отходящие газы от мельницы или окружающий воздух. Классификация тонких частиц происходит через пластины вращающейся корзины и дальше через верх сепаратора они собираются в циклонах или фильтре обеспыливания. Крупка, не прошедшая через пластины вращающейся корзины, отводится в конус сепаратора. Третичный воздух вводится в его нижнюю часть для борьбы с агрегацией и уменьшает байпас сепаратора.

Сепаратор третьего поколения разработан и подготовлен к серийному выпуску также и ОАО «Волгоцеммаш». За рубежом почти каждая фирма, поставляющая оборудование для производства цемента имеет свой сепаратор третьего поколения:

O'Sepa и Sepax производства FLSmidth, Дания,

Sepol производства ThyssenKrupp Polysius, Германия, США, Sepmaster производства КНD Humboldt Wedag. Германия, QDK производства Christian Pfeiffer, Германия, TSV производства FCB, Франция, PRESEP VTP производства PSP Engineering, Чехия.

5.3. Статический V – сепаратор

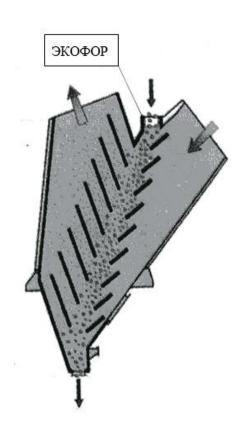


Рисунок 5.9. – V сепаратор

По опубликованным материалам всегда казалось, что V – сепаратор простейшим образом подлежит электронейтрализации, поскольку не имеет вращающихся частей и полностью изготавливается из металла.

Материал подается на встроенную, ступенчатую, каскадную решетку V — сепаратора как это показано на рисунке 5.9. Тонкие фракции через сепарирующие каналы выносятся воздушным потоком вверх, а более крупные по ступенчатой каскадной решетке падают вниз и выгружаются в нижней части корпуса.

V – сепараторы не только выделяют тонкую фракцию из загружаемого в виде спрессованных пластинок измельченного материала, но производят для этого его дезагломерацию, необходимую после обработки на роллер–прессе. Требуемая тонкость помола обеспечивается регулированием скорости воздушного потока в сепарирующих каналах. Граница разделения находится в интервале от 80 мкм до 1,5 мм.

В феврале 2010 года оказалось возможным провести локальное испытание по электронейтрализации на V – сепараторе завода Akchan Cimento в Турции, который был там установлен после роллер–пресса. Возвратная

фракция крупнее, чем требовалось для мельницы, из нижней части сепаратора поступала на отдельный транспортер и далее элеватором повторно на роллер—пресс. Пробы для лазерной гранулометрии возвратной фракции отбирались с этого транспортера до и после включения устройства ЭКОФОР.

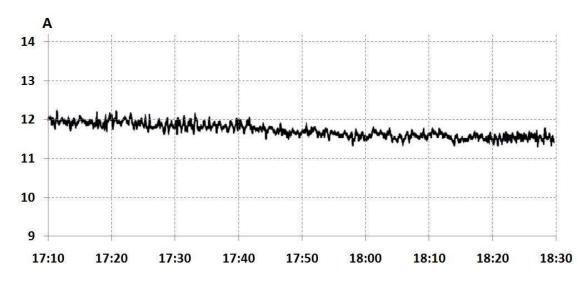


Рисунок 5.10. – Ток электродвигателя транспортера возврата материала из V – сепаратора

Устройство ЭКОФОР было подключено к фланцу горловины подачи материала в сепаратор и включено в 17:10. Нагрузка электродвигателя транспортера возвратной фракции была под контролем компьютера системы управления. На рисунке 5.10. представлена запись изменения тока электродвигателя во времени. Видно, что нагрузка транспортера уменьшилась на 0,5 А. Расчет показал, что такое уменьшение нагрузки является следствием уменьшения доли возвращаемого на повторное дробление материала на 20%.

Сравнительный анализ гранулометрии возвратной фракции — рисунок 5.11. показывает, что электронейтрализация при сепарации привела к уменьшению в возврате вклада частиц размером от 1 до 100 мкм. Соответственно вклад частиц размером от 100 до 500 мкм увеличился. Частицы размером от 1 до 100 мкм, за счет выполняемой устройством их дополнительной дезагрегации, пневмотранспортом были доставлены в бункер, питающий мельницу.

Общее количество возвращаемого в роллер–пресс материала уменьшилось, что и сказалось на падении нагрузки электродвигателя транспортера.

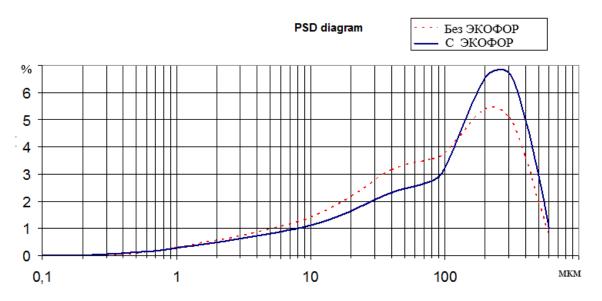


Рисунок 5.11. – Гранулометрический состав возвратной фракции

Таким образом, селективность V — сепаратора с подключением устройства ЭКОФОР улучшается. Такие сепараторы очень широко используются их разработчиками из KHD Humboldt Wedag. Теперь их эффективность может быть повышена, причем не только при новых поставках, но и на работающих системах.

5.4. Современный контроль качества измельчения

Системе помола более высокого уровня должна соответствовать система измерения тонкости помола, являющейся косвенным признаком главного показателя – прочности цемента.

Целью измельчения в цементной мельнице является освобождение поверхностей, необходимых для реакции гидратации. Она идет за счет диффузии от поверхности частицы к её внутренней части. Скорость её по данным [83] невелика: так алит гидратирует за сутки на глубину 0.5 мкм, за трое суток на 2 мкм, за 7 суток на 3-4 мкм, за 28 суток на 6-7 мкм. Белит гидратирует ещё медленнее: за 30 суток на 1 мкм, за 60 суток на 2 мкм, за 80 суток

на 3 мкм. В цементе, богатом алитом, зерна размером 30 мкм гидратируют за 28 суток на 87%.

Гидратация цемента, определяющая его прочность, имеет оптимальную зависимость от размеров частиц. Мельчайшие частицы — до 3 мкм дают повышенную удельную поверхность и необходимы для начальной прочности, но не участвуют в обеспечении её конечного значения. Зерна от 3 до 30 мкм составляют наибольшую ценность для прочности [59, 84]. Частицы 40 — 60 мкм и более гидратируют только с поверхности, в основном играют роль дорогого инертного наполнителя. Такие частицы не полностью используют вяжущие свойства клинкера [60]. Поэтому странным выглядит контроль тонкости помола по остатку на сите 80 мкм.

В межгосударственном стандарте [85], действовавшем в России до 2001 года, тонкость помола определялась по остатку на сите N 008, а определение удельной поверхности цемента было факультативным, и поэтому редко где проводилось. Такой контроль тонкости помола по остатку на сите 80 мкм, с учетом того, что граница эффективности проходит на уровне 30 мкм, мог характеризовать только невозможность систем помола открытого цикла производить цемент высоких марок.

Когда в 1996 году в дальнем зарубежье началось внедрение технологии управляемой нейтрализации, мы нигде не встретили определение тонкости помола по остатку на сите 80 мкм, только по удельной поверхности и по остатку на сите 45 мкм. Впоследствии, с ужесточением требований, распространилась практика проведения определения двух параметров, характеризующих тонкость помола: удельной поверхности и остатка на сите преимущественно 32 мкм. Эти остатки по сравнению с 80 мкм действительно характеризуют ход помола и косвенно в большей степени будущую прочность.

В 1998 году в России был введен межгосударственный стандарт на общие технические условия для цемента [86], в котором тонкость помола определялась как характеристика дисперсности, которая может быть выражена массовой долей остатка (прохода) на одном или нескольких контрольных си-

тах или величиной удельной поверхности. Конкретного указание на применение сита 80 мкм не содержалось. А в 2001 году был введен стандарт на методы испытаний цемента [87]. В нем предусматривается определение тонкости помола по остатку на сите N 009, допускалось сито N 008, а также предусматривалось измерение удельной поверхности методом воздухонепроницаемости. В части определения тонкости помола этот стандарт нельзя признать опережающим. Наши заводы получили право продолжать вести помол по грубому показателю, не имеющему отношения к современному цементу.

Тем временем за рубежом продолжалось развитие техники измерения тонкости помола, позволяющее устранить недостатки существующих методов и соответствовать более высоким требованиям к качеству измельчения. Так заслуженно и широко используемый метод измерения удельной поверхности, принятый повсеместно по Блейну и практикуемый уже семьдесят лет, тем не менее, является в основном ручным и имеет низкую воспроизводимость. Он своей инерционностью не дает возможность оперативно управлять помольным агрегатом. Внося усреднение для всех размеров частиц, он не представляет информации для корректировки содержания отдельных фракций в цементе, а это сейчас уже требуется.



Рисунок 5.12. – Гранулометр Mastersizer 2000

Новым методом измерения, который устранил указанные выше недостатки измерения удельной поверхности, явилась лазерная гранулометрия. Английская компания Malvern Insruments Ltd начала поставлять, в том числе на цементные заводы, лабораторные гранулометры Mastersizer 2000, представленный на рисунке 5.12. и устанавливаемый в потоке цемента Insitec Dry [88, 89].

Эти гранулометры используют метод лазерной дифракции для измерения размеров частиц. Лазерный луч при облучении частиц рассеивается. Углы рассеивания зависят от размеров частиц. При увеличении размеров эти углы также увеличиваются. Рассеивание улавливается светочувствительным детектором, затем автоматически производятся расчеты распределения частиц по размерам. Результаты расчетов выводятся на дисплей и при желании на принтер. Диапазон размеров измеряемых частиц от 0,01 до 2500 мкм, погрешность измерения 1%.

Для примера на рисунке 5.13. приведена содержательная часть данных, получаемых с лазерного гранулометра при анализе цемента CEM1 42,5 на заводе Akcimento Buyukcekmece Factory, Турция в феврале 2010 года.

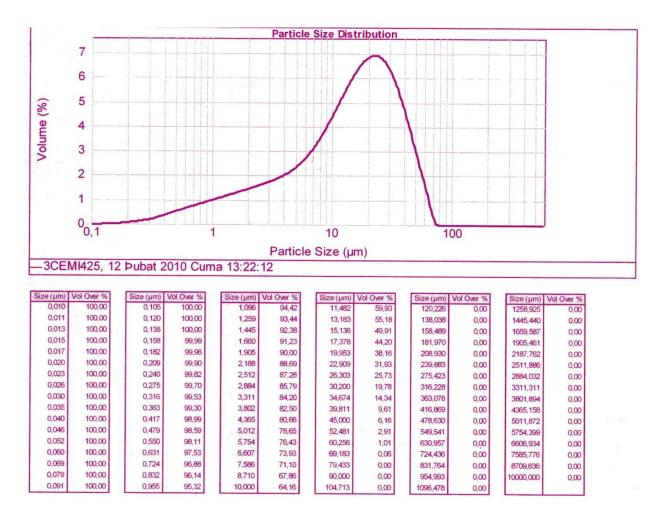


Рисунок 5.13. – Кривая и таблица распределения частиц по размерам, полученная с лазерного гранулометра Mastersizer 2000 для CEM1 42,5

Как видно из таблицы, остаток на сите 80 мкм был бы для этого цемента равным 0, для 45 мкм – 6,16%, а 32 мкм – 19,5%. Получение кривой распределения частиц по размерам служит также основанием для корректировки распределения частиц изменением кратности циркулирующей нагрузки и ассортимента мелющих шаров.

Управление работой помольной системой может проводиться по данным, получаемым в лаборатории с лазерного гранулометра о значении Dv(50) – размере частиц на уровне 50% их распределения. Так для цемента, данные о котором были приведены выше, это 16,1 мкм. Лаборатория корректирует уставку по Dv(50) по данным текущих измерений прочности.

Для оперативного, текущего управления помольным агрегатом, не дожидаясь данных из лаборатории, которые приходят не чаще, чем один раз в час, используется лазерный гранулометр, устанавливаемый в потоке цемента в соответствии с рисунком 5.14.

Диапазон размеров измеряемых частиц от 0,1 до 10000 мкм. Там, где удалось увидеть его в работе, сигнал о Dv(50) подавался на современную автоматическую систему каждые 5 секунд, что позволяло ей вести непрерывное управление ходом помола.

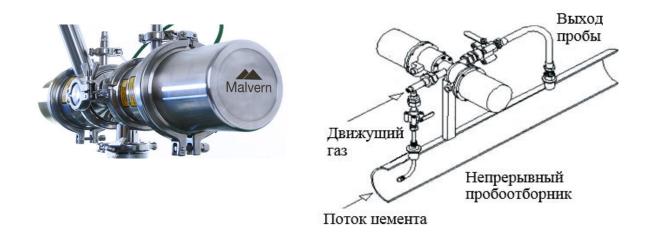


Рисунок 5.14. – Лазерный гранулометр Insitec Dry и его установка в потоке

Такие системы могут появиться и на новых цементных заводах в России, во всяком случае, предложение уже последовало [90].

5.5. Особенности работы системы помола замкнутого цикла

В системе помола замкнутого цикла силовым элементом является мельница, а за качество помола отвечает сепаратор. Эти два агрегата работают совместно, потоками материала влияя друг на друга. Поэтому мельница и сепаратор должны соответствовать друг другу не только в статическом, но и в динамическом режимах. В статике, ради перспективы улучшения гранулометрии цемента и дальнейшей интенсификации системы помола, целесообразно заложить возможность работы с кратностью циркуляции, то есть отношением суммы свежего питания и крупки к свежему питанию, не менее 2,5. А в динамике системы замкнутого цикла значительно более склонны к потере устойчивости, выраженной в стремлении к переполнению мельницы, выходу из допусков по тонине помола и являются в этом смысле более чувствительными к возмущающим воздействиям, чем системы открытого цикла.

Системы помола замкнутого цикла не привычны для российских цементников. Даже при модернизации систем открытого цикла с закупкой сепаратора из-за рубежа, от приобретения систем автоматического управления нередко отказываются по причине их дороговизны, в том числе от записанных в памяти контроллеров конфиденциальных алгоритмов управления, учитывающих тонкости функционирования этой более сложной технологии помола. Специалисты иностранных фирм, запускающие в России новые мельницы замкнутого цикла, также не раскрывают информацию. Она является конфиденциальной и известна только консалтинговым компаниям, крупным поставщикам оборудования и цементным корпорациям, таким как Lafarge и Holcim, имеющим собственную науку в технических центрах и проводящим ежегодные семинары по обучению своих специалистов. При испытаниях устройств управляемой нейтрализации за рубежом на мельницах замкнутого

цикла нам пришлось эти вопросы решать по ходу внедрения на базе представлений о работе систем автоматического управления с обратной связью.

Первое успешное испытание устройства ЭКОФОР на мельнице замкнутого цикла производительностью 50 т/час проходило на Alexandria Cement в Египте. Эта мельнице только три месяца назад была оборудована сепаратором третьего поколения производства FLSmidth. При этом мелющая система получила возможность производить высококачественный цемент, но началось налипание на мелющие шары, и производительность её снизилась.

Подключение устройств ЭКОФОР к шаровой мельнице производится как и для мельницы открытого цикла. Место подключения к редуктору ротора сепаратора [91] показано на рисунке 5.15. Результаты испытания представлены в таблице 5.1.



Рисунок 5.15. – Подключение к сепаратору

Через двадцать часов после включения устройства свежее питание мельницы осталось без изменения, но глухой звук мелющих тел сменился на звонкий, металлический. Всвязи с этим была предпринята попытка увеличить

свежее питание мельницы. В течение часа дополнительное увеличение свежего питания на 1 т/час привело к увеличению возврата из сепаратора с 61 до 135 т/час. Весь час мельница шла на переполнение, что является признаком потери системой устойчивости.

Таблица 5.1. – Результаты испытания на Alexandria Cement, Египет

Время	Свежее питание, т/час	Возврат с се- паратора, т/час	Скорость ротора сепаратора, %	Удельная поверхность 3350±100, см²/г		
	До включения ЭКОФОР					
12.1996	50	58	61	3442		
	ЭКОФОР включен на мельницу, чистка шаров					
	50	61	61	3330		
	Потеря устойчивости при увеличении свежего питания					
	51 До 135 за один час		61	3295		
	Связанное управление мельницей и сепаратором					
	55	30	58	3397		
	ЭКОФОР включен на мельницу и сепаратор					
	56,25	22	58	3448		

Структурно мельница замкнутого цикла, как это показано на рисунке 5.3. или конкретно для данной системы на рисунке 5.16., охвачена положительной обратной связью через один из выходов сепаратора. Из теории и практики систем управления известно, что для повышения качества их работы и стабилизации используются отрицательные обратные связи, а положительные применяются как корректирующие и снижают запас устойчивости системы. В замкнутом цикле помола нет возможности выбора типа связи. То, что есть — технологически необходимо. Так называемый передаточный коэффициент данной системы равен произведению передаточных коэффициентов мельницы и сепаратора. Для сохранения устойчивости системы помола

Diagram: Mill 19 kW PLC Communication 9 kW 894 h 34 % 97 °C 8.8 mBar S 2 % C 3 122 KW \$ ¢ 3.00 th

Рисунок 5.16. – Система помола цемента на Alexandria Cement, Египет

передаточный коэффициент разомкнутой системы управления должен в соответствии с критерием Найквиста [92] остаться на уровне, предшествующем потери устойчивости. При включении устройства ЭКОФОР на мельницу она постепенно усиливается, её передаточный коэффициент увеличивается. Для сохранения устойчивости системы необходимо снизить вторую составляющую передаточного коэффициента разомкнутой системы управления – передаточный коэффициент сепаратора. Это достигается снижением скорости вращения распределительной тарелки или корзины сепаратора. То есть в системе помола замкнутого цикла любое изменение свежего питания при отклонении от рабочей точки должно сопровождаться обратным изменением скорости вращения ротора сепаратора. Если увеличиваешь свежее питание, то скорость вращения ротора должна быть снижена, а, если уменьшаешь, то увеличена. Основное для системы помола замкнутого цикла – это взаимосвязанное, совместное управление мельницей и сепаратором. Нельзя их изменять раздельно. Ha Alexandria Cement, это было не известно, как и на многих других заводах.

Эти соображения привели к решению о снижении скорости вращения ротора сепаратора на 5% и увеличению свежего питания на10%. После подключения устройства ЭКОФОР параллельно и к сепаратору свежее питание было окончательно увеличено на 12,5%.

Этот подход был неоднократно отработан при испытании технологии управляемой нейтрализации и выявлена единая пропорция этих изменений.

5.6. Рекомендации по работе с системой помола замкнутого цикла

При производительности мельниц до 50 т/час можно использовать одно устройство ЭКОФОР для параллельного подключения мельницы и сепаратора к клемме «Е» устройства, более 50 т/час — два устройства, одно для мельницы, второе для сепаратора [93].

Включать устройство целесообразно, если мельница работает стабильно в течение 3-4 часов и предполагается продолжение выпуска той же марки цемента.

Если мелющие тела покрыты твердой оболочкой, то мельница должна поработать с устройством не менее 12 часов без изменения свежего питания, чтобы дать возможность мелющим телам начать очищаться. Например, включить устройство после монтажа под конец дня и оставить его на ночь. К утру звук второй камеры мельницы должен усилиться. Очистка мелющих тел полностью или иногда только до рябой поверхности происходит медленно. Проверить это можно не ранее чем через три – пять дней работы мельницы.

Если твердая оболочка на мелющих телах до включения устройства отсутствует, то целесообразно включить устройство утром и ежечасно анализировать ситуацию на помольном агрегате.

После включения устройств(а) при стабильном режиме свежего питания происходит улучшение работы мельницы и сепаратора. Первое, на что воздействует устройство — это агрегаты. В период первых 10 — 30 минут после включения устройства они распадаются и выносятся из мельницы. Нагрузка элеватора, поднимающего материал из мельницы в сепаратор, претерпевает скачок на протяжении нескольких минут. Если используются пневмокамерные насосы, то время заполнения их емкости материалом временно сокращается. Начинает улучшаться размалываемость материала, мелкие частицы цемента в меньшей степени прилипают к большим, и не возвращаются с ними на повторный помол. Возврат из сепаратора немного уменьшается, в системе начинает циркулировать меньшее количество материала. Шум мельницы увеличивается из-за её частичного опустошения.

Необходимо измерять тонкость помола каждый час. Сначала качество помола временно повышается. Однако, если своевременно не увеличить свежее питание мельницы, то, вследствие повышения текучести электрически разряженного материала и скорости его прохождения через мельницу, количество находящегося в мельнице материала может слишком уменьшится, что

приведет к снижению результативности измельчения его частиц. Тогда возврат возрастет почти до прежнего уровня, а первоначально улучшенное качество помола упадет. Необходимо сразу же после получения информации о повышении качества помола увеличить свежее питание и в тоже время несколько уменьшить скорость вращения ротора сепаратора. При этом пропорция изменения должна быть примерно равна:

Проценты увеличения и снижения высчитываются от достигнутых уровней этих параметров. Например, каждые дополнительно полученные 100 см²/г удельной поверхности соответствуют необходимости увеличения подачи на 4% и снижению скорости вращения ротора сепаратора на 2% от старого уровня. Например, если дополнительно получено 250 см²/г, то свежее питание следует увеличить на 10%, а скорость ротора уменьшить на 5%.

После увеличения свежего питания возврат из сепаратора и циркулирующая нагрузка естественно увеличиваются. Если возврат в течение следующего часа стабилизируется на новом уровне — значит всё в порядке. При следующем, повышенном значении качества помола необходимо продолжить увеличение свежего питания и уменьшение скорости вращения ротора сепаратора в той же пропорции маленьким шагами ежечасно. Если возврат не стабилизировался и продолжает нарастать, следует резко разгрузить мельницу прекращением питания от 5 до 15 минут и потом поднимать уровень свежего питания опять, но до несколько меньшего уровня.

Мельница, усиленная действием устройства, может и должна содержать внутри на 10-30% материала больше, чем раньше, без всякой опасности переполнения. Разрежение на её выходе, если температура цемента, исключающая его ложное схватывание из-за дегидратации гипса, не превышает допустимой, должно быть снижено на 20-40%, что приводит, как это показано на рисунке 5.17., к лучшему истиранию материала в последней её камере.

Звук первой камеры при этом должен стать глуше, чем раньше, а в последней камере остаться четким, металлическим. Таким образом, обеспечивается нахождение новой рабочей точки для мельницы на правой части переместившейся оптимальной зависимости качества помола от уровня в ней материала.

Это помогает также справиться с нарушением балансировки работы камер мельницы, когда материал уходит в большей степени, чем необходимо из первой камеры во вторую. Такой режим возможен при работе устройств ЭКОФОР, и его необходимо исключить снижением разрежения. Тем более, что современные мельницы оснащены системам впрыска воды во вторую камеру и вопрос о превышении температуры цемента уже не стоит. Обе камеры должны вносить равный вклад в процесс измельчения материала.

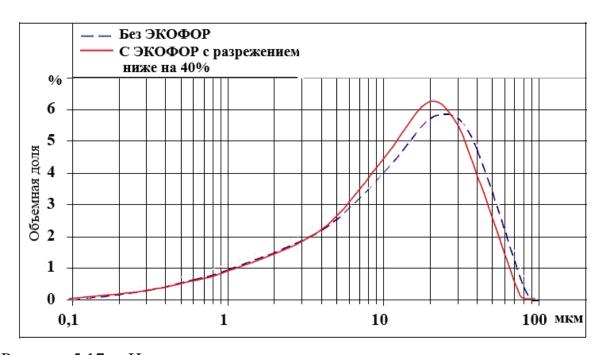


Рисунок 5.17. – Изменение распределения частиц цемента по размерам при снижении разрежения на выходе мельницы

5.7. Динамика интенсификации помола при включении устройства

В условиях реального производства при включении устройств ЭКОФОР не всегда удается организовать процесс повышения производительности мельницы непрерывно. Имеют место случайные остановки, переход на дру-

гую марку цемента, перерывы в работе, связанные с вечерним максимумом электропотребления. Ниже представлены примеры динамики улучшения качества помола, где это представилось возможным сделать с помощью устройства ЭКОФОР без перерывов.

