

УДК 693

# ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА НАНОЦЕМЕНТОВ

А.Н. БУКРЕЕВ, технический директор ООО «Оргпроектцемент», М.Я. БИКБАУ, доктор хим. наук, академик Российской академии естественных наук, генеральный директор ОАО «Московский ИМЭТ»

Ключевые слова: измельчение, технологическая схема, клинкер, портландцемент, мельница, наноцемент, минеральная добавка  
Keywords: crushing, process diagram, clinker, Portland cement, mill, nanocement, mineral additive

**В статье рассматриваются технологические схемы процесса измельчения – основного этапа производства наноцемента, представляющие собой оптимизацию энерго- и трудозатрат относительно требуемых дисперсных характеристик, таких как тонкость помола, зерновой состав.**

Процесс измельчения портландцементного клинкера и его модификация в наноцемент – завершающая стадия производства как портландцемента, так и наноцемента, что в значительной мере определяет эффективность технологии в целом и качество получаемых продуктов.

Помол портландцемента и его модификация в наноцемент на цементном заводе довольно хорошо отработаны технически и оснащены технологически для массового производства цемента. В настоящее время главной задачей производителей оборудования для помола является выпуск наиболее экономичных помольных агрегатов и технологических линий.

Основная задача процесса измельчения – оптимизация энерго- и трудозатрат относительно требуемых дисперсных характеристик, таких как тонкость помола, зерновой состав. Обычно, удельные энергозатраты на измельчение клинкера и добавок составляют от 40 до 50 кВт·час/т для портландцемента с удельной поверхностью 300...320 м<sup>2</sup>/кг, наноцементы удается измельчать

до более высоких удельных поверхностей – от 400 до 600 м<sup>2</sup>/кг и выше при практически тех же удельных энергозатратах [1].

Этот феномен может быть объяснен эффектом Ребиндера [2], когда частички модификатора – нафталинсульфоната натрия, адсорбированные в клинкерные зерна, при внешнем локальном давлении мелющих тел подвергаются гидравлическому удару и разывают материал.

Результаты процесса измельчения, в т.ч. дисперсные характеристики готового продукта – гранулометрия и удельная поверхность, удельные энергозатраты, зависят от целого ряда факторов. Основные из них:

- физико-технологические свойства клинкера и минеральных добавок (крупность, измельчаемость, температура, влажность и др.) и заданные строительно-технические свойства портландцемента или наноцемента (требуемая дисперсность готового продукта, температура, активность, класс и др. физико-механические свойства);

- технико-технологические параметры и характеристики трубной мельницы (мощность, частота вращения барабана, масса и состав мелющих тел, диаметр барабана, соотношение длин камер);

- тип и конструктивные параметры внутримельничных элементов (междукамерная и выходная диафрагмы, бронифутеровка и др.);

- аэродинамический и температурный режимы мельницы;

- схемы измельчения и классификация (предызмельчение, открытый или замкнутый цикл, тип сепаратора и др.).

Помольные системы и технология должны обеспечивать: оптимальные и стабильные дисперсные характеристики цемента; энергетическую эффективность процесса измельчения; расчетную производительность; социально-экологические требования; надежность, долговечность, минимальные затраты на эксплуатацию и ремонт.



Рис. 1. Основной агрегат цементной промышленности для измельчения цемента – двухкамерная шаровая мельница

## Дисперсные характеристики портландцемента и наноцемента

Качество дисперсных характеристик цемента оценивается по содержанию крупных фракций, удельной поверхности и зерновому составу цемента. С повышением требований к качеству цемента расширяются диапазон и методы оценки дисперсности. Наряду с оценкой по содержанию крупных классов —  $\Sigma R_{008}$ ,  $\Sigma R_{004}$ , удельной поверхности —  $S$  ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ) в заводской технологии все шире используется оценка по зерновому составу, характеризующая содержание фракций по всему диапазону, —  $K=f(d)$ .

Показатели зернового состава цемента оцениваются по параметрам уравнения RRB: коэффициенту однородности — « $n$ » ( $d/d$ ) и характеристическому размеру зерна — « $d$ »,  $\mu\text{м}$ . Первый характеризует структуру зернового состава (широкий, нормальный, узкий), второй — собственно дисперсность. Для портландцементов значения « $n$ » находятся в пределах 0,7...1,1, « $d$ » — 10...30  $\mu\text{м}$ . Качество для данного класса прочности определяется соотношением фракций -5  $\mu\text{м}$  и фр. +5-30  $\mu\text{м}$ .