В Китае на заводе «Дианнан» испытание проходило на мельнице производительностью 30 т/час с сепаратором первого поколения. Выпускался цемент 525 с содержанием шлака 28%. Допуск на удельную поверхность был 3200±150 см²/г. На рисунке 5.18. представлена динамика испытания. Сначала устройство было подключено к мельнице. Первые три часа наблюдалось ухудшение тонины помола. Уже в течение первого часа под воздействием устройства мельница опустошилась и перешла в левую часть оптимальной зависимости удельной поверхности от содержания в ней материала. Необходимое же увеличение свежего питания выглядело необычным для оператора.

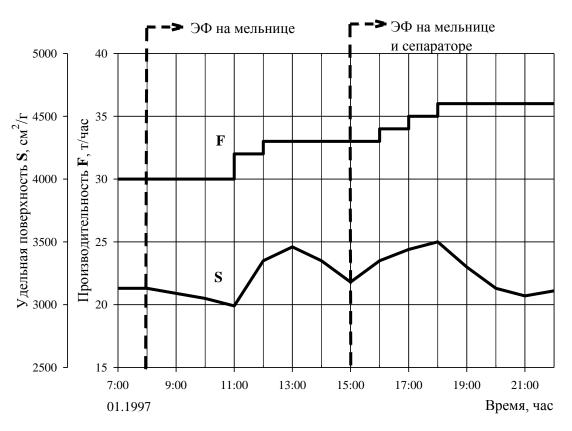


Рисунок 5.18. – Результаты испытания на заводе «Дианнан», КНР

После увеличения питания двумя шагами на 10% удельная поверхность начала расти, и мельница перешла на привычную правую рабочую ветвь ха-

рактеристики. При параллельном подключении к устройству сепаратора произошло значительное улучшение его работы, связанное с уменьшением возврата на помол мелких частиц, ранее налипавших на крупку, что дало возможность довести увеличение свежего питания до 20% с 30 до 36 т/час.

Удельное потребление электроэнергии снизилось на 6 кВт час/т. При испытании выявилось неудобство регулирования сепаратора первого поколения по месту расположения шибера его вентилятора.

На Chalkis Cement в Греции испытания проводились на мельнице с производительностью 85 т/час и сепараторе второго поколения. При помоле цемента использовались жидкие интенсификаторы помола и два устройства ЭКОФОР – одно для мельницы, второе – для сепаратора. После снижения остатка на сите 45 мкм с 14 до 11%, свежее питание мельницы в два приема было увеличено почти на 12% до 95 т/час. Скорость вращения ротора сепаратора была снижена на 6%. Удельное потребление электроэнергии снизилось на 3,6 кВт час/т.

Динамика процесса увеличения производительности представлена на рисунке 5.19.

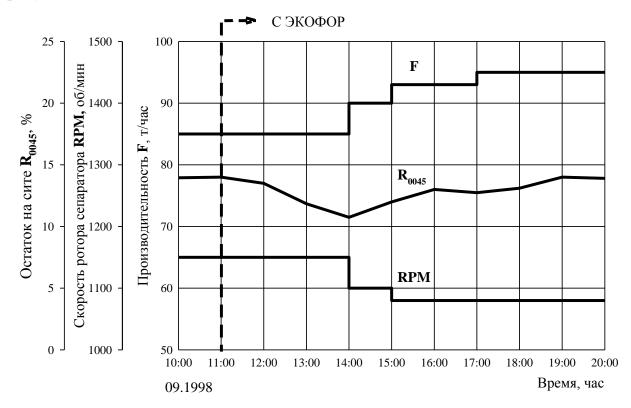


Рисунок 5.19. – Результаты испытания на Chalkis Cement, Греция

В октябре 1998 года проводились испытания на Vassiliko Cement Works, Кипр, на мельнице замкнутого цикла производительностью 82 т/час, использующей жидкие интенсификаторы помола. Свежее питание мельницы было увеличено двумя устройствами ЭКОФОР на 10%. Скорость ротора сепаратора снижена на 5,8%, а разрежение на выходе мельницы на 30%. Удельное потребление электроэнергии снизилось на 3,6 кВт час/т. Устройства ЭКОФОР были испытаны ещё на двух мельницах с результатами, представленными в таблице 5.2., и пять устройств эксплуатировались на заводе в течение 12 лет.

Таблица 5.2. – Результаты эксплуатации устройств ЭКОФОР на Vassiliko Cement Works, Кипр

Свежее питание т/час	Удельное по- требление энергии кВт·час/т	Скорость ротора се- паратора Об/мин	Разрежение на выходе мельницы мм. в. с.	Прирост свежего питания	Количество устройств шт
Без ЭКОФОР / С ЭКОФОР				%	
22 / 26	34,1 / 28,9	1800/ 1725	110 / 90	18,18	1
82 / 90	40,2 / 36,7	1300/1225	120 / 85	9,76	2
67 / 73	38,8 / 35,6	1600/ 1525	120 / 80	8,96	2

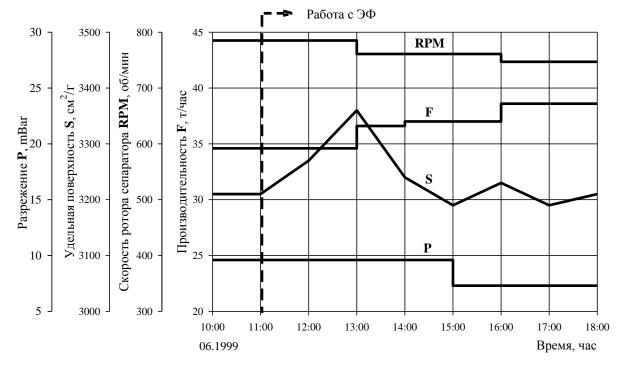


Рисунок 5.20. – Результаты испытания на HDB Siggenthal, Швейцария

На заводе HDB Siggenthal (Holcim) в Швейцарии испытания проводились на мельнице замкнутого цикла, производительностью 34 т/час, с жидкими интенсификаторами помола и одним устройством ЭКОФОР, параллельно подключенным к мельнице и сепаратору. Динамика изменения параметров представлена на рисунке 5.20. После одновременного включения устройства на мельницу и сепаратор, удельная поверхность в течение двух часов увеличилась на 250 см²/г. Свежее питание было увеличено на 11,5 % со снижением скорости вращения сепаратора на 5% и разрежения на 25%.

На заводе Askale Cimento в Эрзуруме, Турция испытания проводились на современной системе помола замкнутого цикла производительностью 74 т/час, использующей жидкие интенсификаторы помола. Динамика изменения параметров при испытании представлена на рисунке 5.21.

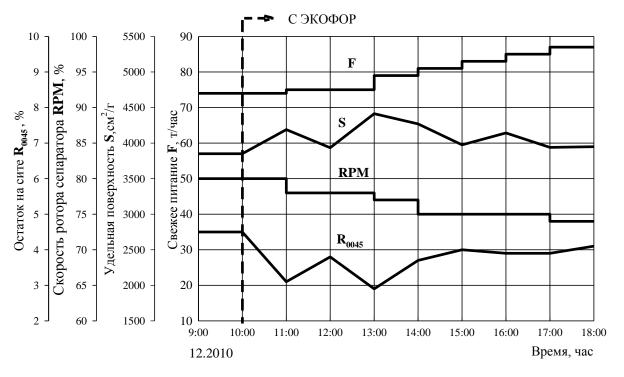


Рисунок 5.21. – Результаты испытания на Askale Cimento, Турция

При испытании использовались два устройства ЭКОФОР – одно для мельницы, второе – для сепаратора. Уже через час после их одновременного включения удельная поверхность цемента увеличилась на $350 \text{ cm}^2/\Gamma$, а остаток на сите 45 мкм уменьшился с 4,5 до 3,1 %. Свежее питание мельницы

было увеличено четырьмя шагами до уровня 87 т/час, то есть на 17,5%. Скорость вращения ротора сепаратора была уменьшена на 7,5 %. Удельное потребление электроэнергии в новом режиме работы снизилось на 4,5 кВт час/т.

Анализ результатов многочисленных испытаний на системах помола замкнутого цикла [79], приведенных в приложении 2, подтвердил необходимость связанного регулирования свежего питания мельницы и скорости вращения ротора сепаратора с пропорцией процентов их изменения, равной – 2.

Если шары в мельнице не имели налипшей на них оболочки, и была обеспечена непрерывность производства цемента одной и той же марки, то при включении устройств повышенная производительность устанавливалась в течение 7 часов, а первая реакция мельницы наступала в первый час её работы в новых условиях. Однако, полная стабилизация режимов, связанная с преобразованием приповерхностного слоя мелющих тел занимает до пяти дней. При отключении устройства наблюдается продолжительное последействие, которое естественно не является негативным явлением, но своей необычностью удивляет специалистов.

При управлении системой помола замкнутого цикла необходимо следить за большим, чем у открытого цикла, количеством параметров. Это значительно усложняет работу оператора и приводит к недоиспользованию возможностей при помоле. Поэтому всегда принимались попытки автоматизировать функционирование системы, например заданием уровня циркулирующей нагрузки мельницы. Так организована, например, работа на мельнице FLSmidth на заводе Nuh Cimento в Турции. Использование двух устройств ЭКОФОР позволило увеличить циркулирующую нагрузку мельницы на 50 т/час, что дало возможность повысить производительность мельницы при выпуске цемента РКСb на 41 т/час.

Уровень автоматизации работы мельниц постоянно возрастает. Этому способствует использование компьютерных систем управления, в которых их усложнение производится на программном уровне.

5.8. Экспертная система управления

Современным цементным заводом управляет, как правило, один оператор, в обязанности которого входит реагировать на сигналы тревоги автоматических систем управления. Всё остальное отрабатывают экспертные системы управления. Впервые такие универсальные автоматические системы, учитывающие как научные представления о ходе технологических процессов производства цемента, так и опыт лучших специалистов и операторов, в том числе и для систем помола цемента были разработаны французской компанией Lafarge SA, крупнейшим производителем строительных материалов.

В апреле 2000 года на одной из подобных систем представилась возможность провести испытание устройств ЭКОФОР на заводе VICAT Montalieu во Франции. Блок-схема цифровой экспертной системы представлена на рисунке 5.22.

Сигнал главной обратной связи поступал в режиме реального времени с лазерного гранулометра Insitec о размере частиц на уровне их 50% распределения — Dv(50). Этот сигнал сравнивался в блоке выработки команд с уставкой на Dv(50), поступающей из лаборатории на данную марку цемента. Сигнал рассогласования и производная сигнала с гранулометра после преобразования поступали в логическое вычислительное устройство, которое выдавало две команды — одну на изменение подачи свежего питания в мельницу, вторую — на изменение скорости вращения ротора сепаратора.

В системе использовались корректирующие обратные связи: по каналам звука первой камеры мельницы, нагрузки элеватора и циркулирующей нагрузки. Все эти параметры по-своему свидетельствовали о состоянии помола в данный момент и давали возможность предвидеть тенденцию изменения этого состояния. С датчиков звука первой камеры, нагрузки элеватора и циркулирующей нагрузки сигналы поступали на свои блоки выработки команд, где сравнивались с уставками для каждого из этих параметров, заводимыми в эти блоки для каждой марки цемента.

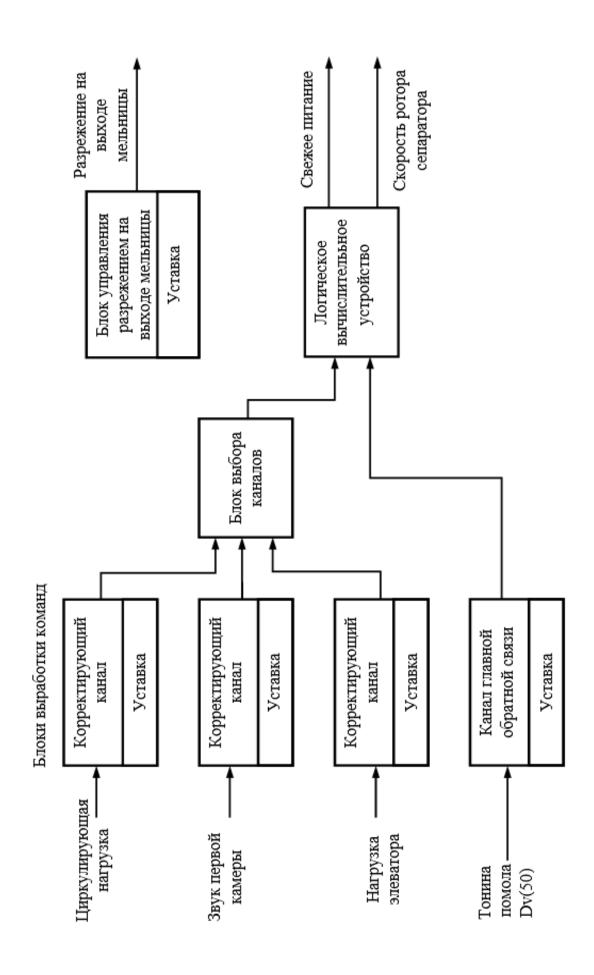


Рисунок 5.22. – Блок-схема экспертной системы управления мельницей

Эти сигналы, за исключением нагрузки элеватора, дифференцировались и суммировались каждый со своим сигналом рассогласования, преобразовывались и поступали в блок выбора каналов. То есть управление по этим параметрам производилось по отклонению и её производной.

В блоках выработки команд сигнал каждого канала проходил преобразование, включающее зону нечувствительности и масштабирование с необходимым коэффициентом и полярностью.

Зоны нечувствительности обеспечивали приоритет работы каналов. Например, известно, что возврат реагирует на изменение ситуации в мельнице быстрее звука первой камеры. Поэтому, если звук был больше нормы, то приоритет отдавался каналу звука. Если звук был ниже нормы, то работали оба канала – звука и циркулирующей нагрузки.

На мельнице выпускались три марки цемента:

```
A52,5pm с допуском для Dv(50) = 13,5 - 14,0 мкм (3600-3800 см<sup>2</sup>/г),
```

J42,5R с допуском для Dv(50) = 14,5 - 15,0 мкм (3500-3700 см²/г),

J32,5R с допуском для Dv(50) = 16,0 - 17,0 мкм (3400-3600 см²/г).

Зоной нечувствительности для главной обратной связи было принято для $Dv(50) \pm 0.2$ мкм. До таких значений рассогласования изменение подачи свежего питания и скорости вращения ротора сепаратора не производилось. За пределами этой зоны системой управления было предусмотрено:

- что улучшение помола с отклонением Dv(50) на 0,25 мкм приводило к увеличению свежего питания на 4%. Коэффициент пропорции для скорости ротора сепаратора составлял 1,7, то есть в этом случае производилось её уменьшение на 2,4%;
- что ухудшение помола с отклонением Dv(50) на + 0,25 мкм приводило к уменьшению свежего питания на 6,0%. Коэффициент пропорции для скорости ротора сепаратора составлял 3,0, то есть в этом случае проводилось её увеличение на 2,0%.
- для каждого конкретного, текущего отклонения Dv(50) большего, чем $\pm 0,2$ мкм автоматически определялись свои процентные текущие изменения

свежего питания и скорости ротора сепаратора с учетом приведенных выше коэффициентов пропорций.

таким образом, было предусмотрено, что отступать по свежему питанию система должна быстрее, чем наступать, а увеличивать скорость сепаратора несколько осторожнее, чем уменьшать.

Через пятнадцать минут после одновременного включения двух устройств ЭКОФОР на мельнице и сепараторе при выпуске цемента А52,5pm произошло частичное опустошение мельницы. В связи с этим канал звука мельницы выработал импульс повышения свежего питания, который скомпенсировал это опустошение, после чего свежее питание вернулось на прежний уровень. То есть воздействие устройства «ЭКОФОР» было воспринято системой как возмущающее и было ею отработано.

В состав структуры экспертной системы дополнительно для работы с включенными устройствами ЭКОФОР был введен блок управления разрежением на выходе мельницы. Оно первоначально было снижено на 18 %. Таким образом были использованы новые возможности мельницы содержать внутри её большее количество материала без ущерба для качества помола. Уставка циркулирующей нагрузки была увеличена на 17 т/час, а уставка допустимого, более глухого звука первой камеры, была снижена на 15%. В результате автоматического пересчета экспертная система повысила свежее питание мельницы на 10% и снизила скорость сепаратора на 5,8 %.

На рисунке 5.23. представлен для сравнения массив рабочих точек мельницы, которые автоматически фиксировались каждые пять минут её работы.

Из рисунка 5.23. видно, что достигнуто не только повышение уровня свежего питания мельницы, но и получено уменьшение разброса данных по тонине помола, что свидетельствует о более стабильной работе системы замкнутого цикла.

Впоследствии была проведена корректировка уровня сниженного разрежения на выходе мельницы для совпадения кривых интегрального и

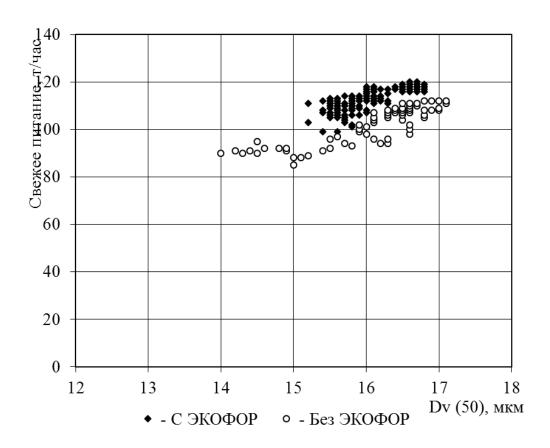


Рисунок 5.23. – Помол цемента A52,5pm на VICAT Montelieu, Франция

Таблица 5.3. – Распределение частиц по размерам для цемента А52,5рт

Размер ча- стиц, мкм	Распределение, %				
	Интегральное		Дифференциальное		
	Без ЭКОФОР	С ЭКОФОР	Без ЭКОФОР	С ЭКОФОР	
3,06	17,23	17,81	1,36	1,39	
5,76	24,43	25,15	1,58	1,60	
9,56	33,27	34,03	2,69	2,69	
15,87	47,64	48,28	4,18	4,14	
20,45	57,23	57,83	4,96	4,97	
29,91	73,02	73,77	5,17	5,25	
38,53	82,1	82,95	4,31	4,35	
49,64	89,1	89,88	3,21	3,16	
63,96	93,74	94,32	1,98	1,86	
82,4	96,62	96,97	1,28	1,17	
120,49	99,04	99,14	0,60	0,53	
176,2	100	100	0,17	0,15	

дифференциального распределения частиц по размерам до и после включения устройств ЭКОФОР. В таблице 5.3. представлены для сравнения данные по распределению частиц цемента по размерам. Видно, что имеющие место расхождения незначительны.

Проведенное испытание показало возможность работы устройств ЭКО-ФОР в условиях функционирования автоматической экспертной системы управления. Для повышения производительности мельницы при этом необходимо ввести в состав экспертной системы дополнительный канал управления разрежением на выходе мельницы, изменить уставки корректирующих каналов, допустив работу мельницы с большей циркулирующей нагрузкой и более глухим звуком первой камеры.

5.9. Шаровая мельница сырьевой муки

Заводы сухого способа производства цемента, построенные до внедрения вертикальных валковых сырьевых мельниц, оснащены шаровыми мельницами замкнутого цикла, производящими сырьевую муку для печей обжига клинкера. С течением времени прогресс в технологии обжига приводил к необходимости повысить объемы по выпуску сырьевой муки и производящие её шаровые мельницы иногда становились узким местом производства. В этом случае ставился вопрос о повышении их производительности не только с целью экономии энергии, а для того чтобы соответствовать запросам печи и увеличить выпуск цемента заводом в целом.

На рисунке 5.24. представлена схема помола с использованием шаровой мельницы с центральной выгрузкой. Исходное сырье — известняк, глина, железный огарок и кварцевый песок в жестких пропорциях поступают в камеру сушки мельницы вместе с горячими газами, отходящими от печи. Сырьевые шаровые мельницы сухого помола работают в замкнутом цикле с сепараторами аэродинамического или динамического типа.

Качество помола контролируется по остаткам на сите: 200 мкм (1-2%) и 72, 80, или 90 мкм (14-18%). Переизмельчение муки нецелесообразно, это

отрицательно влияет на работу печи. После помола мука поступает в силос, где происходит её гомогенизация — перемешивание её составляющих с помощью организованных воздушных потоков. Текучесть порошка при этом очень важна.

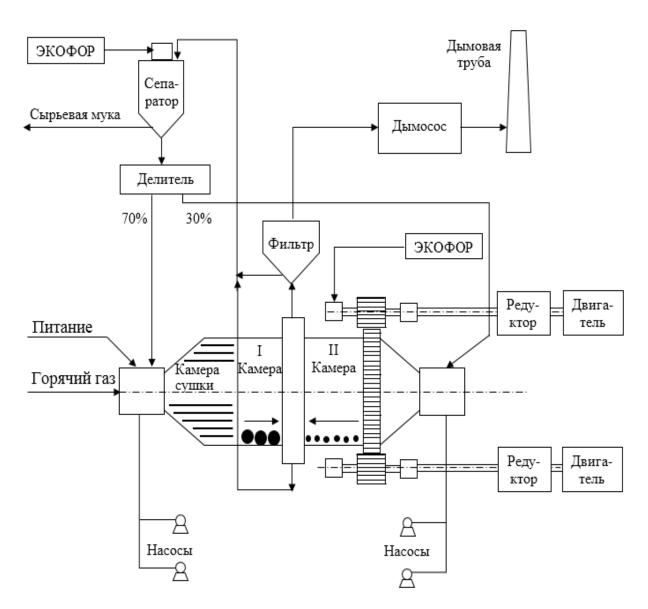


Рисунок 5.24. – Схема помола сырьевой муки на базе шаровой мельницы

Трудностью помола сырьевой муки является адгезия — налипание порошка на металлические поверхности мелющих тел и транспортных систем, которая снижает производительность мельниц.

В случае двухдвигательного привода мельницы устройство ЭКОФОР подключатся к рым-болту подшипника валопровода одной из ведущих ше-

стерен мельницы, как это показано на рисунке 5.24. Если мельница имеет периферийную выгрузку, то устройство подключается к верхней части цапфы выходного подшипника в соответствии с рисунком 4.3.

Второе устройство ЭКОФОР, как это показано на рисунке 5.25., подключается к металлическому кольцу исполнительного механизма поворотных лопаток в случае использования аэродинамического сепаратора или к редуктору вала распределительной тарелки (корзины) ротора динамического сепаратора, как это показано на рисунке 5.15.

При включении устройств в результате нейтрализации электростатической составляющей силы адгезии происходит очистка рабочих металлических поверхностей от налипшей на них оболочки, пропускная способность мельницы и сепаратора увеличивается.

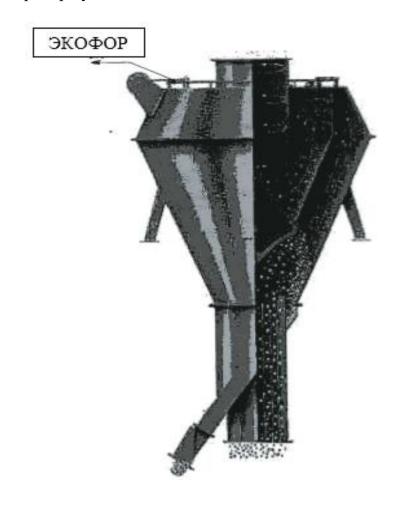


Рисунок 5.25. – Подключение устройства ЭКОФОР к аэродинамическому сепаратору

После получения данных о снижении остатка на сите необходимо ступенчато увеличивать подачу материала в мельницу и одновременно открывать выход готового материала из сепаратора путем изменения угла поворота направляющего аппарата или уменьшением скорости вращения ротора сепаратора.

Возврат из сепаратора на вход мельницы несколько увеличится и стабилизируется. Циркулирующая нагрузка и уровень материала в мельнице также увеличиваются на 10 – 30%, но без опасности её заработки.

В таблице 5.4. приведены сравнительные данные испытания шаровых мельниц сухого помола при подключении двух устройств ЭКОФОР.

Таблица 5.4. – Результаты испытаний устройства на шаровых сырьевых мельницах

Завод, стра-	Время	Производительность, т/час		Прирост про- изводительно- сти		Экономия энергии,
на		Без ЭКОФОР	С ЭКО- ФОР	т/час	%	кВт-час/т
Новоийский цементный завод, Узбекистан	10.1996	80	96	16	20	3,5
Ameriyah Cement, Египет	12.1996	180	194	14	7,8	1,3
Raysut Cement, Султамат Оман	02.1998	69,5	77,8	8,3	12	2,2
Titan Kamari, Греция	03.1999	226	238	12	5,3	0,7
Yambu Cement, Саудовская Аравия	02.2000	288	303	15	5,2	0,8

Как указывалось выше, необходимость увеличения выработки сырьевой муки возникает по запросам печи обжига клинкера, но иногда и при вводе нового завода. Так это было, например, при сдаче под ключ немецкой компанией КНD Humboldt Wedag AG цементного завода Yambu в Саудовской Аравии. Там две сырьевые мельницы не смогли показать требуемую по контракту производительность 300 т/час. Установка на каждой мельнице по два устройства ЭКОФОР позволила довести их производительность до требуемого уровня.

Экономия электроэнергии за счет снижения её удельного расхода на тонну сырьевой муки составила по данным таблицы 5.4, от 170 до 340 кВт-час за каждый час работы сырьевой мельницы.

Глава 6 ВАЛКОВЫЕ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛИ

6.1. Вертикальные валковые мельницы

Первая вертикальная валковая мельница была представлена на рынок её разработчиком немецкой фирмой Loesche GmbH в 1928 году [94]. Она предназначалась для помола угля. Понадобилось пятьдесят лет для продвижения этой конструкции в цементную промышленность. Это стало необходимым с расширением внедрения сухого способа производства цемента и обеспечением печей обжига клинкера производительностью 3000 тонн в сутки и более сырьевой мукой. К этому времени была решена проблема повышенного износа валков, усовершенствована конструкция мельницы с разработкой валковых модулей для 2-х, 3-х, 4-х и 6-ти валковых мельниц. С помощью всего лишь четырех различных конструкционных модулей было предусмотрено покрыть диапазон производительности от 80 т/час до 1000 т/час [95], изменяя при этом только количество валков. Перед каждым основным валком был установлен вспомогательный, задачей которого является подготовка постели материала перед его помолом под воздействием основного валка.

Была значительно повышена надежность мельницы, позволившая перейти к питанию печи от одной сырьевой мельницы вместо двух, использовавшихся ранее.

Аналогичное оборудование со своими отличиями выпускают фирмы: FLSmidth - Дания, Gebr. Pfeiffer AG – Германия, корпорация Krupp Polysius, Greate Wall Co – Китай.

Сызранский завод тяжелого машиностроения ОАО «Тяжмаш» выпускает вертикальные валковые среднеходовые мельницы МВС производительностью 5-125 т/час для размола до пылевидного состояния каменных углей, полуантрацитов, тощих углей и некоторых отходов обогащения в системах топливоприготовления на тепловых электростанциях.

Таким образом, в России имеется база для выпуска аналогичного оборудования и для цементной промышленности.

Вертикальная валковая мельница, выпускаемая фирмой Loesche для использования в производстве цемента, представлена на рисунке 6.1.

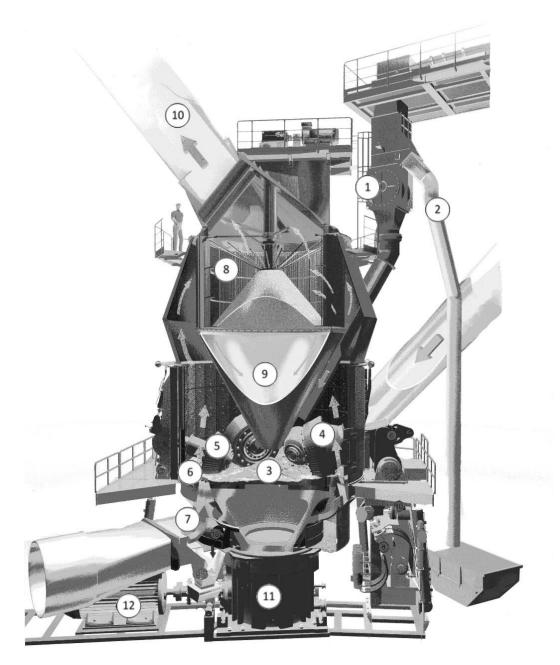


Рисунок 6.1. – Вертикальная валковая мельница Loesche

Исходный материал подается в мельницу через питатель 1 в центр вращающегося помольного стола 3. Перед питателем установлен магнитный сепаратор, который удаляет редкие металлические включения через отводящую трубу 2. Под действием центробежной силы материал перемещается по помольному столу и попадает под действие гидропневматических подпружиненных основных валков 4. Под ними происходит помол материала. Маленькие вспомогательные валки 5, которые располагаются перед основными, обеспечивают подготовку слоя измельчаемого материала путем его деаэрации и предварительного уплотнения. При накатывании валки поднимаются на слой материала, приходит в действие пневмогидравлическая система. Имеется ограничитель хода валков, предотвращающий металлический контакт помольного валка с помольным столом.

Измельчаемый основными валками материал при вращении помольного стола перемещается к внешнему краю помольного стола. Через жалюзийное кольцо 6, которое окаймляет помольный стол, подается горячий газ 7, который подхватывает перемолотый материал различной тонкости и транспортирует его к сепаратору 8. Скребки вычищают не подхваченную газом крупку из кольцевого канала и направляют её в систему транспортировки крупки. Сепаратор в зависимости от его настройки отсеивает грубо перемолотый материал, который через сборный конус 9 возвращается на помольный стол для повторного помола. Готовый продукт заданной тонины проходит через сепаратор и покидает мельницу с потоком газа 10. Желаемая температура на выходе из мельницы в пределах от 80°C до 130°C достигается уже в зоне помола.

Мельница приводится в действие с помощью планетарного редуктора 11 и электродвигателя 12. Упорный подшипник в верхней части редуктора принимает усилия валков.

Перед запуском мельницы её гидравлические валки поднимаются над помольным столом, тем самым обеспечивая пуск с минимальным пусковым моментом. Этим вертикальная мельница выгодно отличается от шаровой.

Подвергающиеся износу помольные элементы, а именно облицовка валков и сегментов помольного стола легко заменяется.

В девяностых годах прошлого века в связи со строительством современных цементных заводов в юго-восточной Азии рост производительности сы-

рьевых мельниц достигли 5000 и 10000 тонн в сутки. Такой стремительный рост, наряду с необходимостью масштабирования и решения вопросов износостойкости валков привел к тому, что встроенный в мельницу сепаратор оказался без достаточного внимания и в результате не оптимальным по конструкции. Материал увлекался газом с помольного стола и распределялся жалюзями по высоте ротора сепаратора неравномерно. Это уменьшало возможности разделения продукта и снижало потенциальные возможности мельницы.

Этот недостаток был устранен таиландской фирмой L.V.Тесhnology. Фирма производила на цементных заводах модернизацию жалюзийного аппарата сепаратора [96], обеспечившую равномерность распределения восходящего потока газа вместе с материалом по высоте ротора сепаратора. За счет неравномерности площади пропускного сечения жалюзей оказалось возможным на каждом уровне высоты ротора эффективно разделять продукт. Такое решение позволило повысить производительность мельниц на 13%, например, с 315 до 355 т/час, и снизить удельный расход электроэнергии на производство сырьевой муки на 3,0 кВт час/т сырьевой муки.

Первое испытание устройства ЭКОФОР на вертикальной валковой мельнице [97] проводились на заводе концерна Hanil Cement в Tanyang, Республика Корея. Вертикальная валковая мельница паспортной производительностью 350 т/час была снабжена экспертной системой управления, работающей без вмешательства оператора.

Подключение устройства ЭКОФОР было выполнено к верхней части корпуса планетарного редуктора со стороны противоположной приводу, как это показано на рисунке 6.2.

Автоматическое управление мельницей осуществлялось по сигналу дифференциального давления мельницы, характеризующим загруженность потока газа размолотым материалом. Уменьшение дифференциального давления свидетельствовало об освобождении мельницы от материала, и подача его в мельницу автоматически увеличивалась.



Рисунок 6.2. – Место подключения устройства к планетарному редуктору

На рисунке 6.3. представлен переходный процесс увеличения производительности мельницы, изменения дифференциального давления и нагрузки двигателя привода помольного стола на Hanil Cement [98].

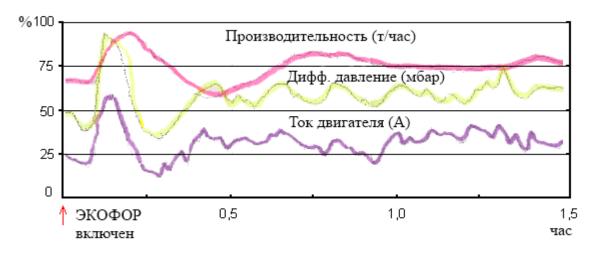


Рисунок 6.3. – Переходный процесс после включения устройства

Видно, что автоматическая система не предусматривала отработку такого сильного воздействия, какое оказало устройство, и оно вызвало повышенную, с низкой частотой колебательность, которая закончилась через 1 час по-

сле включения устройства на более высоком уровне производительности мельницы. Данные испытания представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1. – Результаты испытания на Hanil Cement

Время 08.2000	Производи- тельность, т/час	Остаток на си- те 88 мкм, %	Диффер. давление мбар	Удельный расход электроэнергии, кВт час/т			
00:00 13:00	337	18,1	933	17,05			
		ЭКОФОР включен в 13:00					
14:00	345	19,1	947				
15:00	346	18,5	973				
16:00	352	19,3	976				
17:00	361	20,5	975				
18:00	355	17,5	976				
14:00	Усредненное с ЭКОФОР						
18:00	352	19,0	969	16,45			

С помощью одного устройства производительность мельницы была увеличена на 15 т/час, экономия электроэнергии составила 210 кВт час за каждый час работы мельницы.

Таблица 6.2. – Результаты испытания устройства на заводе Hyundai Cement

		Остаток	Диффер.	Удельный
Время	Производи-	на сите	давление,	расход
05.2001	тельность,	88 мкм,	мбар	электроэнергии,
	т/час	%		кВт час/т
Без ЭКОФОР	394	19	1127	18,60
С ЭКОФОР	415	20,6	1139	17,77

Итоговые данные испытания на заводе Hyundai Cement Республика Корея на мельнице помола сырьевой муки представлены в таблице 6.2. Одно устройство повысило производительность мельницы на 21 т/час, а экономия электроэнергии составила 345 кВт час за каждый час работы.

Вертикальные валковые мельницы являются в настоящее время самым энергоэффективным оборудованием для помола сырьевой муки при сухом способе производства цемента. Они начали использоваться и для помола цемента и шлака. Устройство ЭКОФОР было апробировано на такой мельнице на заводе Hanil Cement в Tanyang, Республика Корея, таблица 6.3.

Таблица 6.3. – Результаты испытания при помоле цемента

Произво-		Качество помола		Скорость		Удельный
Время	дитель-			ротора	Вибра-	расход
10-11.2000	ность,	Удельная	R0045	сепара-	ция, мм	электро-
10-11.2000	т/час	поверхность	МКМ	тора,		энергии,
	1/440	cm^2/Γ	%	%		кВт час/т
		Усредненны	е без ЭН	КОФОР		
25.10 -	140,4		6,1	77	2,3	19,07
30.10.2000	140,4	3189		7 7	2,3	19,07
ЭКОФОР включен 31.10.2000						
01.11.2000	148	3153	4,8	76	2,1	18,46
02.11.2000	149	3153	5	75	2	18,2

Производительность мельницы повышена на 8 т/час, потребление электроэнергии за час работы мельницы уменьшилось на 110 кВт час.

Требуемая тонкость помола для сырьевой муки составляет 15-20% на сите 90 мкм, а для помола цемента это требование значительно выше, в пределах 1 – 6 % на сите 45 мкм. Первоначально задачей для такого типа мельниц являлось достижение удельной поверхностью при помоле цемента значения 3500 см²/г, а теперь 4500 см²/г. Но, очевидно, что это предел. Принципиально в вертикальных валковых мельницах исключен ударный механизм воздействия на измельчаемый материал, используются только механизмы раздавливания и истирания. Таким образом, отсутствует возможность механоактивации продукта с кратковременным на него термическим воздействием [99], что важно для прочности цемента. Кроме того, в связи с имеющим место в этих мельницах узким распределением частиц цемента по размерам, повышается его водопотребность и связанное с этим ухудшение удобоукла-

дываемости — текучести бетона. Получить же высококачественный цемент с удельной поверхностью более $5000~{\rm cm^2/r}$ пока возможно лишь в шаровых и вибрационных мельницах.

6.2. Системы помола с предварительным измельчением

Валковые дробилки высокого давления, которые также называют роллер–прессами, введены как новое оборудование для измельчения твердых материалов в 1984 году. К настоящему времени в мире их насчитывается в эксплуатации более шестисот, в основном производства Polysius [100], FLSmidth и KHD Humboldt Wedag. На рисунке 6.4, представлен в общем виде роллер–пресс немецкой фирмы KHD Humboldt Wedag [101].

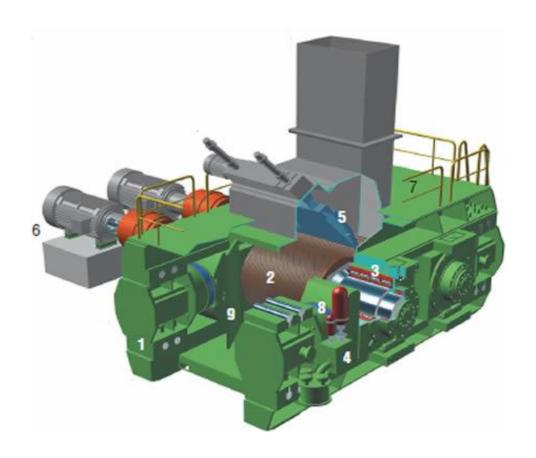


Рисунок 6.4. – Механизмы роллер-пресса, где

1 — рама роллер—пресса, 2 — роллеры, 3 — подшипники валков, 4 — гидравлическая система, 5 — устройство загрузки, 6 — электродвигатели с планетарными редукторами, 8 — главные гидравлические цилиндры

Использование роллер-прессов в качестве предварительных измельчителей значительно повышает производительность систем помола в целом, снижает удельный расход электроэнергии на выпуск тонны готовой продукции.

Фирмой KHD Humboldt Wedag была разработана и по ходу внедрения модернизирована серия роллер–прессов десяти типоразмеров с размалывающим усилием от 2 до 32 МН, производительностью от 50 до 1500 т/час, с суммарной мощностью двух электродвигателей от 280 до 6000 кВт.

В России на ОАО «Волгацеммаш» также освоен выпуск пресс–валковых измельчителей на 50 и 100 т/час.

Большую сложность в эксплуатации роллер—прессов представляла проблема снижения износа рабочей поверхности роллеров, связанная с высокой, концентрированной энергонапряженностью, хотя измельчение в слое материала принципиально и уменьшает износ рабочей поверхности. Удельное давление измельчения было ограничено на уровне 7,0 Н/мм² и разработана специальная футеровка рабочей поверхности роллеров, позволившая увеличить срок её службы до 20000 часов.

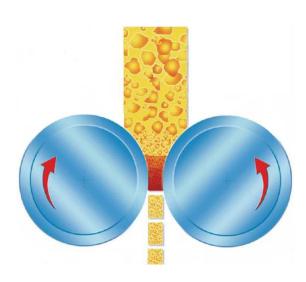


Рисунок 6.5. – Измельчение в роллер–прессе

В роллер-прессах измельчение осуществляется в слое материала под высоким давлением, которое главные гидравлические цилиндры прикладывают к подвижному роллеру в направлении сжатия слоя. Этот слой материала образуется между двумя роллерами с загрузкой их навалом и встречным вращением, как это показано на рисунке 6.5. Вследствие сужения пространства между роллерами материал подпрессовывается,

происходит предварительное дробление гранул. Частицы перераспределяются, происходит заполнение пространства между ними. При прессовании часть

границ между фазами разрушаются. Происходит измельчение с широким распределением размеров частиц по размерам и с большим количеством мелких частиц, уплотненных в пластинки, которые в дальнейшем достаточно легко распадаются. В ходе этого процесса в частицах образуются зародышевые микротрещины, способствующие дальнейшему помолу.

Расстояние между роллерами стабилизируют, а минимальное всегда ограничено, например, на уровне 20 мм, чтобы исключить металлическое взаимодействие роллеров. Материал в расходном бункере над роллерпрессом поддерживается на постоянном в узких границах уровне, чтобы стабилизировать давление столба материала на зону дробления, сильно влияющее на качество полупродукта.

Сначала роллер-прессы использовались для обеспечения предварительного измельчения по открытому циклу, то есть без сепарации – рисунок 6.6.а). Спрессованные пластинки материала после роллер-пресса подавались на дезагломератор и далее в шаровые мельницы замкнутого цикла. При этом достигалось снижение общего потребления электроэнергии на 20%. Первые роллер-прессы не были снабжены достаточно полной системой автоматизации, например, отсутствовала система стабилизации давления роллеров, имел место значительный неравномерный износ их рабочей поверхности.

Системы роллер-прессов первого поколения встретились нам при испытаниях устройств ЭКОФОР в Греции – Titan Kamari, в Испании – Lafarge Asland, в Южной Корее – Sungshin Cement. При испытании устройств на мельницах замкнутого цикла их свежее питание производилось полуфабрикатом после дробления исходного материала на роллер-прессах. Когда устройство улучшало показатели качества помола мельницы и требовалось увеличить её свежее питание, роллер-пресс, не оборудованный устройством ЭКОФОР, с увеличением своей производительности одновременно ухудшал гранулометрический состав дробленого материала. В итоге прирост производительности всей системы в целом оказывался меньше ожидаемого.

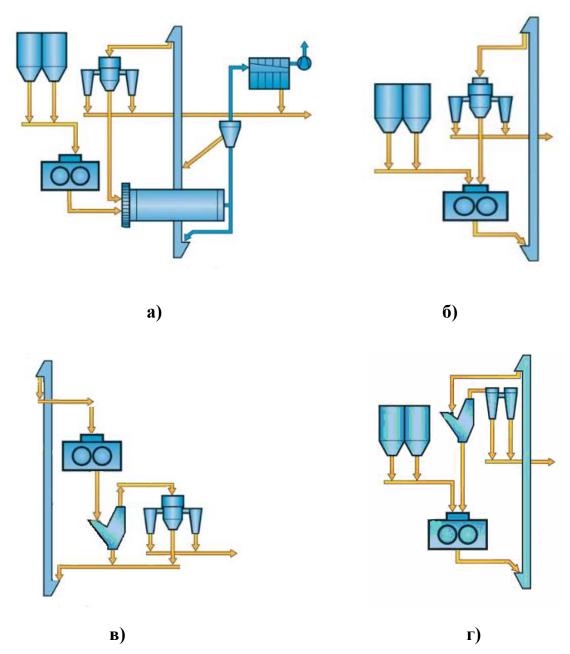


Рисунок 6.6. – Схемы использования роллер-прессов

Таким образом, выявилась необходимость интенсифицировать роллерпресс с использованием электронейтрализации. Тем более что в этой добротной конструкции имеется принципиально неустранимый недостаток, связанный с невозможностью использовать при дроблении широко используемые
за рубежом жидкие интенсификаторы. Измельчение в роллер-прессе идет в
весьма ограниченном энергонапряженном пространстве без перемешивания
материала, и равномерное распределение интенсификаторов в измельчаемом
материале невозможно. Это ограничивает возможности таких систем помо-

ла, поскольку процесс измельчения в одном элементе системы, шаровой мельнице, интенсифицируется, а в роллер–прессе нет.

С развитием возможностей роллер-прессов они были включены в состав замкнутых систем предварительного измельчения. Для этого используются достигшие высокой селективности динамические сепараторы – рисунок 6.6.б), на выходе которых в таких системах удельная поверхность тонких частиц дробленого материала составляет 1700 – 1900 см²/г. Оставшиеся после сепарации частицы материала возвращаются на повторное дробление. При этом эффективность дробления увеличивается, так как эти частицы заполняют пустоты между крупными гранулами исходного продукта материала и при сжатии улучшают измельчение в слое материала. Коэффициент циркуляции, то есть отношение суммы свежего питания и возврата к свежему питанию, составляет в таких системах более четырех. Такой значительный возврат аккумулируется на мощном ковшовом элеваторе.

Компания KHD Humboldt Wedag вместо динамического сепаратора стала использовать для роллер—прессов собственной разработки оригинальный статический V — сепаратор — рисунок 6.6.8), который не имеет вращающихся частей. Он получил очень широкое распространение из-за своей простоты и дешевизны.

Иногда используется двойная сепарация – рисунок 6.6.г). После V – сепаратора, обладающего недостаточной селективностью, устанавливают динамический, но уже с меньшей производительностью.

Если бы в роллер—прессах могли использовать жидкие интенсификаторы помола, то внедрение нашей технологии проходило бы сложнее, так же как на шаровых мельницах, нередко в условиях неразумного противодействия сторонников использования только жидких интенсификаторов помола. Но такова уж конструкция роллер—прессов, что даёт нам возможность работать на ней без альтернативы [102].

Устройство ЭКОФОР подключается к роллер—прессам в соответствии с рисунком 6.7. к фитингам подачи охлаждающей воды в роллеры.





Рисунок 6.7. – Подключение устройства ЭКОФОР (установлено справа от роллер–пресса на колонне) к системе охлаждения роллеров

Если роллеры не охлаждаются водой, то устройство следует подключить к корпусам планетарных редукторов, как это показано на рисунке 6.8.



Рисунок 6.8. – Запасной вариант подключения к роллер-прессу

В любом случае необходимо иметь электропроводящую связь, пусть даже со скользящим контактом точки подключения устройства с рабочими поверхностями роллеров.

Первое испытание устройства проводилось в 2000 году на роллерпрессе РОLYCOM на заводе Hanil Cement в Республике Корея [97]. Роллерпресса работают под «завалом», пропуская через себя столько материала,
сколько смогут. Однако, для стабилизации давления материала на зону прессования уровень материала в питающем роллер—пресс бункере поддерживается в достаточно жестких пределах. Зазор между роллерами при испытании
не изменяли, а их давление, упавшее после включения устройства, было восстановлено на прежнем уровне.

После подключения устройства и его включения начинается переходный процесс, который представлен на рисунке 6.9.

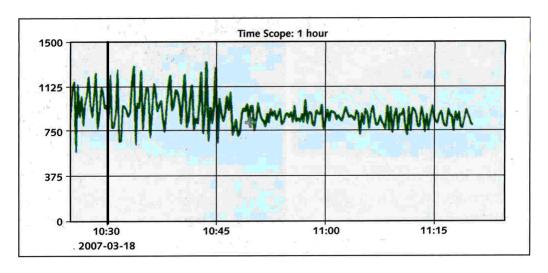


Рисунок 6.9. – Снижение мощности (кВт), потребляемой роллером при включении устройства ЭКОФОР

Это предпродажное испытание проводилось на роллер-прессе POLYCOM на заводе Sungshin Cement в Республике Корее. Устройство было включено в 10:30. Через пятнадцать минут мощность, потребляемая электродвигателем роллера, упала на 14%. Сказался результат действия устройства по улучшению размалываемости материала, связанного с исключением электростатической составляющей из состава сопротивления измельчению.

Значительно снизилась также и амплитуда колебаний мощности двигателя роллер–пресса, характерная для такого вида нагрузки. Это свидетельствует о принципиальном снижении риска вибрации роллеров.