При обосновании тонкости помола цементной шихты в России ориентируются на следующие характеристики: марке «400» соответствует остаток на сите 008 от 5 до 8%, а соответствующая этим значениям удельная поверхность — 250-300  $\text{м}^2/\text{кг}$ , марке «500» — 2-6% остатка и удельная поверхность 320-360  $\text{м}^2/\text{кг}$ , для наноцементов всех классов — не более 1% остатка и оптимальная удельная поверхность 400-600  $\text{м}^2/\text{кг}$ .

## Энергетическая эффективность процесса

Данный показатель работы систем измельчения характеризуется значениями удельных энергозатрат на измельчение одной тонны цемента. При этом различают удельные энергозатраты на процесс измельчения, характеризующие энергетическую эффективность измельчителя и суммарные удельные энергозатраты всей технологической системы измельчения. Для современных технологических систем измельчения значение удельных энергозатрат находится в пределах 35...60  $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$  в зависимости от дисперсных характеристик цемента.

## Механизм измельчения

Значительное влияние на эффективность помола цемента имеет шаровая загрузка в мельницах. Для каждого агрегата на цементных заводах подбирается оптимальная шаровая загрузка — по размеру, ассортименту и массе мелющих тел — шаров или цилиндров (цельпесба). Цельпесба традиционно применяется в России и странах СНГ, имеет более развитую поверхность, обычно загружается в последнюю камеру. При этом повышается эффективность истирания материала, позволяя достигать более высокой дисперсности измельчения.

При помоле наноцементов всех классов разработчики технологии наноцемента рекомендуют применение цельпесба именно в последней камере шаровой мельницы. Однако если в последней камере цементной мельницы

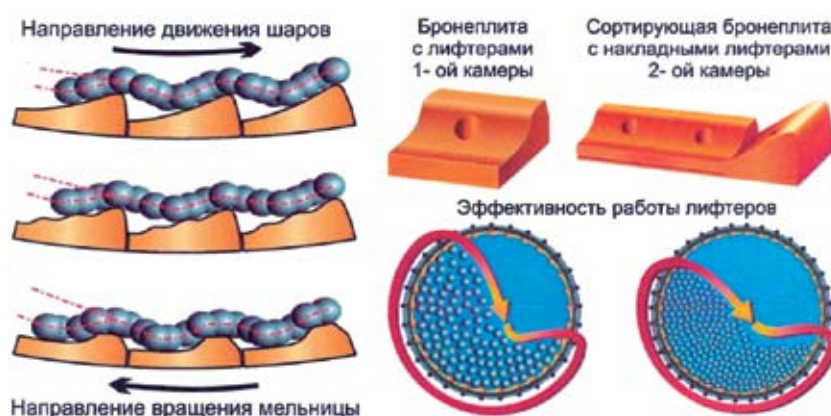


Рис. 2. Механизм перемещения мелющих тел в шаровой мельнице

загружен мелкий шар, то это также допускается. При модификации портландцемента (а не клинкера) целесообразно применение цилиндров и цельпесба и в первых камерах шаровых мельниц. В этом случае подбор мелющих тел должен учитывать вид и свойства минеральных добавок, измельчаемых совместно с портландцементом.

**Технологическая стабильность.** Данный показатель характеризует в основном стабильность дисперсных характеристик и производительность в межвосстановительный период. В современных технологических системах измельчения, оснащенных в основном трубными мельницами, этот показатель отличается высоким постоянством.

**Гибкость систем измельчения и управляемость.** Эти характеристики определяют возможности системы в отношении перенастройки, ввода в режим; чувствительность к колебаниям, число и эффективность управляющих воздействий. Так, в современных системах измельчения управление процессом осуществляется весовой подачей материала, режимом работы сепаратора.

**Единичная производительность и мощность.** Эти показатели оцениваются, соответственно, по часовой, суточной и годовой производительности и по установленной мощности главного привода мельницы.

**Удельная металлоемкость.** Обычно характеризуется массой оборудования систем измельчения или измельчителя, отнесенного к часовой производительности. Этот показатель для систем измельчения при выпуске цемента нормальной дисперсности составляет 6...8  $\text{т}/\text{т}\cdot\text{ч}$ .