После включения устройства наблюдается рост удельной поверхности отсепарированного полупродукта. Это улучшение после сепаратора роллерпресса первоначально составляет +200... 500, а иногда до +700 см²/г. С учетом транспортного запаздывания полупродукт улучшенного качества вызывает рост удельной поверхности цемента на выходе мельницы замкнутого цикла, тем самым побуждает повысить производительность помольной системы в целом. Типовая динамика переходного процесса при включении устройства на ролл-пресс представлена в таблице 6.4.

Таблица 6.4. – Динамика изменения параметров роллер-пресса при электронейтрализации на заводе Sungshin Cement, 10.2005

	Газ	С ЭКОФОР					
Параметр	Без ЭКОФОР	через 1	через 3	через 5	через 7	через 9	
	ЭКОФОІ	час	часа	часов	часов	часов	
Свежее питание, т/час	156	157	166	172	176	178	
Удельная поверхность полупродукта, см ² /г	1900	1946	1982	2033	2080	2020	
Скорость вращения ротора сепаратора роллер-пресса, %	67	70	65	63	63	63	
Давление роллер-пресса, бар	91/94	82/91	88/93	95/95	95/89	98/97	
Мощность роллер-пресса, кВт	606/662	582/632	664/719	664/712	713/789	685/773	
Удельная поверхность цемента, см ² /г	3280	3322	3508	3322	3183	3360	

Между системой предварительного измельчения с роллер—прессом и финишной мельницей устанавливается расходный бункер, положение уровня полупродукта в котором свидетельствует о балансе работы этих двух систем.

Если питание мельницы увеличивается, уровень полупродукта в расходном бункере понижается. Это заставляет вручную или автоматически повысить свежее питание роллер-пресса и несколько снизить скорость вращения ротора его сепаратора.

Улучшение работы системы помола связано не только с улучшением размалываемости материала, вызванным его электонейтрализацией, но и преобразованием структуры поверхности роллеров. Это подтверждается длительным последействием устройства, когда его переводят для испытания на другую систему помола. Оставшаяся без воздействия система продолжает работать на высоком уровне производительности в пределах недели.

Только первые испытания устройств на роллер-прессах предусматривали их отдельное от мельниц включение. Это делалось для выявления типовой реакции роллер-пресса на устройство. Три первые, представленные в таблице 6.5. системы использовали динамические сепараторы, а на заводе Wopfinger использовалась двойная сепарация с V и динамическим сепаратором по схеме рисунка 6.6. в).

Таблица 6.5. – Показатели интенсификации роллер—прессов путем электронейтрализации (Без ЭКОФОР / С ЭКОФОР)

	Производительность			Удельная поверхность, см ² /г		
Фирма, страна, год	т/час	Прир	ост	Попушропушта	Полтонто	
	1/4ac	т/час	%	Полупродукта	Цемента	
Hanil Cement,	195/	10 5,1		1150/	2985/	
Корея, 09.2000	205			1570	3130	
Sungshin Cement,	156/	22	1 / 1	1900/	3280/	
Корея, 10.2005	178	22 14,1		2080	3360	
Adana Cimento,	118/	10	0.5	1600/	3200/	
Турция, 01.2007	128	10 8,5		1780	3330	
Wopfinger,	104,5/	9,3	8,9	2090/	4190/	
Австрия, 01.2008	113,8	9,3	0,9	2790	4290	

В Австрии интенсификация системы помола проводилась совместно с французской фирмой CHRYSO, крупным производителем и промоутером

жидких интенсификаторов помола. Нашей зоной ответственности была система предварительного измельчения с роллер—прессом, а CHRYSO — финишная мельница. Прирост производительности роллер—пресса за счет электронейтрализации составил более 9 т/час.

Самым отзывчивым на подключение устройства оказался за все испытания, как отдельных роллер—прессов так и комбинированных систем, роллер—пресс Sungshin Cement с приростом производительности + 22 т/час.

Удельный расход электроэнергии на помол цемента в таких системах составлял 20,0 – 25,0 кВт час/т цемента. За счет подключения одного устройства ЭКОФОР к роллер–прессу снижение удельного расхода электроэнергии составило 2 кВт час/т цемента или, например, 350 кВт час за один час работы системы помола на Sungshin Cement и 250 кВт час за один час работы на Adana Cimento. Экономические преимущества от применения устройств учитывали только экономию электроэнергии и не учитывали экономию на издержках на ремонт и техническое обслуживание, связанное с сокращением рабочего времени системы помола на выпуск того же, что и раньше количества цемента. Хотя это обычно делается для расчета эффекта применения жидких интенсификаторов помола [103].

Схема по рисунку 6.6. а), когда роллер–пресс производил полупродукт без сепарации, встретилась в Канаде на Ciment Quibec в апреле 2002. Три старые мельницы суммарной производительностью 89 т/час, при использовании устройства ЭКОФОР только на роллер–прессе, повысили производительность на 8%.

В комбинированных системах помола на предварительное измельчение приходится значительная часть общей работы. Так, например, на Sungshin Cement из общих 3500 кВт, используемой на двухстадийный помол, доля мощности на измельчение в роллер-прессе составляет 43%. Из представленного на рисунке 6.10. распределения частиц по размерам после сепаратора роллер-пресса видно, что это действительно уже полупродукт с содержанием большой доли готового цемента.

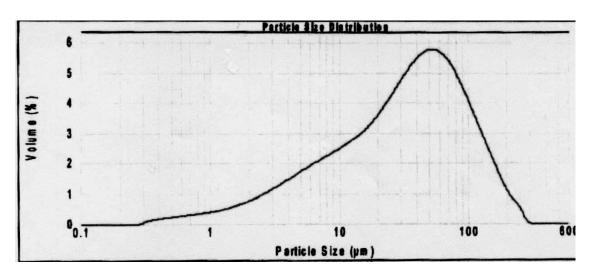


Рисунок 6.10. — Распределение частиц по размерам после предварительного измельчения в роллер- прессе и сепарации полупродукта

Это становится ещё более очевидным, если сравнить полученное распределение с распределением частиц готового цемента на рисунке 6.11.

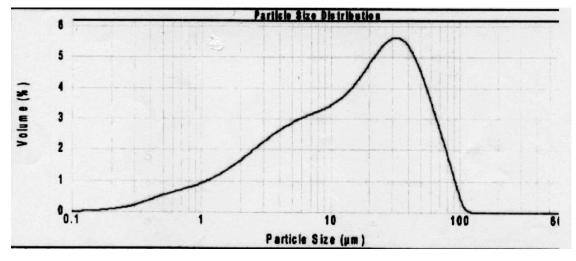


Рисунок 6.11. – Распределение частиц цемента по размерам

Динамика интенсификации помола при включении второго устройства ЭКОФОР, кроме роллер-пресса ещё и на мельницу, приведена в таблице 6.6.

Использование второго устройства, подключенного к мельнице, позволило дополнительно увеличить её производительность на 13 т/час, а всего с учетом данных таблицы 6.6. на 35 т/час. Общее удельное потребление элек-

троэнергии в целом было снижено на 4,5 кВт час/т цемента. Это означало экономию 1850 кВт час за каждый час работы системы помола.

Таблица 6.6. – Интенсификация помола на Sungshin Cement

		С ЭКОФОР					
Параметр	Без ЭКОФОР	С ЭКО- ФОР на РП	С ЭКОФОР на РП и мельни				
		Через 9 часов	Через 11 ча- сов	Через 13 ча- сов	Через 14 ча- сов	Через 15 ча- сов	
Производительность, т/час	156	178	178	179	185	191	
Удельная поверх- ность по полупро- дукта, см ² /г	1900	2020	1990	2161	2119	2076	
Скорость вращения ротора сепаратора роллер-пресса, %	67	63	63	63	63	61	
Скорость вращения ротора сепаратора мельницы, об/мин	148	145	145	145	142	140	
Разрежение на выходе мельницы, мбар	16,9	17,6	17,4	17	17,3	14,6	
Удельная поверхность цемента, см ² /г	3280	3360	3430	3534	3256	3349	

В январе 2009 года на заводе Adana Cimento в Турции два устройства были включены на аналогичном оборудовании производства FLSmidth. Схема помола представлена на рисунке 6.12. В схеме использовался оригинальный сдвоенный сепаратор, принимающий в общий воздушный поток последовательно продукты помола после роллер-пресса и мельницы. Таким образом, частицы допустимого для цемента размера после роллер-пресса в мельницу не попадали и не загружали её бесполезной работой.

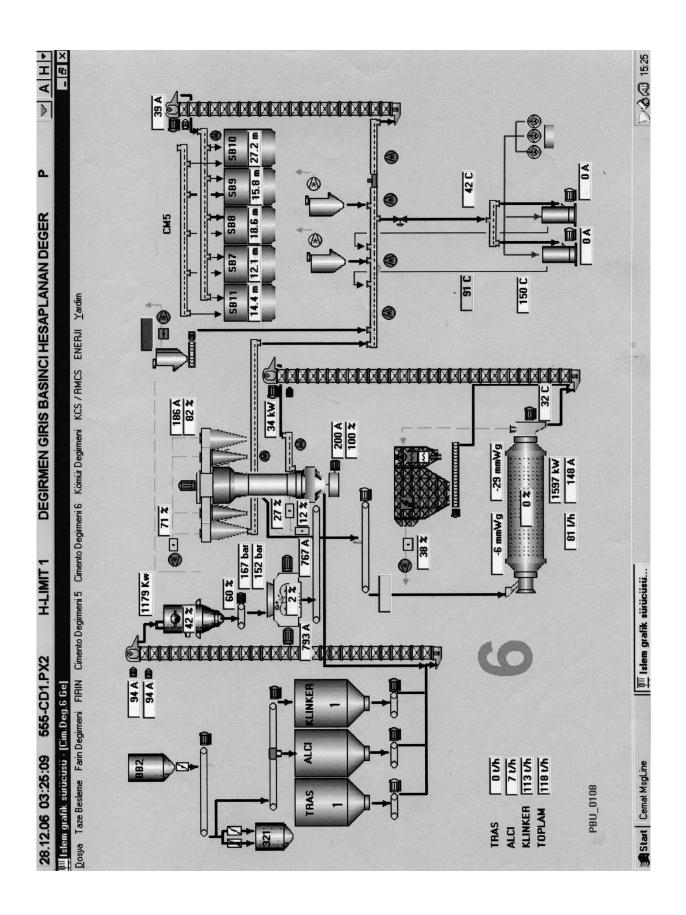


Рисунок 6.12. – Схема комбинированной системы помола на Adana Cimento, Турция

Общий прирост производительности системы помола составил 18 т/час или 15%. Скорость вращения ротора сепаратора мельницы была снижена на 8%. Снижение удельного расхода электроэнергии составило 3 кВт час/ т цемента или 400 кВт час за каждый час работы помольной системы. Динамика улучшения показателей представлена в таблице 6.7.

Таблица 6.7. – Интенсификация помола на Adana Cimento, Турция

		С ЭКОФОР				
Параметр	Без ЭКОФОР	На рол- лер- прессе	На роллер-прессе и мельнице			
		Через 4 часа	Через 11 часов	Через 15 часов	Через 19 часов	
Производительность, т/час	118	128	128	134	136	
Удельная поверх-						
ность полупродукта, cm^2/Γ	1600	1750	1790	1760	1730	
Скорость вращения ротора сепаратора роллер-пресса, %	97	100	99,5	100	100	
Скорость вращения ротора сепаратора мельницы, %	87	85	83	82	80	
Разрежение на выходе мельницы, мбар	35	27	30	23	25	
Удельная поверхность цемента, см ² /г	3200	3280	3260	3330	3200	

После отработки методики интенсификации отдельно роллер-прессов при включенном устройстве ЭКОФОР при всех дальнейших работах по интенсификации комбинированных систем помола устройства включались одновременно на роллер-прессе и мельнице.

Так на заводе Akcimento в Canakkale, Турция дополнительные 14 т/час, как это показано в таблице 6.8., были достигнуты уже через три часа после

включения двух устройств на роллер— пресс и мельницу. Снижение удельного расхода электроэнергии составило 3,0 кВт час/т цемента или 540 кВт час за каждый час работы мельницы.

Все работы на комбинированных системах помола проводились на фоне использования в мельницах жидких интенсификаторов помола.

Таблица 6.8. – Интенсификация помола на Akcimento Canakkale, Турция

Параметр	Без ЭКО- ФОР	С ЭКОФОР на роллер-прессе и мельнице			
		Через 1	Через 2	Через 3	
		час	часа	часа	
Производительность, т/час	165	171	174	179	
Скорость вращения ротора сепаратора роллер-пресса, %	62	62	58	57	
Скорость вращения ротора сепаратора мельницы, об/мин	619	591	589	589	
Разрежение на выходе мельницы, мбар	90	84	85	81	
Удельная поверхность цемента, см ² /г	3450	3470	3400	3450	

Необходимо отметить, что комбинированные системы помола являются наиболее энергоэффективными среди существующих в настоящее время систем тонкого помола.

6.3. Валковая мельница Horomill

Разработчики принципиально новой мельницы для производства цемента [104, 105] — французская компания Fives FCB совместно с Buzzi Cementi Италия зарегистрировали ее под торговой маркой Horomill ®. Она не похожа

ни на одну традиционную мельницу. Её вращающийся барабан не содержит внутри мелющих шаров, а измельчение слоя материала производится на внутренней поверхности барабана с помощью роллера. Реализованная идея была в том, чтобы заменить одноразовое сдавливание с очень большим давлением, как у роллер-пресса, на несколько сдавливаний с меньшим усилием, но с промежуточными разгрузками давления и перемешиванием материала. Первая мельница производительностью 25 т/час появилась в 1993 году. К 1998 году разработан ряд мельниц на 40 – 225 т/час, к 1999 году на заводах были внедрены уже 20 мельниц, в настоящее время их более шестидесяти.

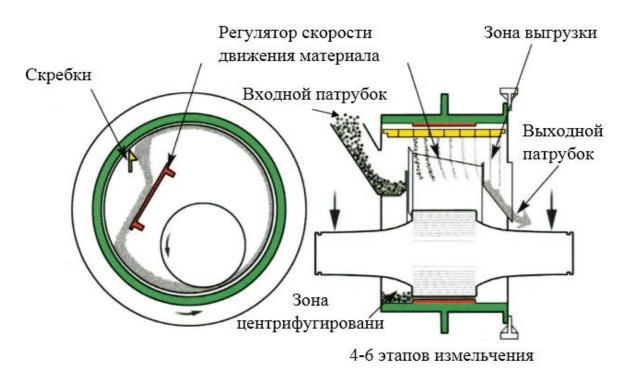


Рисунок 6.13. – Схема движения материала в мельнице

Барабан мельницы, схематически представленной на рисунке 6.13., опирается на гидродинамические подшипники скольжения и приводится во вращение через размещенную на нём венцовую шестерню от редуктора с электродвигателем. Материал поступает во входной патрубок мельницы и центрифугируется на внутренней поверхности барабана. Горизонтальный, нагруженный гидросистемой роллер получает вращение от надвигающегося на него слоя материала, который в результате этого подвергается раздавли-

ванию. Материал продвигается вдоль мельницы по винтовой траектории, с каждым оборотом после деформации срезается скребками, в перемешанном виде попадает на наклонную плиту, выполняющую функцию регулятора скорости движения материала. Эта плита направляет поток материала по ходу его движения на следующий этап измельчения. Таких этапов в мельнице может быть от четырех до шести, каждый с давлением 40-100 МПа. После этого измельченный материал попадает в выходной патрубок и элеватором подается на сепаратор. Дезагломерация измельченного материала при этом не требуется. Недомолотый продукт возвращается из сепаратора на повторный помол. Циркулирующая нагрузка мельницы очень мала, также как и время измельчения материала, что облегчает работу системы автоматизации благодаря быстрой реакции на управляющее воздействие.

Бронефутеровка барабана выполнена из высокохромистых чугунных плит, скребки из карбида вольфрама, а роллер имеет бандаж из карбида титана. Высокий уровень автоматизации мельницы исключал переполнение мельницы материалом, представляющую опасность по особенностям её конструкции. Главным преимуществом мельниц является их низкий удельный расход электроэнергии, о чем свидетельствуют показатели таблицы 6.9.

Таблица 6.9. – Производственные показатели мельниц Horomill

Типорозмор	Мощность	Выпускаемая продукция, т/час				
Типоразмер HOROMILL	двигателя,	CEM II/A	CEM I	Сырьевая		
HOROMILL	кВт	$3800 \text{ cm}^2/\Gamma$	$4000~\mathrm{cm}^2/\Gamma$	мука		
3800	2100	110	70	270		
4200	2700	140	90	350		

Также как в вертикальных валковых мельницах в мельнице Horomill отсутствует ударное воздействие на измельчаемый материал, используются только механизмы раздавливания и истирания, в результате чего снижена вероятность механоактивации с её преимуществами для повышения прочности цемента. Затруднено также достижение удельных поверхностей более 4500 см²/г. Вцелом внедрение этого нового помольного оборудования идет очень непросто [106].

Устройство ЭКОФОР использовалось при совместном исследовании по повышению удельной поверхности с французскими специалистами технического центра Fives FCB.

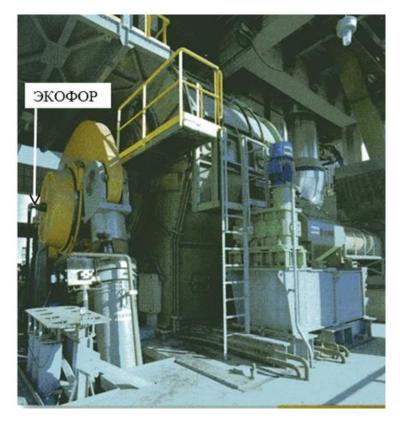


Рисунок 6.14. – Мельница Horomill

Испытание проводились в августе 2003 года на мельнице Horomill завода французской компании Vicat в городе Konya, Турция, представленной на рисунке 6.14. Вклад ЭКОФОР в повышение удельной поверхности составил при этом 150 см²/г. Устройство подключалось к фитингу подачи охлаждающей воды в роллер, как это показано на рисунке 6.7.

Таким образом совместными мероприятиями специалистов Fives FCB и компании ЭКОФОР удалось доказать возможность выпуска на мельнице Ноготіll цемента с повышенной удельной поверхностью.

Глава 7

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ПОМОЛА И АКТИВНОГО НЕЙТРАЛИЗАТОРА

Демонстрация работы устройства ЭКОФОР преимущественно проходила на фоне использования жидких интенсификаторов помола. За рубежом это происходило чаще, чем в России.

В практике отечественных цементников устоялось название ПАВ для таких реагентов, хотя для интенсификации помола это наименование следует уточнить. С этой целью могут быть использованы только анионоактивные ПАВ. За рубежом интенсификаторы помола называют помощниками помола (grinding aids).

Они широко и уже много лет используются при помоле цемента и производятся нескольким компаниями, из которых наиболее известны американская фирма «GRACE» с расширенной сетью филиалов по всему миру, французская «CHRYSO» [107], итальянская «MAPEI» [108] и немецкая «SIKA» [109].

В Советском Союзе интесификаторы помола отечественного производства использовались в производстве цемента [110, 111], но в переходной период произошел спад в их потреблении. В настоящее время в России вновь имеется подъём в использовании этой известной технологии. Российскими компаниями производятся интенсификаторы помола INCEM [112], и ПОЛИ-ПЛАСТ [113]. В Украине разработаны и используются полифункциональные интенсификаторы помола [114] на базе раствора мелассы. В России открыты также представительства фирм «GRACE» и «SIKA», которые активно демонстрируют и продвигают свою продукцию. Таким образом, наметилась конкуренция в использовании этих средств, чего не заметно за рубежом. Российские цементные заводы в таких условиях тщательно выбирают интенсификатор для своих цементных мельниц. Все эти средства рентабельны, хотя не

дешевы и в силу своего расходного характера требуют постоянных затрат на их приобретение.

Для помола цемента в виде интенсификаторов используются, как уже указывалось, анионоактивные ПАВ, например, триэтаноламин. Он диссоциирует в водном растворе с образованием анионов с длинными углеводородными цепями. Именно анионоактивностью определяется адсорбционный механизм действия таких интенсификаторов по отношению к электрическим зарядам положительной полярности, образующимся при помоле. Антистатические свойства интенсификатора были подтверждены отсутствием [44] положительной заряженности свежего цемента на выходе из мельницы, который без использования интенсификатора имел высокий положительный потенциал. В последнее время в качестве интенсификаторов помола начинают использовать электролиты.

Устройство ЭКОФОР является аппаратным, однажды на срок в десять лет закупаемым средством, которое также как антистатическое, расходное средство — интенсификатор помола, уменьшает свободную поверхностную энергию, проявляющуюся при помоле в том числе в виде электризации измельчаемого материала. При работе устройства на фоне используемых интенсификаторов помола оно обеспечивает дополнительный прирост производительности мельницы на 8 — 12%. На последних её метрах, где активно происходит образование новых поверхностей, жидкий интенсификатор помола не успевает адсорбироваться на вновь образованных поверхностях частицах [8] и эффективность его в этой зоне падает. Зона же действия устройства ЭКОФОР приходится как раз на последние 5-7 метров шаровой мельницы и в этом случае усилия по интенсификации помола этих двух средств складываются.

Разработчики устройства ЭКОФОР никогда не проявляли инициативу по исключению использования интенсификаторов помола. Однако, из 180 имевших место испытаний, это имело место в 9 случаях по просьбе заказчиков. Полученные при этом результаты представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1. – Снижение расхода интенсификатора (инт.) при помоле цемента с использованием устройства ЭКОФОР.

				Без ЭКОФОР		ЭКОФОР
Год Страна	Завод	Инт.	Питание т/ч	Инт. %	Питание т/ч	
1998	Султанат Оман	Raysut Cement	100	54,5	0	55,5
1998	США	Holnam Rio-Grande	100	42,5	60	53,9
1998	Дания	Aalborg Portland Cement	100	107,4	50	107,8
1998	Испания	Lafarge Asland	100	63	0	61
1999	Велико- британия	Rugby Barrington Works	100	45	0	45
2000	Республи- ка Корея	Hanil Cement	100	194,7	30	195,2
2001	Австрия	Lafarge Retznei Werk	100	39	0	39
	Da a	C a -1- :	100	156	100	191
2005	Республика	Sungshin Cement	100	150	50	179
	Корея	Cement	100	156	0	153
2008	Казахстан	SAS Tobe Technologis	100	25	0	25

Первый раз, когда нам предложили снять интенсификатор помола, было на Raysut Cement в Султанате Оман. Повышение производительности мельницы после включения устройства ЭКОФОР ограничил находящийся на пределе весовой дозатор гипса. Для продолжения испытаний заводскими технологами было принято решение о снижении подачи интенсификатора. Это было сделано медленно, шагами по 25% в час до полного снятия. Мельница при этом не снизила производительность. Устройство ЭКОФОР в данном случае оказалось полностью эквивалентно применяемому интенсификатору помола.

В 1998-1999 годах такие результаты были получены пять раз. При публикации статьи [115] о технологии активной нейтрализации редактор журнала "European Cement Magazine" изменил её первоначальное название, придав ему обидный для производителей интенсификаторов смысл. Это усложнило нашу работу.

Анализ проведенных испытаний, в частности на Raysut Cement, Lafarge Asland, Rugby Barrington Works, Lafarge Retznei Werk и SAS Tobe Technologis показывает, что при производительностях мельниц менее 50-60 т/час можно исключить использование жидких интенсификаторов. Выгоднее использовать только аппаратное, окупаемое не более чем за три месяца, устройство, сохранив такую же, как при помоле с интенсификатором эффективность и качество помола. Тем не менее, на российских цементных заводах, где мельницы в основном имеют среднюю производительность 45 т/ч, полным ходом идет продвижение жидких интенсификаторов помола. Но даже в этом случае использование устройства ЭКОФОР дополнительно может увеличить производительность на 8-12 %.

Особое внимание к вопросу снижения потребления интенсификаторов помола проявили на цементных заводах Республики Корея. Так на заводе Hanil Cement устройство ЭКОФОР, подключенное к роллер-прессу, при сохранении мельницей производительности 195 т/ч и нормативном качестве помола дало возможность снизить потребление интенсификатора помола на 70%, что соответствует годовой экономии средств на их приобретение равной 245000 долларов США. Если же не снижать потребление интенсификатора, то полученные за счет экономии электроэнергии при помоле с активной нейтрализацией 10 т/ч прироста производительности мельницы давали расчетную экономию 75000 долларов США.

На заводе Sungshin Cement были использованы два устройства ЭКОФОР – одно для роллер-пресса, а второе для мельницы. При полном снятии интенсификатора помола производительность этой комбинированной системы помола снизилась на 3 т/ч до 153 т/ч. При этом экономия средств на приобрете-

ние интенсификатора составила 275000 долларов США в год. А экономия электроэнергии за счет производства дополнительно 35 т/ч цемента без роста потребления энергии при совместном использовании интенсификатора помола и двух устройств ЭКОФОР составила 262000 долларов США в год. Вариант экономии всегда выбирает потребитель.

Практика показала, что для мельниц производительностью более 50-60 т/час вплоть до 320 т/час целесообразно дополнительно к применению интенсификатора помола использовать также и устройство ЭКОФОР, обеспечивая таким образом дополнительный прирост производительности мельницы. Также как при использовании интенсификаторов помола, цемент, произведенный при воздействии активного нейтрализатора, имеет несколько повышенные прочностные характеристики. Так по данным ОАО «Красносельскстройматериалы» прочность цементов в возрасте 28 суток на изгиб увеличилась с применением устройства на 5,7-10,0%, а на сжатие на 5,2-6.2%.

В результате нейтрализации дислокаций «дебри-слоя» и полигонизации приповерхностного слоя мелющих тел происходит снижение их износа. По данным киприотской компании "Vassiliko Cement Works", которая двенадцать лет использовала пять устройств ЭКОФОР на трех своих помольных системах, износ мелющих тел марки "HARDALLOY" снизился с 25 - 40 г/т до 9 - 13 г/т.

Испытания на заводе Aalborg Portland Cement, проведенные по предложению FLSmidth, результаты которых приведены на рисунке 7.1., дали возможность сделать достаточно важные для совместной работы интенсификаторов помола и устройства ЭКОФОР выводы.

Испытания проводились на системе открытого цикла, но состоящей из двух мельниц, включенных последовательно, тандемом. Во второй мельнице мелющими телами был миницильпебс диаметром 8 мм. При предварительном согласовании испытания была получена информация о его проведении на мельнице открытого цикла помола, для которой всегда требовалось только одно устройство, которое и было привезено для испытания. Но реально это

оказался тандем из двух мельниц открытого цикла помола. Пришлось включать устройство на мельницы по очереди, использую эффект его последействия. С интервалом в 24 часа оно подключалось на корпуса выходных подшипников то первой мельницы, то второй. Производительность мельниц во время испытания поддерживалась на уровне 150 т/ч. Результаты испытания представлены на рисунке 7.1.

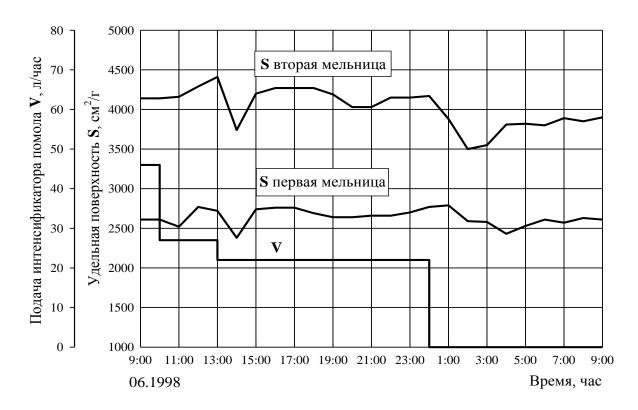


Рисунок 7.1. – Изменения удельной поверхности материала на выходе первой и второй мельниц на фоне интенсификации помола

В 10:00 мельница, которая уже двое суток работала с постоянным расходом интенсификатора 46 л/ч и под воздействием устройства ЭКОФОР, была переведена на работу с расходом интенсификатора 27 л/ч. После этого удельная поверхность на выходе первой мельницы только сначала немного упала, а затем увеличилась на 200 см²/г. Это свидетельствовало о том, что работа интенсификатора помола с расходом 46 л/ч на фоне работы аппаратного интенсификатора была избыточна. Расход интенсификатора помола при

этом может быть снижен. В общем случае, при увеличении производительности мельницы после включения активного нейтрализатора пропорциональное увеличение подачи интенсификатора не требуется.

В 13:00 подача интенсификатора была уменьшена до 22 л/ч. Мельницы почувствовали это изменение. Через час после этого удельные поверхности на выходе обоих мельниц снизились, но ещё через час восстановились и вышли на уровень качества, соответствующего подаче интенсификатора 46 л/ч. Это свидетельствовало о том, что устройство ЭКОФОР в условиях данной мельницы эквивалентено подаче 24 л/час интенсификатора и может исключить затраты на его приобретение, равные 120000 евро в год.

При полном снятии интенсификатора удельная поверхность на выходе второй мельницы снизилась на 240 см²/г, что соответствует 10% потери про-изводительности и свидетельствует о том, что полное исключение интенсификатора для такой производительности делать не следует.

На выходе первой мельницы удельная поверхность в установившемся режиме показала отсутствие зависимости от уровня подачи интенсификатора. То есть интенсификатор помола, подаваемый на вход первой мельницы, действовал только во второй. Это означает, что для обычной шаровой мельницы он только распределяется в первой её камере, а активно работает во второй.

Работа на мельнице с устройством ЭКОФОР имеет несколько особенностей по сравнению с интенсификаторами помола [18]:

— медленная, продолжительностью иногда в несколько часов, реакция мельницы на включение устройства по сравнению с применением интенсификаторов помола связана с необходимостью постепенной аннигиляции дислокаций "дебри-слоя" мелющих тел и его полигонизации. Их рабочая поверхность со временем становится более гладкой, приобретает большую твердость. Переходный процесс после включения устройства вплоть до полной или частичной очистки рабочей поверхности происходит в течение 3-7 дней. При этом появляется дополнительный источник экономии средств за счет снижения износа мелющих тел в 2 - 3 раза;

- необычное для интенсификаторов помола последействие устройства ЭКОФОР связано с продолжительным износом бездефектного, упорядоченного слоя поверхности мелющих тел в случае пробного отключения устройства. Последействие устройства составляет от двух дней для систем замкнутого цикла и до трех недель для открытого цикла. Эта разница связана с тем, что эффект последействия для сепаратора не столь велик, как для мельницы. Эффективность устройства нельзя проверять кратковременным отключением;
- результат работы интенсификаторов помола проявляется уже через первый час после включения. Этот способ интенсификации предусматривает непосредственное воздействие на измельчаемый материал в его объеме. Устройство ЭКОФОР преобразует процессы, протекающие на границе измельчаемого материала и приповерхностного слоя мелющих тел, и обеспечивает постепенное воздействие на обе взаимодействующие фазы. По динамике действия они не идентичны, поскольку являются принципиально отличающимися способами интенсификации помола, которые, тем не менее, могут успешно дополнять друг друга.

Глава 8

ВИБРАЦИОННЫЕ МЕЛЬНИЦЫ

8.1. Конструкция вибрационной мельницы

Вибрационные мельницы используются для тонкого помола. В них основными механизмами воздействия на измельчаемый материал является удар и раскалывание. Ускорение мелющих тел при этом в десять раз превышает ускорение силы тяжести, принципиально возможное в традиционных шаровых мельницах. В результате этого измельчаемые частицы приобретают в основном осколочную форму, вследствие чего повышается активность продукта. Такие мельницы используются для домола цемента, измельчения известково-песчаных смесей, золы-уноса, руд, керамической шихты. На базе мельниц такого типа может быть реализована концепция цементного завода будущего [106], при которой помольные установки, измельчающие покупной клинкер, будут работать непосредственно у строителей. В этом случае может быть реализована гибкая система производства марок цемента, а стадия хранения измельченного продукта с потерей им активности будет исключена.

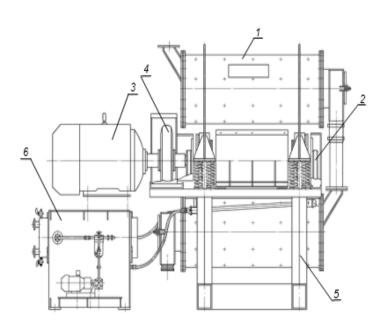


Рисунок 8.1. – Мельница СВМ-160, где

^{1 -}блок помольных камер, 2 – вибратор, 3 – двигатель, 4 – муфта,

^{5 –} рама мельницы, 6 – станция смазки.

ООО «Опытный завод со специальным бюро» выпускает вибрационные мельницы непрерывного действия СВМ-160 и СВМ-320 с производительностью по кварцевому песку 2,6 и 5,2 т/час соответственно. На рисунке 8.1, приведен общий вид мельницы СВМ-160.

Мельница состоит из двух цилиндрических горизонтальных камер, расположенных одна под другой и объединенных траверсами с дебалансным вибратором. При вращении вала этого вибровозбудителя камеры приводятся в поступательное движение по траектории, близкой к круговой. Движение от стенок камеры передается мелющим телам, в зонах контакта между телами происходит измельчение частиц материала. Частота колебаний составляет 16,5 Гц. Устройство ЭКОФОР подключается к корпусу верхней камеры мельницы.

Ниже представлены результаты исследований по интенсификации вибрационных мельниц нескольких конструкций с использованием технологии электронейтрализации.

8.2. Помол химически осажденного мела

В течение 2000 года были проведены многочисленные опыты по тонкому измельчению химически осажденного мела, применяемого в качестве наполнителя при производстве красок. Использовалась модельная, вибрационная мельница БГМ-5/5 с объемом 3 дм³, периодического действия. Гранулометрический состав измельченных порошков определялся на анализаторе «МОПВидеоплан» производства ФРГ.

Опыты показали, что без специальных приемов измельчить мел тоньше 30 мкм (при продолжительности измельчения 30 мин) не удается. При более длительном помоле происходит агрегирование частиц, налипание материала на шары, и измельчение практически прекращается.

После подключения устройства ЭКОФОР шары и барабан очистились от налипшего материала, и мел начал измельчаться до 10-15 мкм. Дальнейшее

измельчение происходило только с добавкой интенсификатора помола, который совместно с устройством ЭКОФОР сдвигали начало агрегирования частиц, обладающих развитой, механически активированной поверхностью.

Из таблицы 8.1. и 8.2. видно, что при одинаковых режимах измельчения (опыты 1 и 3) крупность продукта составили менее 14 мкм по 5% остатку в опыте 1 и менее 7 мкм в опыте 3, который был проведен с подключением устройства ЭКОФОР. Эффективность измельчения с устройством существенно возрасла. Результаты дифференциальных и интегральных распределений частиц продукта приведены в таблицах 8.1. и 8.2.

Таблица 8.1. – Результаты помола мела без ЭКОФОР

	Direct	т (0/-) тепоо	оор ппа	проб Мо	
Классы крупности,	Выход	<u>1 (70) KJIAC</u> 1	сов для проб №		
МКМ		1		2	
	Дифф.	Интегр.	Дифф.	Интегр.	
-20 +16	2,2	100			
-16 +14	1,88	97,8			
-14 + 12	4,04	95,92			
-12 +10	2,26	91,88	1,78	100	
-10 +9	1,94	89,63	1,64	98,22	
-9 +8	2,61	87,69	3,65	96,58	
-8 +7	2,3	85,08	3,22	92,93	
-7 +6	6,65	82,78	2,79	89,71	
-6 +5	11,82	76,13	1,57	86,92	
-5 +4	7,37	64,31	3,22	85,35	
-4 +3	8,24	56,94	11,51	82,13	
-3 +2	13,3	48,7	21,8	70,62	
-2 +1	24,4	35,4	31,9	48,82	
-1 +0	11	11	17,73	17,73	
Итого:	100		100		
Удельная					
поверхность,	12	330	13	520	
cm^2/Γ					
Время					
измельчения,	60		(50	
МИН					
Добавка	1	0	1		
инт., %	J	.,0		.,4	

В опыте 2 добавка интенсификатора составила 1,4%, и был получен продукт крупностью мельче 9 мкм, а в опыте 3 с устройством ЭКОФОР крупность продукта составила менее 7 мкм при расходе интенсификатора 1,0%. Следовательно, устройство позволило снизить его расход для тонкого помола в 1,4-1,5 раза.

Сравнение опытов 1 и 4 показывает, что при прочих одинаковых условиях и одинаковой крупности готового продукта подключение устройства позволило в опыте 4 снизить время измельчения с 60 до 40 минут, то есть увеличить производительность мельницы в 1,5 раза.

Таблица 8.2 – Результаты помола мела с ЭКОФОР

Классы	Выход (%) классов для проб №						
крупности,		3		4		5	
МКМ	Дифф.	Интегр.	Дифф.	Интегр.	Дифф.	Интегр.	
-20 + 16			0,98	100			
-16 + 14			4,95	99,02			
-14 + 12			1,47	94,07			
-12 + 10			2,17	92,6			
-10 + 9			1,03	90,43	2,7	100	
-9 + 8			0,92	89,4	2,38	97,3	
-8 + 7	5,08	100	1,63	88,48	1,07	94,92	
-7 + 6	8,93	94,92	0,71	86,85	3,26	93,85	
-6 + 5	4,53	85,99	2,99	86,14	2,07	90,59	
-5 + 4	6,8	81,46	3,92	83,15	7,9	88,52	
-4 + 3	10,1	74,66	9,52	79,23	6,58	80,62	
-3 + 2	13,05	64,56	12,78	69,71	11,97	74,04	
-2 + 1	34,41	51,51	40,78	56,93	45,89	62,07	
-1 + 0	17,10	71,1	16,15	16,15	16,18	16,18	
Итого:	100		100		100		
Удельная поверхность, см ² /г	14900		14	14800		15000	
Время измельчения, мин	60		4	40	60		
Добавка инт, %	1	1,0	1	,0	1,0		

В опыте 5 был получен самый тонкий продукт, содержащий 80% класса мельче 4 мкм и 60% мельче 2 мкм, что не получалось без устройства. Таким образом, устройство ЭКОФОР, нейтрализующее электрический заряд измельчаемого материала, позволяет достигнуть сверхтонкого измельчения химически осажденного мела.

8.3. Помол гранулированной серы

Исходный материал – сера гранулированная (ТУ 2112-016-00148599-01) и белая сажа БС-100 (ГОСТ 18307), как интенсификатор.

Таблица 8.3. – Результаты помола серы гранулированной

	Macca		Содержание фракции, %					
Номер	загрузки	Продолжительность						
пробы	материала,	помола, мин.	+160 мкм	+71 мкм				
	КГ							
Серия	1 без ЭКОФОІ	Р, содержание белой саж	ки $0,2\%$, помол не про	оисходил				
	из-за н	налипания материала на	мелющие тела.					
	Серия 2	с ЭКОФОР, содержание	белой сажи 0,2%					
1.0	3,6	0	100	100				
1.1	3,6	2	23,2	54,6				
1.2	3,53	4	3,65	27,9				
1.3	3,46	6	0,15	14,3				
1.4	3,39	10	следы (агрегаты)	8,8				
	Серия 3 бе	з ЭКОФОР, содержание	е белой сажи - 0,5%					
3.0	3	0	100	100				
3.1	2,93	5	0,2	26,5				
			0,5					
3.2	2,86	10	(неизмельченные	16				
3.2	2,00	10	частицы и	10				
			агрегаты)					
	Серия 4 с ЭКОФОР, содержание белой сажи - 0,5%							
2.0	3	0	100	100				
2.1	2,93	5	0,15	19				
2.2	2,86	10	0,2 (агрегаты)	9,8				
	образец	заказчика	0	9,7				

Помол производился на лабораторной вибрационной мельнице СВМ-3 с мелющими телами в виде стальных цилиндров 15 х 15 мм, масса загрузки мелющих тел 36 кг. Результаты измельчения представлены в таблице 8.3., а зависимость остатков на сите 0071 продуктов помола от времени измельчения на рисунке 8.2.

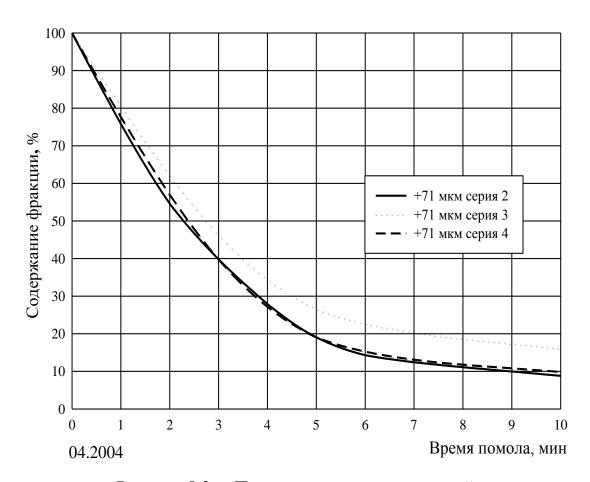


Рисунок 8.2. – Помол серы гранулированной

Испытания показали, что требуемое заказчиком качество помола гранулированной серы 9,7% на сите 71 мкм при добавке белой сажи 0,2 % и 0,5% без подключения устройства ЭКОФОР не удовлетворялся. При 0,2% помол не происходил из-за налипания на мелющие тела, а при 0,5% требуемая тонина не достигалась. При использовании устройства ЭКОФОР помол при подаче белой сажи 0,2% удовлетворял требованию заказчика, а подача её в количестве 0,5 % являлась избыточной.

8.4. Помол полистирола ПСН

Исходный материал — полистирол ПСН суспензионный, низковязкий, саженаполненный. Помол производился в лабораторной вибромельнице СВМ - 04 со стальными мелющими телами - шарами диаметром 10-12 мм. Масса загруженных мелющих тел 0,3 кг. Амплитуда колебаний — 5 мм. Результаты измельчения представлены в таблице 8.4. и на рисунке 8.3.

Таблица 8.4. – Помол полистирола ПСН

Номер пробы	Масса загрузки материала, г	Продолжительность помола, мин.	Удельная поверхность, см ² /г				
	Серия 1 без ЭКОФОР						
1.0	20	0	0				
1.1	20	10	2670				
1.2	20	30	3485 с агрегацией				
		Серия 2 с ЭКОФОІ					
2.0	20	0	0				
2.1	20	10	2990				
2.2	20	30	4260				
2.3	20	60	4785				

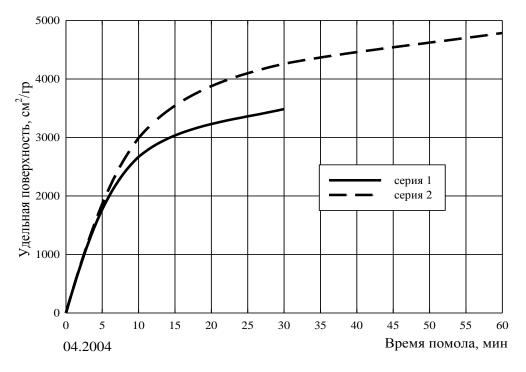


Рисунок 8.3. – Помол полистирола ПСН

Достижение удельной поверхности уровня 3485 см²/г при помоле без устройства происходило с агрегацией материала, а с устройством даже на уровне 4785 см²/г агрегация не наблюдалась.

При продолжительности помола 30 мин. увеличение удельной поверхности при помоле с устройством составило 775 см²/г, что свидетельствовало не только о повышении качества помола, но и о возможном значительном увеличении производительности мельницы с получением более качественного порошка.

8.5. Помол кокса непрокаленного

Исходный материал – кокс непрокаленный. Помол производился на лабораторной вибромельнице CBM – 3 с мелющим шарами диаметром 10-20 мм. Масса загрузки мелющих тел составляла 36 кг.

Таблица 8.5. – Результаты помола кокса непрокаленного

Номер пробы	Масса загрузки материала, кг	Продолжительность помола, мин.	Содержание фракции +63 мкм, %			
Серия 1 без ЭКОФОР						
1.0	1,95	0	93,9			
1.1	1,95	2,5	40,2			
1.2	1,91	5	19,9			
1.3	1,87	10	6,6			
1.4	1,83	20	1,5			
	Сери	я 2 с ЭКОФОР				
2.0	2	0	93,9			
2.1	2	5	16,5			
2.2	1,96	10	2,8			
2.3	1,92	20	0,1			

При продолжительности помола непрокаленного кокса 10 мин. улучшение остатка на сите 63 мкм, как это показано в таблице 8.5. с использованием устройства составило 2,8%, что свидетельствовало о возможности увеличения производительности мельницы у заказчика.

Зависимость содержания фракции + 63 мкм от времени помола представлена на рисунке 8.4.

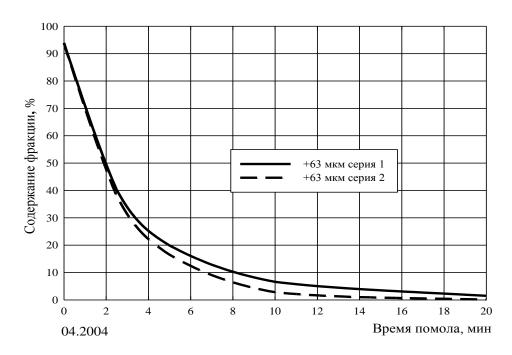


Рисунок 8.4. – Помол кокса непрокаленного

8.6. Помол доломита

Помол доломита производился на лабораторной вибрационной мельнице СВМ-3 с мелющими стальными шарами 10-20 мм. Масса загрузки мелющих тел составляла 36 кг.

Результаты измельчения представлены в таблице 8.6. и рисунке 8.5.

При помоле доломита без использования устройства агрегация измельченного порошка начиналась уже через 5 мин. При использовании устройства агрегация не наблюдалась даже при продолжительности помола 20 мин. и остаток на сите уменьшался.

Доломитовая мука используется в сельском хозяйстве для раскисления почвы. Как правило, доломит поступает на мельницу во влажном состоянии. Основная трудность в его помоле заключатся в агрегации порошка. Необходима его дезагрегация, что и выполняет устройство ЭКОФОР.

Таблица 8.6. – Результаты помола доломита

Номер пробы	Масса загрузки материала, кг	Продолжительность помола, мин.	Содержание фракции +63 мкм, %					
	Серия 1 без ЭКОФОР							
1.0	3,26	0	97,4					
1.1	3,26	2,5	42,0					
1.2	3,21	5	20,1(агрегаты)					
1.3	3,11	10	9,3(агрегаты)					
1.4	3,06	20	5,2(агрегаты)					
	Сері	ия 2 с ЭКОФОР						
2.0	3,26	0	97,4					
2.1	3,26	5	14,0					
2.2	3,11	10	7,3					
2.3	3,06	20	4,6					

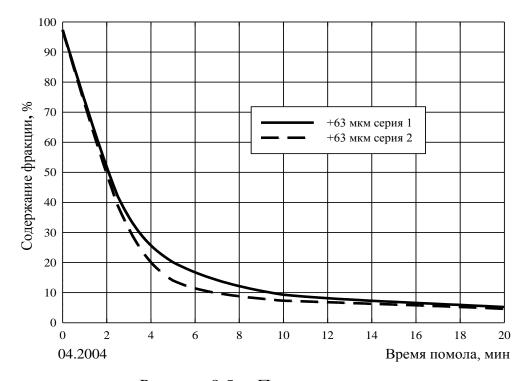


Рисунок 8.5. – Помол доломита

В ноябре 1998 года в Финляндии на фирме Dolomittikakki ОУ производительность мельницы, которая не справлялась с помолом влажного доломита, удалось с помощью устройства увеличить в пять раз и довести до 20 т/час. Испытания были продолжены на фирме SAXO ОУ, где производительность мельницы доломитовой муки была увеличена с 36 до 45 т/час.

8.7. Помол полифосфата аммония

Исходный состав – полифосфат аммония, зерновой состав – менее 1мм, влажность - около 0%. Результаты интенсификации помола представлены в таблице 8.7. и рисунке 8.6.