**Износ мелющих поверхностей (мелющих тел, бронепутровки, диафрагм и др.).** Этот показатель оценивается по потере массы измельчающих поверхностей, отнесенной к тонне готовой продукции ( $\text{кг}/\text{т}$ ). Износ отечественной продукции (бронеплиты, мелющие тела) составляет в среднем 1  $\text{кг}/\text{т}$ .

**Надежность.** Этот показатель характеризует «качество» мельницы, оборудования всей технологической системы и системы управления. Оценивается коэффициентом технического использования, а также другими показателями — продолжительностью безотказной работы, межвосстановительным периодом др. Значение КТИ составляет 0,75...0,85.

**Экологичность систем измельчения.** Этим показателем оценивается запыленность рабочих мест и выбросов в атмосферу, шум, вибрация, температура и др.

Решение проблем получения высокодисперсных компонентных цементов (ВКЦ) и вяжущих (ВКВ), наноцементов реализуется с помощью систем измельчения, которые базируются на формировании рационального зернового состава, а также на оптимальных принципах и способах управления системами измельчения, поэтому системы измельчения необходимо рассматривать в основном с позиции формирования зернового состава.

Влажность дозируемых в мельницу гидравлических добавок не должна превышать при выпуске портландцемента или наноцемента 2%, при выпуске шлакопортландцемента – 1%. Допустимая влажность гипса – 10%. Суммарная влажность цементной шихты с учетом влажности добавок и гипса не должна быть выше 1,5%.

Не все экономичные помольные агрегаты и технологические линии без изменения их параметров подходят для производства наноцементов, так как продукт отличается от рядовых цементов характеристиками, которые необходимо получить в процессе производства. Однако следует отметить, что многие технологические линии на действующих цементных заводах как мокрого, так и сухого способа производства удовлетворяют требованиям, предъявляемым при производстве наноцементов.

Для помола рядового портландцемента применяются установки с шаровыми трубными мельницами, работающими как по открытому, так и по замкнутому циклам с классификацией измельчаемого материала в центробежных сепараторах. Изменив определенные параметры, эти линии можно приспособить для производства наноцементов.

По обычной технологической схеме при производстве цемента на цементных заводах происходит следующий порядок работы. Клинкер, добавки и гипс загружают в бункера установки из склада грейферным краном или конвейером. Подача в мельницу клинкера, гипса и добавок осуществляется способом весового дозирования из отдельных бункеров.

Схемой предусматривается подача в мельницу исходных материалов: клинкера, гипса, добавок в определенном соотношении. Для выпуска наноцемента еще потребуется бункер для модификатора.

При измельчении материалов образуется цементная пыль. Для того чтобы исключить проникновение пыли в помещение цеха, на каждой мельнице устанавливается система аспирации (аспирационная коробка, фильтр). Вращение мельниц осуществляется электроприводом.

В настоящее время помольный парк России оснащен в основном трубными мельницами отечественного производства, работающими в открытом цикле, следующих типоразмеров: 4,0x13,5 м; 3,2x15,0 м; 3,0x14,0 м; 2,6x13,0 м; 2,2x13,0 м.

Масса мелющей загрузки для указанных выше типоразмеров мельниц следующая: 4,0x13,5 м (220 т); 3,2x15,0 м (140 т); 3,0x14,0 м (110 т); 2,6x13,0 м (80 т).

Мощность электродвигателя, соответственно: 3200, 2000, 1600, 1000 кВт.

Вновь построенные заводы оснащены другими, более мощными цементными мельницами.

Изменение физико-механических характеристик исходных компонентов (гранулометрического состава, влажности, размолоспособности и др.) приводит к отклонению режима помола от номинального значения. Технологическая наладка каждого агрегата, т.е. загрузка агрегата и догрузка его таким количеством мелющих тел, при котором выполнялось бы условие максимальной производительности при заданной тонкости помола, должна выполняться регулярно.

Характеристики многокамерной шаровой трубной мельницы могут изменяться также из-за перераспределения в процессе помола материала между камерами.

### Помол в замкнутом цикле

Из бункеров материал весовыми дозаторами подается по ленточному конвейеру в двухкамерную сепараторную мельницу. В первой камере происходит предварительный размол материала, и смесь в виде готового цемента и крупки через щели в перегородке барабана просыпается в пространство разгрузочного устройства, откуда через окна в корпусе поступает на барабан электромагнитного сепаратора для отделения металлических включений. Далее смесь по аэрожелобу направляется в элеватор.