Таблица 8.7. – Результаты помола полифосфата аммония

Номер пробы	Масса загрузки материала, кг	Продолжительность помола, мин.	Содержание фракции +100 мкм, %				
	Серия 1 без ЭКОФОР						
1.0	30	0	100				
1.1	30	1	52				
1.2	30	3	30				
	Серия 2 с ЭКОФОР						
2.0	30	0	100				
2.1	30	1	44				
2.2	30	3	22				

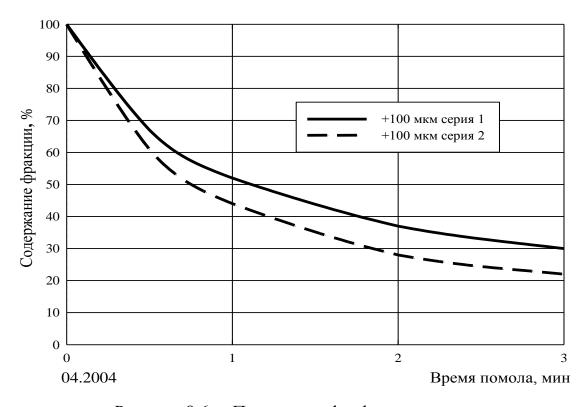


Рисунок 8.6. – Помол полифосфата аммония

Помол производился в лабораторной вибромельнице CBM - 04. Мелющие тела - стальные цилиндры диаметром 12 мм. Масса загрузки мелющих тел 0,3 кг. Амплитуда колебаний - 5 мм.

Результаты испытания показывают, что помол полифосфата аммония идет с подключением устройства ЭКОФОР интенсивнее, остаток на сите 100 мкм уменьшен на 8%.

8.8. Помол керамической шихты

В 2001 году на АООТ «Абразивный завод «Ильич» были проведены испытания на тороидальной вибрационной шаровой мельнице МВШ - 2,0 по помолу керамической шихты Б6 с использованием устройства ЭКОФОР.

Исследовалась кинетика достижения удельной поверхностью шихты требуемого значения 4500 см²/г. Производительности этой мельницы не хватало для выполнения программы по выпуску специальной керамики. Ставился вопрос о приобретении еще одной мельницы.

Экспериментально было установлено, что подключение устройства ЭКОФОР к тороидальной вибрационной мельнице, как это следует из таблицы 8.8., позволило уменьшить время измельчения керамической шихты Б6 с б до 1 часа, хотя для однородного смешивания порошка целесообразно оказалось продлить смешивание ещё на 1 - 2 часа.

Таблица 8.8. – Результаты помола керамической шихты

Dnorg	Удельная поверхность, см ² /г				
Время помола, час	Без ЭКОФОР		С ЭКОФОР		
помола, час	1 опыт	2 опыт	3 опыт	4 опыт	
1	-	-	-	4881	
2	-	-	-	5107	
3	-	-	-	5300	
4	3300	3000	5545	4958(агрегация)	
6	-	4500	4219(агрегация)	4561(агрегеция)	

Глава 9 ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫЕ ДРОБИЛКИ И МЕЛЬНИЦЫ

Эффективным вариантом дезинтеграции является центробежно-ударное измельчение. Оно известно с конца девятнадцатого века, за прошедшее время конструкция дробилки в своем развитии прошла несколько поколений, получила современное оформление [116, 117]. На рисунке 9.1, представлена схема центробежно-ударной мельницы, разработанной и серийно выпускаемой ЗАО «Урал-Омега» в Магнитогорске и УП НПО «Центр» в Минске, являющимися членами научно-производственной ассоциации «Урал-Центр». Ими выпускаются технологические линии по производству минерального порошка производительностью 5-30 т/час.

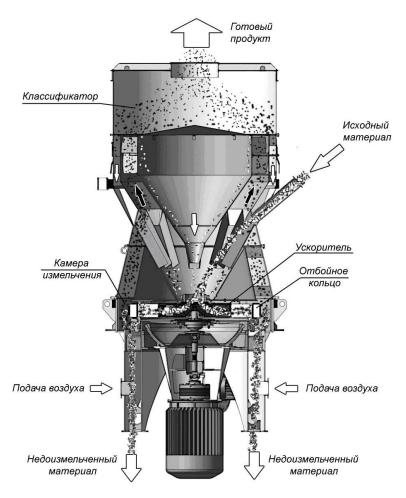


Рисунок 9.1. – Схема центробежно-ударной мельницы

Материал в центробежно-ударную мельницу, как это показано на рисунке 9.1. подается через загрузочную воронку. Под действием центробежной силы куски материала, разогнанные в ускорителе, выбрасываются в камеру измельчения, где сталкиваются с отбойными плитами и с отразившимися от них частицами материала. Соударения происходят с большой скоростью. Камера измельчения продувается вентилятором, обеспечивающим доставку измельчаемого материала в классификатор. Недостаточно измельченные куски материала падают вниз навстречу воздушному потоку и поступают на повторное измельчение. В классификаторе готовый порошок отделяется от крупки, которая в количестве, зависящем от настройки классификатора на необходимое качество измельчения готового продукта, также поступает на повторное измельчение в загрузочную воронку мельницы. Порошок, полученный при центробежно-ударном измельчении, имеет острые, сколотые грани, обладает всвязи с этим повышенной активностью и более узким по сравнению с полученным при шаровом измельчении распределением по размерам частиц.

Развитие техники ударного измельчения сдерживало несоответствие между необходимостью увеличения до значений 70-100 м/с скорости соударения кусков измельчаемого материала с неподвижной преградой и износом подшипников мельницы и её рабочих органов. Подшипниковый узел вала мельницы должен выдерживать большие ударные нагрузки и постоянную несбалансированность ускорителя из-за проходящего через него неравномерного по размерам материала. Рабочие органы подвержены ударно-абразивному износу. Проблема повышения ресурса подшипникового узла мельницы была решена использованием для него воздушной опоры, что является одним из последних достижений современного исполнения мельницы.

Для разработчиков систем центробежно-ударного измельчения, процесс которого имеет повышенную интенсивность, была очевидна имеющая при этом место электризация измельчаемого материала. В 2013 году специалисты ЗАО «Урал-Омега» провели испытания по электронейтрализации материала

с использованием устройства «ЭКОФОР». Испытание проходило при измельчении магнезита на ООО «Магнезит- торкрет-массы». Устройство, как это показано на рисунке 9.2, подключалось к корпусу мельницы в зоне отбойной плиты.



Рисунок 9.2. – Место подключение устройства «ЭКОФОР» к центробежно-ударной мельнице

В результате электронейтрализации измельчаемого магнезита производительность мельницы была повышена на 13,8%. Износ отбойной плиты при этом снизился в три раза. Таким образом, была подтверждена эффективность использования технологии электронейтрализации для центробежно-ударного измельчения.

Глава 10

РАСШИРЕНИЕ СФЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОНЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ

10.1. Универсальность технологии электронейтрализации

Переработка материалов предусматривает использование различных воздействий для изменения их состояния и свойств. Материалы при этом стремятся сохранить своё термодинамическое и электромагнитное равновесие, сопротивляются переработке. Как уже указывалось выше, в соответствии с принципом термодинамического подвижного равновесия Ле Шателье в системе, находившейся в состоянии равновесия и оказавшейся под какимлибо воздействием, возникают процессы, ослабляющие это воздействие. К таким процессам следует отнести активизацию в перерабатываемом материале макроносителей электрического заряда, действие которых было предложено выделить в виде электростатической составляющей силы сопротивления материала прилагаемому воздействию. В перерабатываемых металлах такими носителями являются дислокации. В диэлектрических материалах это диполи, которые активируются в процессе деформации или термического воздействия.

Разработанный в нескольких моделях оригинальный активный электронейтрализатор — устройство «ЭКОФОР», воздействуя на макроносители электрического заряда, подавляет электростатическую составляющую сопротивления материала переработке. Тогда та часть энергии, которая терялась на электризацию, используется более рационально. Результатом нейтрализации является интенсификация технологического процесса и снижение удельного расхода энергии на переработку материала. В этом отношении технология электронейтрализации является в определенной степени универсальной и может быть применима не только для сухого измельчения [118]. Некоторые дополнительные сферы использования этой технологии были апробированы и имеются основания считать, что этот процесс не закончен.

10.2. Спекание материалов

Спекание широко используется в промышленности для получения при повышенной температуре твердых и пористых продуктов из зернистых или порошкообразных, чаще многокомпонентных материалов. Оно представляет собой стадии порошковой металлургии, производства керамических, в том числе огнеупорных, изделий и промежуточных продуктов, таких как цементный клинкер, спёк глинозема, металлургический агломерат.

Так обжиг цементного клинкера предусматривает спекание во вращающейся печи оксидов алюминия, железа и кремния на основе оксида кальция при температуре 1250...1450°С. При этом имеет место процесс электризации спекаемого материала, на который бесполезно расходуется тепловая энергия. В печи спекаемый материал электризуется не только трением при пересыпании. При нагревании его в силу неоднородности имеет место тепловая поляризация с накоплением пироэлектрических зарядов. Эти электрические заряды сдерживают достижение вязкости расплава, необходимой для спекания.

Для оплавления кристаллического материала существенное значение имеет сопротивление сдвигу, которое при критическом подведении теплоты резко снижается. Сопротивление сдвигу включает в себя электростатическую составляющую. Она связана с действием активированных макроносителей электрического заряда. С ростом температуры происходит сначала накопление разнополярных зарядов, а затем их аннигиляция, вызванная интенсификацией теплового, колебательного движения частиц в материале. Оплавление при этом неизбежно достигается. Для экономии тепловой энергии целесообразно ускорить начало оплавления.

Электронейтрализации материала в зоне спекания [119] с использованием устройства «ЭКОФОР» снижает его сопротивление сдвигу за счет снижения электростатической составляющей. Несколько раньше, чем обычно, снижается вязкость расплава. Это дает возможность уменьшить удельный расход топлива при обжиге клинкера при возвращении вязкости к прежнему

уровню. Если же не уменьшать подачу топлива или не увеличить производительность печи, то плотность спекаемого клинкера повышается больше требуемой.

Это было обнаружено в 1994 году на ОАО «Пикалевский глинозем», где впервые устройство было испытано при обжиге цементного клинкера на 60-метровой вращающейся печи. Устройство «ЭКОФОР» было подключено к изолированному от земли, скользящему по бандажному кольцу обечайки печи контакту в центре зоны спекания. Далее электрическая цепь проходила через расклинивающие футеровку печи металлические пластины, в достаточной степени проводящую в горячем состоянии обмазку печи до спекаемой массы материала. Испытание продолжалось двое суток и сопровождалось улучшением гранулометрии клинкера, ростом активной составляющей тока электродвигателя печи. Это обстоятельство свидетельствовало о большей подвижности спекаемой массы, подъём которой по внутреннему диаметру печи при её вращении увеличил статический момент нагрузки электродвигателя печи. Однако через полчаса после отключения устройства ток электродвигателя вернулся к исходному значению, что свидетельствовало о том, что вязкость также вернулась в исходное состояние.

Возобновить испытание оказалось возможным на вращающейся печи производительностью 25 т/час в Египте на «Тоигаћ Сетепт» в 1996 году. Апробация проходила кратковременно, в течение двух суток. После включения перенастроенного на обжиг электронейтрализатора произошло чрезмерное изменение основных параметров качества спекания - содержания свободного оксида кальция в клинкере и веса литра определенной фракции клинкера. На рисунке 10.1. представлены во времени имевшие место изменения. Через 6,5 часов работы вращающейся печи доля свободного оксида кальция снизилась с 1,5% до 0,75%, а вес литра увеличился с 1200 до 1400 г/л. По местным условиям это свидетельствовало о чрезмерном обжиге клинкера. Оператор спустя 10 часов после включения устройства смог увеличить производительность печи без увеличения подачи топлива.

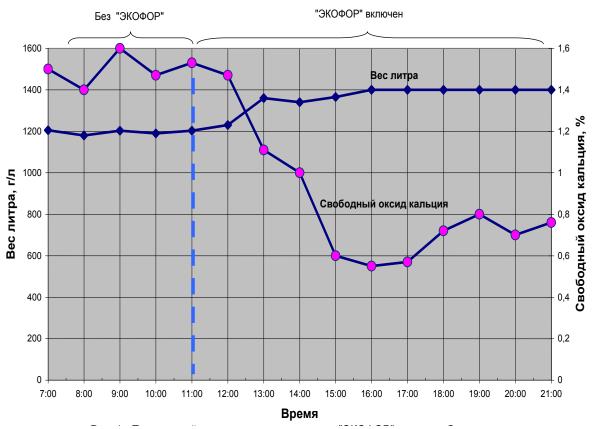


Рисунок 10.1. – Переходный процесс при включении устройства «ЭКОФОР» на печи обжига цементного клинкера в Египте

Таблица 10.1. – Результаты испытания на печи обжига клинкера в Китае

			Усре	дненные значе	кин
					Удельный
Рабочие смены	Клинкер	Уголь	Насыпная	Свободный	расход
т аоочие смены	т/смену	т/смену	плотность	CaO,	топлива
			г/дм3	%	т угля / т
					клинкера
До включения «ЭКО-	201	55,4	1370	1,19	0,276
ФОР»	201	33,4	1370	1,19	0,270
Устрої	йство «ЭКО	ФОР» вкл	ючено в 12:00	24.06.97	
24.06.97, 08:00 -16:00	206,5	54,0	1385	1,18	0,262
24.06.97, 16:00 -24:00	223	54,8	1385	0,96	0,245
25.06.97, 00:00 -08:00	226	57,4	1350	1,35	0,254
25.06.97, 08:00 -16:00	231,5	47,4	1350	0,98	0,204
25.06.97, 16:00 -24:00	217	54,1	1360	1,14	0,249
26.06.97, 00:00 -08:00	231	53,7	1390	0,91	0,232
26.06.97, 08:00 -16:00	232,5	55,0	1380	1,05	0,237
26.06.97, 16:00- 24:00	235,5	53,5	1390	1,05	0,227

В 1997 году такой же эффект достигнут в Китае на «Suzhou Nanxin Cement». Результаты испытания представлены в таблице 10.1. С уменьшением свободного кальция оператор увеличивал производительность печи. В итоге она была увеличена на 8%, а удельный расход угля на производство тонны клинкера снизился на 10%.

В 1998 году было проведено испытание устройства на 170- метровой печи обжига клинкера производительностью 68 т/час ОАО «Пикалевский глинозем». В среднем за месяц была достигнута 3,9% экономия газа при сохранении прежней производительности печи.

В 2006 году после предварительных испытаний в Республике Беларусь на ОАО «Красносельскстройматериалы» четыре вращающиеся печи обжига были оснащены устройствами «ЭКОФОР», модель ЭФ-01-04. По данным технологической службы объединения, на печах 4х150м № 1 и 2 производительностью 32 т/час была достигнута экономия топлива 8-12%, а на печах 5х150м № 3 и 4 производительностью 54 т/час – от 4 до 6%.

Минимально достижимая экономия газа при использовании устройства «ЭКОФОР» при спекании цементного клинкера составила 250 м³/час.

Полученные при спекании цементного клинкера результаты дают основания полагать, что получение положительных результатов при использовании технологии электронейтрализации возможно при спекании и других видов продукции, в том числе для порошковой металлургии.

10.3. Кристаллизация сплавов

В 1995 году в СПб ГТУ проводилось испытание воздействия устройства «ЭКОФОР» при кристаллизации на структуру и свойства сплавов алюминия АЛ-2 и А-7. Образцы отливались в бронзовый кокиль с температурой расплава 800°С. Процесс кристаллизации происходил без воздействия и с воздействием устройства. Структура сплавов, полученных с воздействием устройства «ЭКОФОР» оказалась более однородной, наблюдалось значительное уменьшение межосевых расстояний дендритов второго порядка.

Пластичность материалов была увеличена на 40%, отмечалось снижение характеристики сопротивления пластической деформации на 12-16% на уровне предела текучести [120].

В 1996 году испытания устройства «ЭКОФОР» проводились на производстве алюминиевой катанки ОАО «Иркутский алюминиевый завод». На агрегате непрерывной кристаллизации и прокатки это устройство было подключено к кристаллизатору литейной машины роторного типа. Под влиянием активного электронейтрализатора процесс кристаллизации внутренней части прутка при неизменной скорости вращения ротора несколько замедлился. Мощность, потребляемая двигателем прокатного стана, снизилась на 15%, значительно уменьшился шум оборудования. Поверхность катанки стала более блестящей. За счет улучшения качества поверхности удельное сопротивление катанки было снижено почти на 2%, с 0,0285 до 0,028 Ом мм²/м, что существенно для производства катанки высшего класса [121].

10.4. Производство углеродного восстановителя

Одним из лучших углеродных восстановителей с древнейших времен является древесный уголь — макропористый, высокоуглеродистый и высоко-калорийный материал. Он производится в металлических пиролизерах, таких как углевыжигательная печь УВП-5, в бескислородной среде. Из 7 — 8 м³ березового сырья получают одну тонну древесного угля. То есть обгар — потеря массы при этом составляет около 70%. Древесный уголь используется в качестве восстановителя в производствах алюминия, металлического кремния, а также при выплавке редких и ценных металлов.

Оснащение пиролизеров, производящих древесный уголь, устройствами "ЭКОФОР" позволило получить древесный уголь с повышенной активностью. Обгар сырья при этом снизился более чем в два раза, соответственно повысилась производительность пиролизера. Пиролиз происходил быстрее, чем обычно, так как необходимая температура пиролиза в 950°С снизилась до 800°С. При этом образовывались дополнительные активные центры в порах

древесного угля, способные проводить не только физическую, но и хемосорбцию, то есть связывать в этих порах химические соединения. Активность такого продукта по осветляющей способности в растворе йода, равная 30 оптич. %, находилась на уровне активности дробленого активного угля марки ДАК, получаемого методом парогазовой активации при значительно больших энергозатратах.

В ОАО «ВАМИ» в 1995 году было проведено обследование такого углеродного восстановителя в качестве сырья для производства технического кремния. Если содержание нелетучего углерода в древесном угле составило 65,4 %, то на пиролизере ООО «Петросорбент», оснащенном устройством «ЭКОФОР», оно было 96,4 %. Активность этого продукта превышало активность древесного угля в 1,3 раза.

При производстве технического кремния неизбежны его потери в виде летучей моноокиси кремния. Для повышения технологических показателей необходимо более полное улавливание моноокиси кремния активными углеродистыми материалами в верхних зонах ванны электропечи. Это является основным критерием использования углеродистого материала. Так, по данным ОАО «ВАМИ» за счет улучшения улавливания моноокиси кремния снижение потребления электроэнергии при расходе такого более активного древесного восстановителя с расходом 600 кг/т кремния составило от 500 до 1000 кВт час на 1 т кремния.

Выпуск такого углеродного восстановителя был освоен в Ленинградской области на ООО "Петросорбент" [122] и активного торфяного кокса на "ООО "КАРБОТОРФ" [123] на базе малозольнистых торфов Бокситогорского района Ленинградской области.

10.5. Нагрев и испарение жидкости

В паровых и водогрейных котлах при недостаточно качественной водоподготовке образуется накипь, что приводит к снижению КПД этих аппаратов и перерасходу топлива. Так накипь в 1,5 мм приводит к 15-процентным

потерям топлива, а при толщине в 3 мм к 25-процентному его перерасходу. При подключении к верхнему барабану парового котла или к коллектору горячей воды водогрейного котла, в результате нейтрализации устройством «ЭКОФОР» электростатической составляющей силы адгезии, накипь рассасывается и переходит в шлам [124]. Образуется магнетитовая пленка, которая, продолжая находиться под воздействием устройства, защищает испарительную поверхность от накипи и коррозии.

В 1997 году испытания технологии на паровых котлах ГП "Адмиралтейские верфи" показало 8-процентную экономию топлива. Под эгидой ГУП "ТЭК Санкт-Петербурга" в отопительный сезон 2000-2001 годов проводилась апробация устройства "ЭКОФОР" на паровом и водогрейном котлах котельной ЭУ-4 Красносельского филиала. Внутренний осмотр котлов в конце сезона подтвердил его полную очистку от накипи. С 2007 года начались поставки устройств модели ЭФ-01-02 на паровые водогрейные котлы и теплообменники.

Это же устройство «ЭКОФОР», модель ЭФ-01-02 может быть использовано при ректификации спирта и перегонке нефти, где технологический процесс имеет место на основе испарения. В 1999 году в ОАО «ВНИИнефтехимпром» были проведены испытания устройства на лабораторной колонне. При ректификации системы этанол-вода флегмовое число, характеризующее эффективность дистилляции, было снижено на 30-40%, по сравнению с разгонками без устройства «ЭКОФОР». На той же колонне производилась разгонка системы н-гептан - толуол, моделировавшей нефть. При этом флегмовые числа оказались на 25-30% ниже, чем без использования устройства. Это позволяет повысить производительность колонны на 30% при сохранении заданного качества продукции или значительно снизить расход греющего пара. Возможным является снижение доли мазута при перегонке нефти, что может внести вклад в актуальную задачу повышения глубины первичной её переработки.

10.6. Потери трения

Исследование электрофизических явлений при трении является одним из эффективных путей изучения его природы [56]. В адгезионном взаимодействии при трении наибольшую роль играет электризация при разрушении двойного электрического слоя на границе двух фаз [16].

В 1996 году на стенде для исследования подшипников скольжения в лаборатории трения и смазки СПб ГТУ были проведены испытания по воздействию электронейтрализации на трение в подшипнике. Испытание показало, что в режиме полужидкостного трения при скорости 15 об/мин с подключенным к корпусу подшипника устройством «ЭКОФОР» момент трения уменьшился на 12,4%, а при скорости 300 об/мин на 1,7%.

Электрофизические процессы имеют место и в паровых турбинах [125], с чем связаны профильные потери в их сопловых каналах. В 2013 году с целью выявления возможности снижения этих потерь было проведено испытание устройства «ЭКОФОР» на модельной турбине осевого типа МДГ-20 на кафедре «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» СПб ГТУ. В результате сравнительных испытаний было установлено, что подключение активного нейтрализатора, привело к возрастанию КПД турбины с 53% до 61%, что подтвердило возможность снижения потерь в турбоагрегатах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ негативных проявлений электризации при сухом измельчении твердых, неоднородных, природных и техногенных материалов подтвердил правомочность предложенного выделения электростатической составляющей сопротивления материала измельчению. Интенсификация измельчения в таком случае целенаправленно проводится путем уменьшения этой составляющей за счет упреждающей нейтрализации активированных электроносителей в измельчаемом материале. В результате уменьшаются и потери упругой энергии деформации, шедшие ранее на электризацию. Более эффективное использование упругой энергии деформации приводит к интенсификации измельчения.

Исследованы возможности разработанного с этой целью активного электронейтрализатора, оказывающего текущее воздействие на металлическую поверхность рабочих тел и способствующего полигонизации их дислокационного «дебри–слоя». Аннигиляцией дислокаций создавались предпочтительные условия для релаксации электрического заряда, предваряющие его негативное воздействие на процесс измельчения. В результате снижение удельного расхода энергии при измельчении составило 3 – 7 кВт час на тонну готового продукта, что соответствует экономии от 150 до 900 кВт час за каждый час работы системы измельчения из расчета на один активный электронейтрализатор.

Разработаны методики использования новой технологии на конусных дробилках, шаровых, вибрационных и центробежно-ударных мельницах, валковых измельчителях при переработке различных твердых материалов. Выявлены пути совместного использования аппаратной электронейтрализации и интенсификаторов помола, реализующих эффект Ребиндера.

Начиная с 1997 года, в 42 странах мира проведены демонстрации технологии электронейтрализации с внедрением более 200 устройств «ЭКОФОР». Исследования и продвижение универсальной технологии продолжаются.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Перечень испытаний, проведенных на системах помола открытого цикла с применением устройства ЭКОФОР, с 1995 по 2010 год.

Сокращение: инт. – интенсификатор помола

1	Октябрь 1995	Гипроцемент	Россия, Санкт- Петербург	Мельница 10 т/час, жа- ростойкий цемент	Снижение остатка на сите на 4%
2	Январь 1996	Nesher Cement	Израиль, Хайфа	Мельница 44 т/ч + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
3	Февраль 1996	Белгородский цемент	Россия, Белгород	Мельница 40 т/ч + инт., цемент	Снят интен- сификатор
4	Май 1996	Tourah Portland Cement	Египет, Каир	Мельница 56 т/ч, цемент	Увеличение питания на 24%
5	Май 1996	Tourah Portland Cement	Египет, Каир	Мельница 75 т/ч, цемент	Увеличение питания на 20%
6	Май 1996	Tourah Portland Cement	Египет, Каир	Мельница 110 т/ч, цемент	Увеличение питания на 18%
7	Октябрь 1996	Навоийский цементный завод	Узбекистан, Навои	Мельница 80 т/ч, цемент	Остаток 80мкм уменьшен на 3%
8	Декабрь 1996	Ameriyah Cement	Египет, Алексан- дрия	Мельница 106 т/ч, цемент	Увеличение питания на 17%
9	Январь 1997	Цементный завод "Китай"	Китай, Нанкин	Мельница 18 т/ч, цемент	Увеличение питания на 26%
10	Март 1997	Helwan Portland Cement	Египет, Каир	Мельница 80 т/ч, цемент	Увеличение питания на 12%
11	Март 1997	Suez Cement	Египеет	Мельница 120 т/ч, цемент	Увеличение питания на 16%
12	Апрель 1997	Семйцемент	Казахстан Семей	Мельница 35 т/ч, цемент	Увеличение питания на 15%
13	Июнь 1997	Long Tang	Китай, Нанкин	Мельница 14 т/ч, цемент	Увеличение питания на 17%

				Т	Г
14	Июнь 1997	Подольский цемент	Украина, Каменец- Подольск	Мельница 53 т/ч, цемент	Увеличение питания на 19%
15	Июнь 1997	Криворожский цементно- горный комби- нат	Украина, Кривой Рог	Мельница 85 т/ч, цемент	Увеличение питания на 3%
16	Август 1997	Пикалевский глинозем	Россия, Пикалево	Мельница 44 т/ч, цемент	Увеличение питания на 12%
17	Октябрь 1997	Мальцовский портландцемент	Россия, Фокино	Мельница 60 т/ч, цемент	Увеличение питания на 15%
18	Декабрь 1997	Одесский цементный завод	Украина, Одесса	2 мельницы по 18 т/ч параллельно. цемент	Увеличение питания на 16%
19	Июнь 1998	Aalborg Portland Cement	Дания, Альборг	Две мельницы -тандем, 150 т/ч, цемент	Снят инт.
20	Июнь 1998	Kunda Nordic Cement	Эстония, Кунда	Мельница 35 т/ч., + инт., цемент	Увеличение питания на 25%
21	Июнь 1999	Blue Circle Cement Works	Англия, Вестбури	Мельница 12 т/ч + инт., цемент	Увеличение питания на 14%
22	Октябрь 1999	ACC Wadi Cement Works	Индия	Мельница 100 т/ч, це- мент	Увеличение питания на 6%
23	Октябрь 1999	Сланцевский цементный завод	Россия, Сланцы	Мельница 14 т/ч, цемент	Увеличение питания на 21%
24	Июнь 2001	Липецкцемент	Россия Липецк	Мельница 40 т/ч, цемент	Увеличение питания на 14.6%.
25	Июль 2001	Сланцевский цементный завод	Россия, Сланцы	Мельница 20 т/ч, цемент	Увеличение питания на 30%.
26	Февраль 2002	Кричевцемент- ношифер	Беларусь, Кричев	Мельница 36 т/ч, цемент	Увеличение питания на 18%
27	Февраль 2002	Кричевцемент- ношифер	Беларусь, Кричев	Мельница 43 т/ч, цемент	Увеличение питания на 54%

28	Июнь 2002	Naujasis kulcitas	Литва, Акмяне	Мельница 12 т/ч, известь	Увеличение питания на 9%.
29	Июль 2002	Любанский ком- бинат строитель- ных материалов	Беларусь, Любань	Мельница 12 т/ч, известь	Увеличение питания на 20% и прочности кирпича.
30	Сентябрь 2002	Вольскцемент	Россия, Вольск	Мельница 51 т/ч, цемент	Увеличение питания на 13.7%
31	Ноябрь 2002	Кантский цементно- шиферный ком- бинат	Киргизия, Кант	Мельница 60 т/ч, цемент	Увеличение питания на 15%
32	Апрель	Новотроицкий	Россия,	Мельница	Увеличение
	2003	цементный завод	Новотроицк	14.4 т/ч	питания на 18%
33	Июнь 2003	Красносельск- стройматериалы	Беларусь, г.п. Красно- сельский	Мельница 50 т/ч	Увеличение питания на 18.0 %
34	Июль 2003	Топкинский цемент	Россия, Топки	Мельница 50 т/ч, цемент	Увеличение питания на 12%
35	Июль 2003	Бухтарминская цементная компания	Казахстан, поселок Отябрьский	Мельница 18.9 т/ч, с инт., цемент	Увеличение питания на 20%
36	Июль 2003	Бухтарминская цементная компания	Казахстан, поселок Отябрьский	Мельница 35 т/ч, цемент	Увеличение питания на 13.6%
37	Июль 2003	Бухтарминская цементная компания	Казахстан, пос. Ок- тябрьский	Мельница 23т/ч, цемент	Снят инт.
38	Август 2003	Подольскцемент	Украина, Каменец- Подольский	Мельница 50 т/ч, цемент	Увеличение питания на 18%
39	Сентябрь 2003	Искитимцемент	Россия, Ис- китим	Мельница 34 т/ч, це- мент	Снижение остатка 80 мкм на 3%
40	Сентябрь 2003	Кувасайцемент	Узбекистан, Кувасай	Мельница 26 т/ч, цемент	Увеличение питания на 16%.

				3.6	* 7
4.1	Ноябрь	Сухоложск-	Россия,	Мельница	Увеличение
41	2003	цемент	Сухой Лог	35.6 т/ч,	питания на
	T.T.			цемент	9.5%
10	Июнь -	Пикалевский	Россия,	Мельница	Увеличение
42	Август	цемент	Пикалево	40 т/ч,	питания
	2004	·	D	цемент	на 9%
10	Июнь	Подгоренский	Россия, пгт.	Мельница	Увеличение
43	2004	цементник	Подгорен-	16,8 т/ч,	питания
) (·		ский	цемент	на 10%
4.4	Май,	0.5	Россия,	Мельница	Увеличение
44	октябрь	Себряковцемент	Михайловка	44 т/ч,	питания на 10%
	2004			цемент	X7
4.5	Октябрь		Россия, Ста-	Мельница	Увеличение
45	2004	Осколцемент	рый Оскол	46,8 т/ч,	питания на
				цемент	8,3%
	II. 6		Украина,	Мельница,	Увеличение
46	Ноябрь	Донцемент	поселок	27т/ч,	питания на
	2004		Новоамв-	цемент	11%,
		г	росиевское	3.6	
47	Апрель	Бахчисарайский	Украина,	Мельница	Увеличение
47	2005	комбинат	Бахчисарай	44 т/ч,	питания на 18%
		Стройиндустрия		цемент	
48	Апрель	Иомитилизмонт	Россия,	Мельница	Увеличение
40	2006	Искитимцемент	Искитим	33,3 т/ч,	питания на 8%
				цемент	Увеличение
49	Май	Жигулевские	Россия,	Мельница 35 т/ч,	
47	2006	стройматериалы	Жигулевск		питания на 31%
				цемент Мельница	3170
50	Июнь	Волынь-Цемент	Украина,	34 т/час,	Увеличение
30	2006	Болынь-цемент	Здолбунов		питания на 20%
				цемент Мельница	
51	Июнь	Кричевцемент-	Беларусь,	43 т/ч,	Увеличение
J1	2007	ношифер	Кричев		питания на 25%
				цемент Мельница,	Увеличение
52	Февраль	Михайловцемент	Россия,	40 т/ч,	питания на
34	2008	титилаиловцемент	Михайлов	1	17,5%
				цемент Мельница,	17,5/0
	Апрель	SAS Tobe	Казахстан,	мельница, 25 т/ч,	
53	2008	Technologis	поселок	23 1/ч, +инт,	Снят инт.
	2000	recimologis	Састобе	цемент	
				цомонт	

54	Май 2008	Николаевцемент	Украина, Николаев	Мельница 25 т/ч, цемент	Увеличение питания на 16,5%
55	Август 2008	Магнитогорский цементно- огнеупорный завод	Россия, Магнито- горск	Мельница 25 т/ч, цемент	Стабилизиро– вана работа мельницы
56	Ноябрь 2009	Красноярский цемент	Россия, Красноярск	Мельница 30 т/ч, цемент	Увеличение питания на 8%
57	Сентябрь 2010	Завод «Октябрь» Новоросцемент	Россия, Новорос- сийск	Мельница 58 т/ч, цемент с опокой	Нет эффекта

приложение 2

Перечень испытаний, проведенных на системах помола замкнутого цикла с применением устройства ЭКОФОР, с 1996 по 2013 год

Сокращение: инт. – интенсификатор помола

				Мельница 118 т/ч	Сииманиа воз
1	Январь	Nesher Israel	Израиль,	·	Снижение воз-
1	1996	Cement	Хайфа	и сепаратор,	врата из сепара-
			1	+ инт., цемент	тора на 75%
	Май	Tourah Port-		Мельница 45 т/ч	5-ти часовое
2	1996	land Cement	Египет, Каир	и сепаратор, цемент	увеличение
	1770	Taria Coment		1 1	питания на 20%
	Июль		Португалия,	Мельница 90 т/ч	Очистка
3	1996	Secil Setubal	Сетубал	и сепаратор,	мелющих тел
	1770		Сстубал	+инт., цемент	мелющих тел
	Οιεπαδηι	Навоийский	Узбекистан,	Мельница 120 т/ч	Увеличение
4	Октябрь 1996	цементный	•	и сепаратор,	
	1770	завод	Навои	сырьевая мука	питания на 20%
	Помобра	Amazzak	Епинот	Мельница 180 т/ч	Vpommovino
5	Декабрь	Amreyah	Египет,	и сепаратор,	Увеличение
	1996	Cement	Александрия	сырьевая мука	питания на 8%
	пс	Alexandria	Г	N	Увеличение
6	Декабрь	Portland	Египет,	Мельница 50 т/ч	питания на
	1996	Cement	Александрия	и сепаратор, цемент	12.4%
	(Transport	Цементный	I√mo≚	Mary 20 m/m	V
7	Январь	завод	Китай,	Мельница 30 т/ч	Увеличение
	1997	"Джан Нан"	Нанкин	и сепаратор, цемент	питания на 25%
	Опром	Цементный	V.mo∺	Монгинго 100 т/	Vpanusansa
8	Январь	завод "Хуэй	Китай,	Мельница 100 т/ч	Увеличение
	1997	хэ"	Шидзоу	и сепаратор, цемент	питания на 15%
	Mone	Na ah an Iarra - 1	Иомогия	Мельница 85 т/ч	Снят инт.,
9		Nesher Israel	1 '	и сепаратор,	питание ниже
	1997	Cement	Тель- Авив	+инт., цемент	на 4%
	M	NI1 I 1	II	Мельница 150 т/ч	V
10		Nesher Israel		и сепаратор,	Увеличение
	1997	Cement	Телль-Авив	сырьевая мука	питания на 23%
11	Июнь	I and Tax	Китай,	Мельница 18 т/ч	Увеличение
11	1997	Long Tang	Нанкин	и сепаратор, цемент	питания на 20%
12	Июнь	Tianbao	Китай,	Мельница 14 т/ч	Увеличение
12	1997	Group	Нанкин	и сепаратор, цемент	питания на 14%
				1 1/	

13	Июнь 1997	Qu Fu Kouri Cement	Китай, Чу Фу	Мельница 42 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 14%
14	Январь 1998	Keystone Cement	США, Пенсильва- ния	Мельница 80 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 6.2%
15	Февраль 1998	Holnam Portland	США, Денвер	Мельница 40 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 26% снят инт. на 40%
16	Февраль 1998	Raysut Cement	Султанат Оман, Салалах	Мельница 57 т/ч и сепаратор, сырьевая мука.	Увеличение питания на 12%
17	Февраль 1998	Raysut Cement	Султанат Оман, Салалах	Мельница 55 т/ч и сепаратор, +инт., цемент	Полностью снят инт.
18	Июнь 1998	Oman Ce- ment	Султанат Оман, Маскат	Мельница 65 т/ч и сепаратор, +инт., цемент	Увеличение питания на 12.5%
19	Июнь 1998	Oman Ce- ment	Султанат Оман, Маскат	Мельница 85 т/ч и сепаратор, сырьевая мука	Увеличение питания на 5%
20	Сентябрь 1998	Chalkis Cement	Греция, Халкис	Мельница 85 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 9%
21	Сентябрь 1998	Chalkis Cement	Греция, Халкис	Мельница 82 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
22	Сентябрь 1998	Saxo Mineral OY	Финляндия	Мельница 14 т/ч, вибросито и сепаратор, доломит	Увеличение питания на 23-25%
23	Сентябрь 1998	Repo OY	Финляндия	Мельница 14 т/ч и сепаратор, доломит	Увеличение питания на 100%
24	Ноябрь 1998	Vassiliko Cement Works	Кипр, Лимасол	Мельница 84 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 11%
25	Январь 1999	Карель- ский Окатыш	Россия, Костомукша	Мельница 79 т/ч и сепаратор, известняк,	Увеличение питания на 21%,

11011	ложение д				
26	Январь 1999	Vassiliko Cement Works	Кипр, Лимасол	Мельница 67 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 9%
27	Март 1999	Colacem	Италия, Губбио	Мельница 95 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 5%
28	Март 1999	Titan Kamari	Греция, Камари	Мельница 226 т/ч и сепаратор, сырьевая мука	Увеличение питания на 5%
29	Март 1999	Vassiliko Cement Works	Кипр, Лимасол	Мельница 22 т/час и сепаратор, +инт., белый цемент	Увеличение питания на 18%
30	Май 1999	California Portland Cement	США, Лан- кастер	Система из трех це- ментных мельниц 64 т/ч и сепаратора	Увеличение питания на 7%
31	Июнь 1999	HDB- Siggenthal	Швейцария, Цюрих	Мельница 34 т/ч и сепаратор, +инт., цемент	Увеличение питания на 11,5%
32	Июнь 1999	HDB- Siggenthal	Швейцария, Цюрих	Мельница 84 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 9%
33	Июнь 1999	Halyps Ce- ment	Греция, Афины	Мельница 63 т/ч и сепаратор, +инт., цемент,	Увеличение питания на 6%
34	Июль 1999	Ивано- Франковск- цемент	Украина, с. Ямница	Мельница 35 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 14%
35	Август 1999	Lafarge Asland	Испания, Толедо	Мельница 63 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Снят инт., снижение питания на 3%
36	Октябрь 1999	Rugby Barrington Works	Англия, Кэмбридж	Мельница 45 т/ч и сепаратор + инт., цемент	Снят инт.
37	Декабрь 1999	Adana Cimento	Турция, Адана	Ролл-пресс, мельни- ца 129 т/ч, и 2 сепаратора, + инт., цемент	Увеличение питания на 12%
38	Декабрь 1999	Cemex	Мексика, Мерида	Мельница 60 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 14 %
39	Декабрь 1999	Tehran Cement	Иран, Тегеран	Мельница 106 т /ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 12%

				1	
40	Декабрь 1999	Goltas Cimento	Турция, Испарта	Сырьевая, валковая, вертикальная мельница 180 т/ч и сепаратор	Увеличение питания на 11%
41	Декабрь 1999	Goltas Cimento	Турция, Испарта	Сырьевая, шаровая мельница 140 т/ч и сепаратор	Увеличение питания на 10%
42	Декабрь	Goltas	Турция,	Мельница 70 т/ч	Увеличение
72	1999	Cimento	Испарта	и сепаратор, цемент	питания на 10%
43	Декабрь	Goltas	Турция,	Мельница 140 т/ч	Увеличение
73	1999	Cimento	Испарта	и сепаратор, цемент	питания на 6%
44	Декабрь 1999	Goltas Cimento	Турция, Испарта	Мельница 65 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 28%
45	Январь 2000	CBR Cement	Бельгия, Монс	Мельница 13 т/ч и сепаратор, + инт., белый цемент	Увеличение питания на 10%
46	Январь	Askale	Турция,	Мельница 50 т/ч	Увеличение
40	2000	Cimento	Эрзурум	и сепаратор, цемент	питания на 20%
47	Февраль 2000	Akcansa Cimento	Турция, Стамбул	Вертикальная, сырьевая мельница 190 т/ч	Увеличение питания на 9.5%,
48	Февраль 2000	Akcansa Cimento	Турция, Стамбул	Мельница 95 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 8%, снят инт.
49	Февраль 2000	Akcansa Cimento	Турция, Стамбул	Мельница 69 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 11.6%
50	Февраль 2000	Bolu Cimento	Турция, Болу	Мельница 61 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 10%,
51	Апрель 2000	Vicat Cement	Франция, Монтелье	Мельница 180 т/ч и сепаратором,, + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
52	Апрель 2000	Cimko Cimento Adiyaman Fabrika	Турция, Адиаман	Мельница 61 т/ч и сепаратор, цемент	
53	Апрель	Mardin	Турция,	Мельница 101 т/ч	Увеличение
	2000	Cimento	Мардин	и сепаратор, цемент	питания на 5%

54	Апрель	Askale	Турция,	Мельница 70 т/ч	Увеличение
	2000	Cimento	Эрзурум	и сепаратор, цемент	питания на 11%
	Апрель	Yambu	Саудов-	Мельница 300 т/ч	Увеличение
55	2000	cement	ская Ара-	и сепаратор, сырье-	питания на 5%
		factory	вия, Ямбу	вая мука	111114111111111111111111111111111111111
56	Май	Невьянский	Россия,	Мельница 75 т/ч	Увеличение
	2000	Цементник	Невьянск	и сепаратор	питания на 16%
57	Июнь	Cimentas	Турция,	Мельница 60 т/ч	Увеличение
	2000	Cimentas	Измир	и сепаратор, цемент	питания на 8%
58	Июнь	Nuh Cimento	Турция,	Мельница 80 т/ч	Увеличение
	2000	Trum Cimento	Измир	и сепаратор, цемент	питания на 15%
59	Июнь	Nuh Cimento	Турция,	Мельница 180 т/ч	Увеличение
	2000	Truit Cimento	Измир	и сепаратор, цемент	питания на 8.5%
	Июнь		Турция,	Роллер-пресс 130	Увеличение
60	2000	Baticem	т урция, Измир	т/ч, мельница, два	питания на
	2000		измир	сепаратора, цемент	11.5%
	Июнь		Республи-	Мельница 44 т/ч	Увеличение
61	2000	Hanil Cement	каКорея,	и сепаратором,	питания на 7.8%
	2000		Таньйанг	+ инт., цемент	питания на 7.0/0
	Июнь		Республи-	Мельница 44 т/ч и	Увеличение
62	2000	Hanil Cement	каКорея,	сепаратор,	питания на 10%
	2000		Таньйанг	+ инт., цемент	питания на 1070
	Август	Vikram	Индия,	Мельница 160 т/ч	Увеличение
63	2000	Cement	Викрам	и сепаратор,	питания на 9%
	2000	Works	Нагар	цемент	питания на 970
			Республи-	Роллер-пресс 195	
64	Август	Hanil Cement	каКорея,	т/ч, мельница	Увеличение
04	2000	Traini Centent	какорся, Таньйанг	и сепаратор,	питания на 9%
			таньиані	+ инт., цемент	
			Республи-	Вертикальная,	Увеличение
65	Август	Hanil Cement	каКорея,	сырьевая, валковая	у величение питания
0.5	2000	Traini Cement	•	мельница 340 т/ч	на 10 т/ч
			Таньйанг	и сепаратор	на 10 1/4
	Август		Республи-	Мельница 44 т/ч	Увеличение
66	2000	Hanil Cement	каКорея,	и сепаратор,	питания
	<u> </u>		Таньйанг	+ инт., цемент	на 10.6%
	ADENOT		Республи-	Мельница187 т/ч	Увеличение
67	Август 2000	Hanil Cement	каКорея,	и сепаратор,	
	2000		Таньйанг	+ инт., цемент	питания на 10%,

					1
68	Сентябрь 2000	Illinois Cement	США, Ла Шалле	Мельница 80 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
69	Ноябрь 2000	Hanil Cement	Республи- каКорея, Таньйанг	Вертикальная валковая мельница и сепаратор, 140 т/ч, цемент	Добавлено 5 т/ч.
70	Ноябрь	Afyon	Турция,	Мельница 35 т/ч	Увеличение
/0	2000	Cimento	Ускюдар	и сепаратор, цемент	питания на 22%
71	Февраль 2001	Hanil Cement	Республи- каКорея, Таньйанг	Мельница 22,5т/ч и сепаратор, шлакоцемент	Увеличение питания на 15%
72	Апрель 2001	Tong Yang Cement	Республи- каКорея, Самчеок- Сити	Роллер-пресс, мельница 207 т/ч, и два сепаратора. + инт., цемент	Увеличение питания на 5%.
73	Апрель 2001	Kars Cimento	Турция, Карс	Мельница 46 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 15-18%
74	Апрель 2001	Kurtalan Cimento	Турция, Курталан	Мельница 65 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 20%
75	Апрель 2001	Руслайм	Россия, Губкин	Молотковая мель- ница 14 т/ч и сепаратор, мел	Увеличение питания до 20%
76	Май 2001	Hyundai Cement	Республи- каКорея, Таньйанг	Вертикальная, вал- ковая мельница, 394 т/ч, сырьевая мука	Увеличение питания на 6%
77	Август 2001	Tong Yang Cement	Республи- каКорея, Самчеок- Сити	Роллер-пресс, мель- ница 260 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 4%
78	Август 2001	Lafarge Retznei Werk	Австрия, Ретзней	Мельница 39 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Снят инт.
79	Апрель 2002	Ciment Quebec	Канада, Сан-Базиль	Мельница 85 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 11%
80	Май 2002	LEHIGT Heidelberg Cement Group	США, Калифор- ния	Мельница 62 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 9%

81	Август 2003	Vicat Cement	Турция, Конья	Мельница 130 т/ч, HOROMILL с сепаратором, + инт., цемент	Увеличение удельной поверхности на 150 см ² /г
82	Август 2003	Vicat Cement	Турция, Конья	Мельница 134 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 11%
83	Сен- тябрь 2004	Одесский цементный завод	Украина, Одесса	Мельница 36 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 6%
84	Ноябрь 2004	Завод Про- летарий, Новорос- цемент	Россия, Но- вороссийск	Мельница 48 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 14%
85	Январь 2005	Cement Hranice	Чехия, Хранайс	Две мельницы по 27 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 10%
86	Май 2005	Tuyenquang Cement	Вьетнам	Мельница 12,8 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 18%
87	Октябрь 2005	Sungshin Cement	Республика Корея, Чанг-Бак	Ролл-пресс и мель- ница 157 т/ч с сепараторами, + инт., цемент	Увеличение питания на 21%
88	Октябрь 2005	Sungshin Cement	Республика Корея, Чанг-Бак	Мельница 95 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 5%
89	Октябрь 2005	Tong Yang Cement	Республи- каКорея, Самчеок- Сити	Мельница 207 т/ч с сепаратором, + инт., цемент	Увеличение питания на 5%
90	Январь 2006	Днепро- цемент	Украина, Днепро- дзержинск	Мельница 37 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 8%
91	Август 2006	Cement Ladce	Словакия, Ладсе	Мельница 85 т/ч с сепаратором, + инт., цемент	Увеличение питания на 9,5%
92	Январь 2007	Днепро- цемент	Украина, Днепро- дзержинск	Мельница 36 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 11%
94	Март 2007	Sungshin Cement	Республика Корея, Чанг-Бак	Мельница 168 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 12%