Аэрожелоб представляет собой короб, разделенный в горизонтальной плоскости мягкой перегородкой на две камеры. В верхнюю камеру поступает смесь, а в нижнюю вентилятором нагнетается воздух под напором около 500 мм вод. ст. Угол наклона аэрожелоба 12°. Воздух, проникая через поры мягкой перегородки, образует в верхней камере желоба текучий поток аэросмеси, который и движется наклонно к элеватору. Поднятая вверх элеватором смесь по аэрожелобам направляется в два циркуляционных воздушных сепаратора. Классифицированный готовый цемент из сепараторов через «мигалки» направляется в аэрожелоб готового цемента и далее в двухкамерный пневматический насос.

Выделенная в сепараторах крупка попадает в двухветвенный аэрожелоб и аэрожелоб с углом наклона 5°. Аэрожелоб может транспортировать крупку как в первую камеру мельницы, так и во вторую; при перегрузке второй камеры часть крупки может быть направлена по аэрожелобу снова в первую камеру. Аэрожелобом крупка транспортируется только во вторую камеру мельницы через окно разгрузочного устройства, которое состоит из двух перегородок с направляющими лопастями.

Во второй камере мельницы цементная крупка почти полностью размалывается до готового продукта: цемента, который по аэрожелобу направляется в пневмонасос. В готовом продукте может быть небольшое количество и неизмельченной крупки. В этом случае смесь направляется через магнитный сепаратор, аэрожелоб, элеватор и двухветвенный аэрожелоб в циркуляционные воздушные сепараторы, т.е. цикл повторяется. Таким образом, смесь (крупка) циркулирует 4-5 раз, пока она полностью не превратится в готовый продукт.

Для увеличения производительности помольной установки мельница принудительно аспирируется мощным вентилятором (дымососом), который, просасывая чистый воздух

через мельницу, удаляет из мельничного пространства мелкие частицы пыли, образующей цементную «подушку». Последняя затрудняет помол, так как обволакивает мелющие тела.

По выходе из мельницы воздушная смесь дважды очищается от цементной пыли. Для первой (грубой) очистки применяют аспирационную шахту и батарейный циклон, где осевшие частицы цементной пыли, сползая по стенкам циклона, через «мигалку» попадают в аэрожелоб и далее в двухкамерный насос. В батарейных циклонах осаждаются до 80% всей пыли, находящейся в воздушной смеси. После циклонов очищенная воздушная смесь проходит тонкую очистку в электрофильтре, где цементная пыль оседает в бункере и далее через «мигалку» направляется в двухкамерный пневматический насос, а затем на склад цемента. Степень очистки в электрофильтре достигает 98-99%. На новых заводах сейчас устанавливаются рукавные фильтры.

Замкнутый цикл помола включает помольный агрегат и центробежный сепаратор, отделяющий крупные зерна, возвращаемые на домол, в результате чего достигается высокая тонкость помола. Помольные установки, работающие по замкнутому циклу, дают возможность тонко измельчить клинкер (до удельной поверхности 400-500 м<sup>2</sup>/кг) и регулировать в цементе содержание частиц различного размера, что необходимо для получения быстротвердеющего и других специальных портландцементов. При помоле клинкера добавляют гипс (так, чтобы общее содержание SO<sub>3</sub> в цементе было не более 3,5%) для регулирования сроков схватывания портландцемента.

Помол по замкнутому циклу в сравнении с помолом по открытому циклу эффективнее в случаях, когда необходимо получить цементы с высокой удельной поверхностью (например, наноцемент или быстротвердеющие и специальные цементы).

В случае помола цемента до значений удельной поверхности 250-280 м<sup>2</sup>/кг замкнутый цикл не имеет заметных преимуществ по сравнению с открытым. Цементы с удельной поверхностью более 350 м<sup>2</sup>/кг получать помолом по открытому циклу неэффективно. В связи с тенденцией повышения доли высокомарочных цементов в общем объеме производства при проектировании новых отделений помола цемента необходимо ориентироваться на схемы помола по замкнутому циклу.

С целью снижения расхода электроэнергии и повышения производительности помольного оборудования рекомендуется предусматривать дробление клинкера, добавок и

гипса до 15-30 мм, причем для клинкера следует применять прессвалковые измельчители и конусные дробилки.

В процессе измельчения температура в мельнице не должна превышать 100°С из-за опасности получения цемента, характеризующегося ложным схватыванием. Для снижения температуры следует предусматривать подачу в мельницу воды, распыленной с помощью форсунок, в количестве 0,5-1,0% от массы цемента. Необходимо также предусмотреть установку после мельниц охладителей цемента. С целью интенсификации процесса измельчения следует использовать поверхностно-активные вещества. Для этого мельница должна быть снабжена установками по их вводу, оборудованными дозирующими устройствами.

Помольные системы, работающие в замкнутом цикле с сепаратором, обладают технологическими преимуществами. К ним относятся:

- расширение границ дисперсности цемента до  $S=400...600$  м<sup>2</sup>/кг и соответственно улучшение его физико-механических свойств;
- формирование более равномерного зернового состава цемента с повышенным содержанием средних и пониженных, тончайших и крупных фракций, что способствует снижению удельных энергозатрат;
- понижение температуры процесса измельчения в самой мельнице и цемента на 20...40°С;
- снижается тормозящее процесс измельчения действие мелкой фракции;
- управляемость качеством дисперсных характеристик цемента (ДХЦ) изменением режима работы сепарации и переход на требуемый режим без переналадки мельницы.

Основная особенность процесса измельчения в замкнутом цикле – измельчение циркулирующего в мельнице материала до промежуточной тонкости ( $\sum R_{008} \approx 20...40\%$ ). Увеличение скорости прохождения измельчаемого материала является основным фактором повышения (на 20...40%) эффективности процесса измельчения.

Работа по измельчению осуществляется только в мельнице. Сепаратор лишь отделяет мелкую (готовую) фракцию, которая уже содержится в размолотом материале.

На цементных заводах применяются различные технологические схемы помола цемента в замкнутом цикле с сепараторами:

- помол на «проход», когда материал проходит все камеры мельницы и в виде грубого продукта с помощью элеватора направляется в сепаратор, в котором осуществляется разделение измельченного материала на готовый продукт – цемент и крупку. Готовый цемент направляется на склад, крупка возвращается на допомол в первую или во вторую камеры мельницы или же распределяется между ними;

- помол с одновременной выгрузкой грубого продукта из первой и второй камер мельницы и подачи в одни и те же сепараторы осуществляется в случае, когда крупка возвращается во вторую камеру или распределяется между первой и второй камерами мельницы. Кроме того, существует

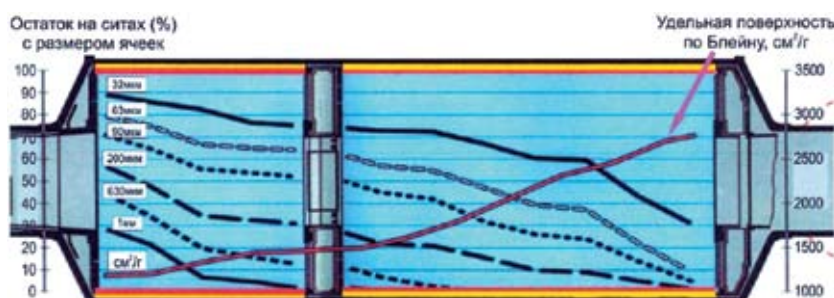


Рис. 3. Изменение удельной поверхности при помоле портландцемента по длине шаровой мельницы

способ, при котором выгрузка готового продукта происходит одновременно из мельницы и сепаратора.

Таким образом, имеется большое число вариантов технологических схем процессов помола в замкнутом цикле. Общим для всех этих систем является установка сепараторов и циркуляционных линий, отличие – в распределении материальных потоков.

Наибольшее распространение в цементном производстве в РФ и странах СНГ получили две конструкции мельниц (3,2x15 и 4x13,5), работающие по схеме замкнутого цикла.

Цементные мельницы 3,2x15 имеют промежуточную выгрузку, один элеватор и два сепаратора. Материал выгружается из обеих камер и транспортируется в центробежные сепараторы с помощью элеватора.

Крупные фракции возвращаются на домол во вторую и частично в первую камеру. Тонкие фракции из сепараторов и уловленная пыль представляют собой готовый цемент. Предусмотрена возможность работы мельницы и по открытому циклу. Система аспирации состоит из 3-х ступеней очистки – аспирационной шахты, циклонов и рукавного фильтра.