95	Март 2007	Sungshin Cement	Республика Корея, Чанг-Бак	Сырьевая мельница 338 т/ч и сепаратор	Увеличение питания на 4%
96	Май 2007	Lukavac Fabrika	Босния и Герцегови- на, Лукавац	Мельница 77 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
97	Май 2007	Lukavac Fabrika	Босния и Герцегови- на, Лукавац	Мельница 54 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 11%
98	Август 2007	Арарат- цемент	Армения, Арарат	Сырьевая мельница 120 т/ч и сепаратор	Увеличение питания на 16%
99	Сен- тябрь 2007	Holcim, Werk Hansa Bremen	Германия, Бремен	Мельница 70 т/ч и сепаратор, + инт., шлакоцемент	Увеличение питания на 7%
100	Октябрь 2007	Holcim Horne Srnie	Словакия, Горне Срние	Мельница 78,5 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 12,5%
101	Октябрь 2007	Cemmac, Horne Srnie	Словакия, Горне Срние	Мельница 54 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 16,5%
102	Январь 2008	Wopfinger	Австрия, Вопфинг	Роллер-пресс 90 т/ч, цемент	Увеличение питания на 6%
103	Октябрь 2008	Магнезит	Россия, Челябинск	Мельница 6 т/ч и сепаратор	Увеличение питания на 60%
104	Январь 2009	Adana Cimento	Турция, Адана	Ролл-пресс и мель- ница 110 т/ч с сепараторами, + инт., цемент	Увеличение питания на 9%
105	Февраль 2009	Adana Cimento	Турция, Адана	Мельница 86 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 9%
106	Февраль 2009	Adana Cimento	Турция, Адана	Мельница с сепаратором 75 т/ч, + инт., цемент	Увеличение питания на 8%
107	Сен- тябрь 2009	Nuh Cimento	Турция, Кочаели	Мельница 309 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 13%

108	Февраль 2010	Akcansa Cimento	Турция, Стамбул	Мельница 76 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
109	Февраль 2010	Akcansa Cimento	Турция, Стамбул	Мельница 69 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
110	Апрель 2010	Elazig Alt- nova Cimento	Турция, Елазиг	Мельница 80 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 12%
111	Апрель 2010	Mardin Cimento	Турция, Мардин	Роллер-пресс и мельница 85т/ч, с сепараторами, + инт., цемент	Увеличение питания на 8%
112	Июнь 2010	Mardin Cimento	Турция, Мардин	Роллер-пресс и мельница 100 т/ч, с сепараторами, + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
113	Сен- тябрь 2010	Спасск- цемент	Россия, Спасск- Дальний	Мельница 100т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 10%
114	Ноябрь 2010	Cimpor Cajati Cement	Бразилия, Кайати	Мельница 70 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 12%
115	Декабрь 2010	Askale Cimento	Турция, Эрзурум	Мельница 44 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 14%
116	Декабрь 2010	Askale Cimento	Турция, Эрзурум	Мельница 90 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 16%
117	Апрель 2011	Goltas Cimento	Турция, Испарта	Мельница 50 т/ч и сепаратор, цемент	Увеличение питания на 10%
118	Апрель 2011	Akcansa Cimento	Турция, Чанаккале	Роллер-пресс и мельница 165 т/ч с сепараторами, + инт., цемент	Увеличение питания на 9%, снижение инт., на 65%
119	Май 2011	Goltas Cimento	Турция, Испарта	Роллер-пресс на 3 мельницы 160 т/ч с сепараторами + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
120	Апрель 2012	NUH Cimento	Турция, Кочаели	Мельница с сепаратором 275 т/ч, + инт., цемент	Увеличение питания на 5,4%

Приложение 2

121	Июнь 2012	NUH Cimento	Турция, Кочаели	Роллер-пресс и мельница 112 т/ч с сепаратором, + инт., цемент	Увеличение питания на 7,2%
122	Июль 2012	Mus Yurt Cimento	Турция, Муш	Мельница 105 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 5%
123	Сен- тябрь 2012	Goltas Cimento	Турция, Испарта	Мельница 105 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 10%
124	Декабрь 2012	ЛСР цемент	Россия, Сланцы	Мельница 155 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 8,0%
125	Апрель 2013	MASS Cement	Ирак, Базиан	Мельница 132 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 20%
126	Август 2013	Nigde Cimento	Турция, Ниде	Мельница 128 т/ч и сепаратор, + инт., цемент	Увеличение питания на 4,3% снято 70% инт.
127	Ноябрь 2013	Akcansa Cimento	Турция, Стамбул	Роллер-пресс, V-сепаратор и мельница 125 т/ч с сепаратором, + инт., цемент	Увеличение питания на 12%

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избранные труды. М.: Наука, 1978. 368 с.
- 2. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 368 с.
- 3. Арсентьев В.А., Вайсберг Л.А., Зарогатский Л.П. Производство кубовидного щебня и строительного песка с использованием вибрационных дробилок. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 112 с.
- 4. Бутт Ю.М. Портландцемент. М.: Стройиздат, 1974. 328 с.
- 5. Пащенко А.А., Мясникова Е.А., Гумен В.С. и др. Теория цемента. К.: Будивельник, 1991. 168 с.
- 6. Дуда В. Цемент. M.: Стройиздат, 1981. 464 c.
- 7. Седов Л.И. Механика сплошной среды: в 2 т., Т.2. 6-е изд., стер, СПб..: изд. Лань, 2004. 560 с.
- 8. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Hayka, 1972. 307 с.
- Бутягин П.Ю. Химическая физика твердого тела. М.: МГУ, 2006.
 − 272 с.
- 10. Морозов Н.Ф. Математические вопросы теории трещин. М.: Наука, 1984. 256 с.
- 11. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М.: Наука, 1979. 384 с.
- 12. Зенгуил Э. Физика поверхности. М.: Мир, 1990. 536 с.
- 13. Ельцов С.В., Водолазкая Н.А. Физическая и коллоидная химия. Харьков. : XHУ, 2005. 242 с.
- 14. Нудель М.Э., Крыхтин Г.С. Особенности процесса сухого измельчения цементного сырья в поверхностно–активной среде. // Измельчение цементного сырья и клинкераа, Труды НИИЦемент, Вып. 36, 1976. С.34–52.
- 15. Ревнивцев В.И., Денисов Г.А., Зарогатский Л.П. и др. Вибрационная дезинтеграция твердых материалов. М.: Недра, 1992. 430 с.

- 16. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М.: Наука, 1973. 279 с.
- 17. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. 398 с..
- 18. Глухарев Н.Ф. Поверхностно–активные вещества и/или «ЭКОФОР»? // Цемент и его применение. 2010. № 2. С. 91–93.
- 19. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц. Новосибирск: Наука, 1993. 241 с.
- 20. Жуков А.Н. Электроповерхностные явления в капиллярных и дисперсных системах. СПб. :СПбГУ, 2012. 112 с.
- 21. Архипов В.И. Радиационно–диэлектрический эффект в полимерах. /В.И.Архипов, В.О.Никитенко , А.П.Тютнев//РАН. Химическая физика. Т.6, № 2. 1997. С. 103–109.
- 22. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю., Жаворонков Н.М. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. // Системный анализ процессов химической технологии. М.: Наука, 1985. 440 с.
- 23. Глухарев Н.Ф., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Шевченко А.О., Штабной В.А. Устройство для наложения техно–физических воздействий на структурируемые технологические переделы. // Патент РФ на изобретение. -1995. № 2100492.
- 24. Глухарев Н.Ф. Способ измельчения неэлектропроводного материала, цемент или добавка, полученные этим способом, а также способ повышения износостойкости мелющих тел и способ повышения текучести продукта с использованием способа измельчения. //Патент РФ на изобретение. 2009.
- № 2410159.
- 25. Губкин А.Н. Физика диэлектриков. –М.: ВШ, 1971. 274 с.
- 26. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоиздат, 1982. –320 с.
- 27. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Т.8. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 621 с.

- 28. Степанов А.В. Основы практической прочности кристаллов. М. : Наука, 1974. с. 132.
- 29. Урусовская А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов. М. УФН, 1968. Т. 96, вып. 1. С. 39 60.
- 30. Глухарев Н.Ф., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Шевченко А.О., Штабной В.А., Морозов В.С., Петров С.И. Способ физически—форсированной переработки измельчаемых материалов // Патент РФ на изобретение. 1995.
- № 2104789.
- 31. Пащенко А.А. Физическая химия силикатов. М.: ВШ, 1986. 470 с.
- 32. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практическое применение. М. : ИЛ., 1949. 718 с.
- 33. Остроумов А.Г. Пьезоэлектрики. –Л., 1957. 30 с.
- 34. Поплавко Ю.М. Физические механизмы пьезоэлектричества. / Ю.М. Поплавко, Ю.И. Якименко/: –Киев, УМК ВО, 1988. 98 с.
- 35. Пархоменко Э.И. Электрические свойства горных пород. М.: Наука, 1965. 164 с.
- 36. Пархоменко Э.И. Геоэлектрические свойства минералов и горных пород при высоких давлениях и температурах. М.: Наука, 1989. 193 с.
- 37. Нейштадт Н.М. Сейсмо– и пьезоэлектрические явления в разведочной геофизике. / Н.М.Нейштадт, З.В.Мазанова, Н.Д., Суворов./ СПб.: Недра, 1992. 61 с.
- 38. Глухарев Н.Ф. Электрофизический способ интенсификации сухого помола. // Цемент и его применение. -2004. -№ 1. -С. 6-8.
- 39. Глухарев Н.Ф., Зарогатский Л.П., Левинсон В.Г., Морозов В.С. Способ получения дисперсионно–кондиционированных порошковых материалов. // Патент РФ на изобретение. 1997. № 2122895.
- 40. Gloukharev N.F., Zarogatsky L.P., Levinson V.G., Morozov V.S. Method of producing powder materials. // European Patent. 2002. No.: EP 1 003 608 B1.

41. Gloukharev N.F., Zarogatsky L.P., Levinson V.G., Morozov V.S. Verfahren zur herstellung von pulverformigen material. // Deutsches Patent. – 2003.

- No.: DE 698 09 251 T2.

- 42. Глухарев Н.Ф., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Морозов В.С., Шевченко А.О., Штабной В.А. Способ производства цементного порошка. // Патент КНР на изобретение. 1997. № ZL97110709.2.
- 43. Gloukharev N.F., Zarogatsiy L.P., Levinson V.G., Morozov V.S. Method of producing powder materials. // United States Patent. 2002. No.: US 6,367,722 B1
- 44. Marceau M.L., Caffero A.M. Data analysis of electrostatic charge in a finish ball mill. // Washington: PCA R&D Serial No. 2855, 2005. 132 c.
- 45. Глухарев Н.Ф. Повышение производительности цементных мельниц с использованием устройств «ЭКОФОР». // Цемент и его применение. − 2000. № 1. − С. 20–22.
- 46. Кащеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта. М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.
- 47. Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели. ИГФ СО РАН. Новосибирск.1989.
- 48. Баранов Ю.В. Эффект А.Ф.Иоффе на металлах. М.: МГИУ, 2005. 140 с.
- 49. Осипьян Ю.А. Электронные свойства дислокаций в полупроводниках. М.: УРСС, 2000. 320 с.
- 50. Осипьян Ю.А. Взаимодействие электронов с дислокациями. М. Вестник РАН, 2006. Т. 76. № 10. С. 899 908.
- 51. Сальников А.Н., Гестрин С.Г. Заряженные дислокации и точечные дефекты в кристаллах (аналитические модели взаимодействия). Саратов. : СГТУ, 2002. 224 с.
- 52. Никифоров Ю.В. Основные направления развития цементной промышленности мира. // Труды XXIV совещания начальников лабораторий цементных заводов. М., 2013. С. 21–33.

- 53. Глухарев Н.Ф., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Шевченко А.О., Штабной В.А. Устройство для наложения техно-физических воздействий на структурируемые технологические переделы. // Патент РФ на изобретение. 1995. № 2100492.
- 54. Глухарев Н.Ф. Способ измельчения неэлектропроводного материала, цемент или добавка, полученные этим способом, а также способ повышения износостойкости мелющих тел и способ повышения текучести продукта с использованием способа измельчения. //Патент РФ на изобретение. − 2009. − № 2410159.
- 55. Зарогатский Л.П., Пирогова О.А., Сафронов А.Н. Вибрационная конусная дробилка. // Патент РФ на изобретение. 2009. № 2419488.
- 56. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
- 57. Бутт Ю.М. Портландцемент. M.: Стройиздат, 1974. 328 c.
- 58. Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашов В.В. Химическая технология вяжущих материалов. М., ВШ, 1980. 472 с.
- 59. Пащенко А.А., Сербин В.П., Старческая Е.А. Вяжущие материалы. К.: ВШ, 1985. 440 с.
- 60. Андреев С.Е., Товаров В.В., Петров В.А. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. М.: ГНТИ Черцветмет, 1959. 440 с.
- 61. Кафаров В.В., Вердиян М.А. Математические модели структуры потока материала в мельницах // Цемент. 1977. № 5. С. 9—11. № 6. С. 12—13.
- 62. Шувалов С.И., Михеев Г.Г. и др. Влияние структуры системы измельчения с шаровой мельницей на её производительность. // Цемент и его применение. -2011. -№ 5. C. 22-24.
- 63. Акунов В.И. Механизм оптимизации систем и типажей преобразователей потоков. // Измельчение цементного сырья и клинкера. Труды НИИ-Цемент, Вып. 36. — 1976. — С. 113 — 130.
- 64. Крыхтин Г.С., Кузнецов Л.Н. Интенсификация работы мельниц.

- Новосибирск: Наука, 1993. 241 с.
- 65. Пироцкий В.З. Управление зерновым составом цемента. // Труды
 XXIII совещания начальников лабораторий цементных заводов. М., 2010.
 С. 148 157.
- 66. Пироцкий В.З. Современные системы измельчения для портланд цементного клинкера и добавок. СПб, Из–во ЦПО, 2000, 71 с.
- 67. Биленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах. М., Недра. 1984, 200 с.
- 68. Пироцкий В.З. Основные направления модернизации цементных мельниц и оптимизации процесса сухого помола цемента. // Труды XXII совещания начальников лабораторий цементных заводов. М., 2007. С. 65 71.
- 69. Glukharev N. Intensification of dry grinding process by using the "ECO-FOR" device. // European cement conference 1999. Berlin, 1999. C. 22.1 22.3.
- 70. Glukharev N. A dose of dry medicine. // International cement review.September 2003. C. 71–72.
- 71. Glukharev N. Dry grinding and electro–physics. // Zement Lime Gypsum. 2007. No 5. C. 48–49.
- 72. Glukharev N. Debris- layer and cement. // International cement review. February 2010. C. 57–58.
- 73. Гурьянов А.Б. Концепция комплексной автоматизации Сименс (PCS & Simatic IT). // Труды шестой международной конференции по цементу ПЕТРОЦЕМ. СПб, 2010. С. 52 53.
- 74. Вердиян М.А., Бобров Д.А., Текучева Е.В. и др. Эксергический анализ процессов химической технологии (на примере технологии цемента). М. : РХТУ им. Д.И.Менделеева, 2004. 68 с.
- 75. Глухарев Н.Ф. Повышение производительности цементных мельниц с использованием устройства «ЭКОФОР». // Цемент и его применение. 2000. N_{\odot} 1. С. 20 22.

- 76. Глухарев Н.Ф. Энергосбережение в производстве цемента с использованием устройств «ЭКОФОР». // Цемент и его применение. -2002. -№ 1. C. 19 21.
- 77. Глухарев Н.Ф. Энергосберегающий способ нейтрализации негативных проявлений электризации в производстве цемента. // Цемент и его проявление. 2007. N 1. C. 72-74.
- 78. Глухарев Н.Ф., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Морозов В.С., Шевченко А.О., Штабной В.А. Способ производства силикатного кирпича. // Патент РФ на изобретение, 1996. № 2100308.
- 79. Глухарев Н.Ф. Технология «ЭКОФОР» за рубежом. 2003. № 1. 23 25.
- 80. Глухарев Н.Ф. Интенсификация сухого помола по технологии «ЭКО-ФОР». // Международная конференция "UkrCemFor 2007". / Яремча, Укра-ина. С. 73 80.
- 81. Glukharev N. Electrophysical technology for energy saving in cement grinding. // Cement and concrete world. March-April 2013. C. 82–85.
- 82. Досков К. Факторы, влияющие на размалываемость цементного клинкера: подготовка сырья, условия обжига и охлаждения, его минералогический и кристаллографический состав. // ALIT Inform — Цемент, Бетон. Сухие смеси. — 2009. — \mathbb{N} \mathbb{N}
- 83. Мерик Ж.П. Влияние помола и хранение клинкера. // VII международный конгресс по химии цемента. Париж, 2000. С. 87 106.
- 84. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента. Белгород: Изд–во БГТУ, 2012. 308 с.
- 85. ГОСТ 310.2–76. Цементы. Методы определения тонкости помола.– Введ. 01.01.1978.
- 86. ГОСТ 30515-97. Цементы. Общие технические условия. Введ. 10.01.1998.
- 87. ГОСТ 30744–2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. Введ. 20.08.2001.

- 88. Crawley G.M. Real–time process optimization using dry in time particle sizing. // European cement conference 2001. Dresden, 2001. C.11.1 11.8.
- 89. Looser B. On–line particle size analysis. // Труды шестой международной конференции по цементу ПЕТРОЦЕМ. СПб, 2010. С. 100 102.
- 90. Маколэй С., Крутиков Д.М. Переход от измерений по Блейну к гранулометрическому анализу методом лазерной дифракции. // Цемент и его применение. -2011. -№ 2. -С. 115–119.
- 91. Глухарев Н.Ф., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Морозов В.С., Шевченко А.О., Штабной В.А. Способ механосепарации свежемолотых структуризационных материалов. // Патент РФ на изобретение. 1996. № 21010097.
- 92. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. СПб. Изд. Профессия, 2003. 752 с.
- 93. Глухарев Н.Ф. Интенсификация замкнутых систем помола. // Цемент и его применение. -2005. -№ 1. C. 42 46.
- 94. Zurhove F.–J. Latest roll design for Polycom high–pressure grinding rolls. European cement conference 1999. Berlin, 1999. C. 13.1 13.5.
- 95. Кайсснер М. Модульные конструкции вертикальных валковых мельниц. //Цемент и его применение. -2007. -№ 2. C. 46–49.
- 96. Nielsen H.J. Revolutionary power saving and increased production on vertical mills. // European cement conference 1999. Berlin, 1999. C. 23.1 23.6.
- 97. Lee Hyung–Woo. Trials of the ECOFOR device at Hanil Cement. // Global Cement and Lime Magazine. 2001. September. C. 67 68. October. C. 54.
- 98. Glukharev N. Ecofor neutralization technology for intensification of dry grinding. // European cement conference 2001. Dresden, 2001. C. 28.1–28.4.
- 99. Судакас Л.Г. Технология измельчения и активность цементов. // Труды XXIII совещания начальников лабораторий цементных заводов. М., 2010. С. 144 148.
- 100. Zurhove F.–J. Latest roll design for Polycom high–pressure grinding rolls. European cement conference 1999. Berlin, 1999. C. 13.1 13.5.

- 101. Щеголяев Е.В. Высокоэффективная система измельчения COMFLEX®. // Цемент и его применение. -2011. № 1. C. 95-100.
- 102. Глухарев Н.Ф. Процессы помола цемента на валках высокого давления. // Цемент и его применение. -2008. -№ 2. -C.79–80.
- 103. Самнер М. Оптимизация затрат при использовании технологических добавок. // Цемент и его применение. -2008. -№ 1. C. 155 159.
- 104. Cornille J. P. Horomill: latest development and results. // European cement conference 1999. Berlin, 1999. C. 21.1 21.2.
- 105. Эдет.Э. Помольная установка Horomill®. // Цемент и его применение.
 2012. № 1. С. 188–192.
- 106. Файге Ф. Цементная промышленность сегодня и завтра тенденции и рассуждения о цементном заводе будущего. // Цемент и его применение.
- $-2001. N_{2} 1. C. 6 12.$
- 107. Doskov K. Usage of cement activators (improvers) during grinding process цемента. // Труды пятой международной конференции по цементу ПЕТРО-ЦЕМ. – СПб, 2008. – С. 148 – 150.
- 108. Соттили А., Падовани. Д., Браво А. Механизм действия интенсификаторов помола в цементном производстве. // Цемент и его применение. 2002. N_{\odot} 5. С. 19 22.
- 109. Schrabback J.M. Additive solutions for optimized cement grinding and quality. // Труды шестой международной конференции по цементу ПЕТРО-ЦЕМ. СПб, 2010. С. 60-62.
- 110. Крыхтин Г.С. Влияние ПАВ на формирование гранулометрического состава цемента при измельчении клинкера. // Измельчение цементного сырья и клинкера, Труды НИИЦемент, Вып. 36, 1976, С. 74–85.
- 111. Нудель М.Э., Крыхтин Г.С. Особенности процесса сухого измельчения цементного сырья в поверхностно—активной среде. // Измельчение цементного сырья и клинкераа, Труды НИИЦемент, Вып. 36, 1976 С. 34–52.
- 112. Савилов С.И., Гайнутдинов Р.М.,Никоненко С.Г. Практика применения интенсификатора помола «INCEM» на цементных предприятиях РФ. //

- Труды XXIII совещания начальников лабораторий цементных заводов. M., 2010. C. 208 212.
- 113. Шахова Л.Д. Повышение эффективности производства цемента технологическими добавками нового поколения фирмы «Полипласт».// Труды седьмой международной конференции по цементу ПЕТРОЦЕМ. СПб, 2012. С. 65 66.
- 114. Гаврюшин А.Д., Дарчук С.И., Файнер М.Ш. Полифункциональные интенсификаторы помола цемента. // Международная конференция "UkrCemFor 2007" / Яремча, Украина. С. 225 228.
- 115. Glukharev N. The death knell for grinding aids? // European cement magazine. September 1999. C. 26–29.
- 116. Хетагуров В.Н., Коменецкий Е.С., Гегелашвили М.В. Центробежная мельница вертикального типа для производства минеральных порошков.
- // Строительные материалы. -2002. -№ 10. C. 35 37.
- 117. Кушка В.Н. Измельчительный комплекс КИ нового поколения. // Строительные материалы. 2010. № 7. С. 68 69.
- 118. Глухарев Н.Ф. ЭКОФОР экономию несущий. // Индустрия. 2001.
 № 4. С. 30 31.
- 119. Глухарев Н.Ф. Принцип Ле Шателье и обжиг клинкера. // Цемент и его применение. -2012. -№ 2. C. 88 89.
- 120. Глухарев Н.Ф., Анисимов М.И., Дмитриев А.Г., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Морозов В.С. Шевченко А.О., Штабной В.А. Способ производства слитков. Патент РФ на изобретение. // 1996. № 2104120.
- 121. Глухарев Н.Ф. Способ производства проводоки из алюминиевого сплава. Патент РФ на изобретение. // 1996. № 2101107.
- 122. Варюшенков А.М., Глухарев Н.Ф., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Малков В.А., Шварцман А.Я., Шевченко А.О., Штабной В.А. Способ получения углеродного материала. Патент РФ на изобретение. // − 1995. − № 2096320.

- 123. Глухарев Н.Ф., Ивахнюк Г.К., Левинсон В.Г., Малков В.А., Скорохватов А.А., Шевченко А.О., Штабной В.А. Способ переработки торфа в крупнокусковой углеродный восстановитель. Патент РФ на изобретение. //-1995. № 2083636.
- 124. Глухарев Н.Ф., Левинсон В.Г., Морозов В.С. Способ испарения жид-кости. Патент РФ на изобретение. // 1997. № 2128804.
- 125. Тарелин А.А., Скляров В.П., Верес О., Сурду Н.В. Электрофизические явления в паровых турбинах. // Промышленная теплотехника. № 4-5. С. 98-102.

Научное издание

Глухарев Николай Федорович

СУХОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОНЕЙТРАЛИЗАЦИИ

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93, т. 2; 95 3004 — научная и производственная литература

Подписано в печать 13.03.2014. Формат 60х84/16. Печать цифровая. Усл. печ. л. 12,0. Тираж 500. Заказ 11667b.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором, в типографии Издательства Политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Тел.: (812) 550-40-14.

Тел./факс: (812) 297-57-76.