Помол в мельнице 4x13,5 осуществляется по схеме замкнутого цикла без промежуточной разгрузки. Используются два центробежноциклонных сепаратора, питаемых с помощью одного элеватора. Крупные фракции, выделяемые в центробежных частях сепараторов, направляются на домол в первую камеру, а тонкие, выделяемые в выносных циклонах (их в схеме сепаратора – 5), представляют собой готовый цемент, который далее направляется в силосы для хранения.

## Сепараторы

Основной элемент сепарационного комплекса в современной помольной установке для измельчения цемента – сепаратор, в котором происходит разделение исходного дисперсного материала по размерам на фракции – крупную (крупку) и мелкую (готовый продукт). Необходимые условия протекания процесса сепарации:

- однородность поля скоростей воздушного потока;
- различная функциональная зависимость от размера частицы и противоположная направленность действующих сил;
- по границе разделения, характеризующейся размером частицы  $d_{гр}$ , в зоне сепарации устанавливается динамическое равновесие: частицы  $< d_{гр}$  выносятся из зоны в одном направлении, а частицы  $> d_{гр}$  в противоположном.

Работа большинства сепараторов основана на поперечно-поточном центробежном принципе зоны разделения частиц по массе и размерам, в котором частицы с потоком и на них действуют:

- центробежная сила, которую создает вращающаяся с большой скоростью тарелка, направленная горизонтально по радиусу к периферии;

- сила давления потока воздуха, направленная вертикально вверх;

- сила тяжести самих частиц, направленная вниз.

Точность разделения – важнейший показатель, который характеризует работу сепаратора и зависит от свойств материала, формы частиц, влажности, концентрации, требуемой дисперсности, типа сепаратора. В идеальном сепараторе материал разделяется строго на тонкую и грубую фракции по границе разделения. В реальных условиях всегда тонкая фракция загрязняется грубыми частицами, а грубая – тонкими.

КПД сепаратора характеризует отношение содержания тонких фракций в готовом –  $D_g$  к тонкой фракции в исходном:

$$\eta = K_c \times D_g$$

Но данная формула не учитывает «загрязнение» готового продукта крупными фракциями. Точность разделения лучше отражает показатель эффективности –  $E$ :

$$E = (D_g - D_i) \times (D_i - D_{кр}) / D_i (100 - D_i) \times (D_g - D_{кр}) \times 104, \%$$

Значение  $E$  для промышленных сепараторов составляет 60...80%.

Особенность современных сепараторов – центробежно-проходной принцип и открытая схема движения воздушного потока в сочетании с мощной роторной системой и системой воздушных коллекторов (рис. 4).

Расход воздуха на классификацию составляет 800...1200 м<sup>3</sup>/т.

Использование сепараторов позволяет осуществлять регулирование гранулометрического состава получаемого продукта, повысить эффективность работы схемы из-

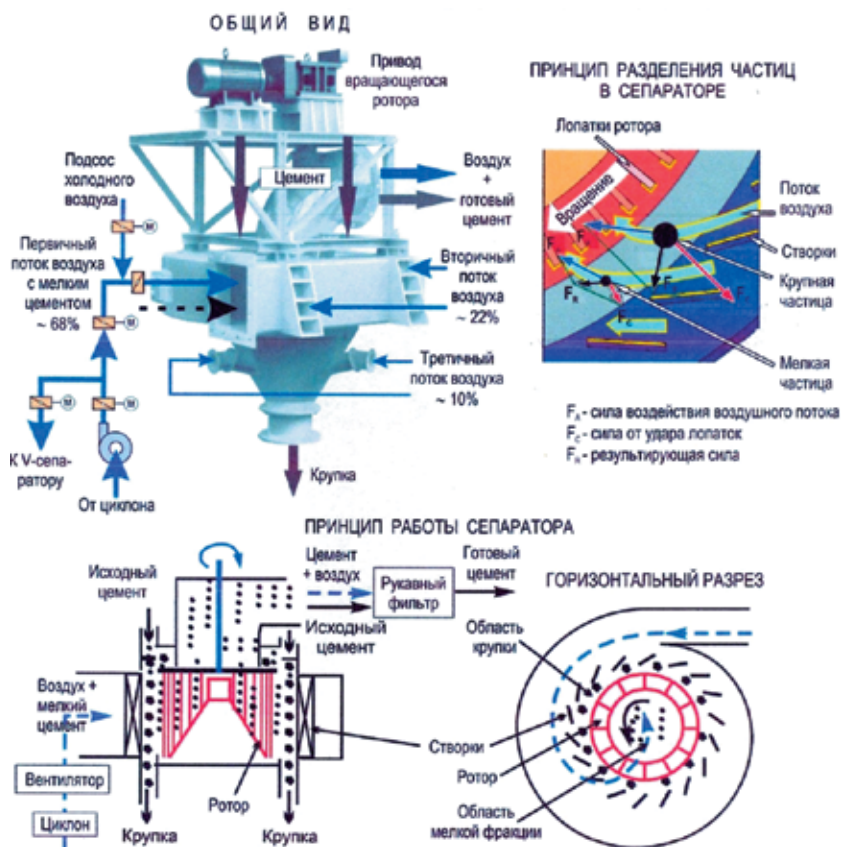


Рис. 4. Сепараторы цемента и принцип работы агрегата

мельчения и обеспечить получение материала с высокими значениями удельной поверхности.

Для трудноразмалываемых материалов требуется повышенная кратность циркуляции. При длинных мельницах время размола дольше, а следовательно, кратность циркуляции меньше. При помоле цемента в шаровых мельницах большого диаметра наиболее выгодная кратность циркуляции колеблется в пределах 6-9.

При помоле цемента в двух- или трехкамерных мельницах в зависимости от их длины оптимальное значение кратности циркуляции составляет 2,5-5.

С увеличением тонкости готового продукта кратность циркуляции возрастает, а с увеличением к.п.д. сепаратора — снижается.

Таким образом, для каждой помольной установки имеется свой оптимальный режим при наиболее выгодном значении кратности циркуляции.

Оптимальное значение кратности циркуляции установки определяют испытанием установки при различной тонкости помола материала, подаваемого в сепаратор, с обязательным определением количества готового продукта. При модификации как портландцементного клинкера или портландцемента в наноцемент возможна эффективная работа помольной установки в открытом цикле — без сепаратора.

### Современные агрегаты для помола наноцементов

В последнее время шаровые трубные мельницы частично замещаются более экономичными помольными агрегатами: тарельчато-валковыми вертикальными мельницами и прессвалковыми измельчителями (роллер-прессами). Устройство и принцип работы этих агрегатов показаны на рисунках.

Однако тарельчато-валковые вертикальные мельницы для производства цемента в России мало распространены и не опробованы для производства наноцементов, поэтому в данной статье не рассматриваются.

### Прессвалковый измельчитель

Принцип измельчения в пресс-валках — *внутрислойное самоизмельчение*, суть которого состоит в том, что между измельчающими поверхностями происходит разрушение в слое материала под воздействием высокого давления, при этом отдельные зерна материала передают давление на соседние. Происходит разрушение большей их части в самих зернах, при этом сохраняются их размеры, но образуются микро- и макротрещины по всему объему. Отличительными особенностями этого процесса являются:

- высокое давление, равное или более 50 МПа, передаваемое измельчаемому материалу, под воздействием которого происходит изменение физического свойства частиц, их

разупрочнение, что, в свою очередь, способствует снижению энергозатрат при дальнейшем, более тонком измельчении;

- одновременное протекание двух процессов — разрушение и агломерация (сцепление разрушенных зерен друг с другом) разрушенного материала с образованием плотной «ленты» из прессованного материала.

Процесс по принципу «измельчения в слое» (рис 5, 6) реализуется в прессвалковых измельчителях, основой которых являются два горизонтально расположенных валка с отдельными приводами, один из которых неподвижен. Другой перемещается в горизонтальном направлении, тем самым создавая высокое давление в зоне измельчения.

Измельчение в слое происходит при условии, когда объем материала, подаваемого на валки за определенный период времени, должен превышать объем материала, образующийся между валками в зависимости от ширины и окружной скорости валков.

Принцип действия: валки захватывают определенное количество материала из вышерасположенного слоя и создают соответствующее критическое, разрушающее материал давление внутри слоя между валками.

Более крупные зерна предварительно измельчаются в верхней зоне, и только затем происходит их разрушение. Степень измельчения достигает 60. Средний размер зерен, выходящих из пресс-валков, — 480 мкм.

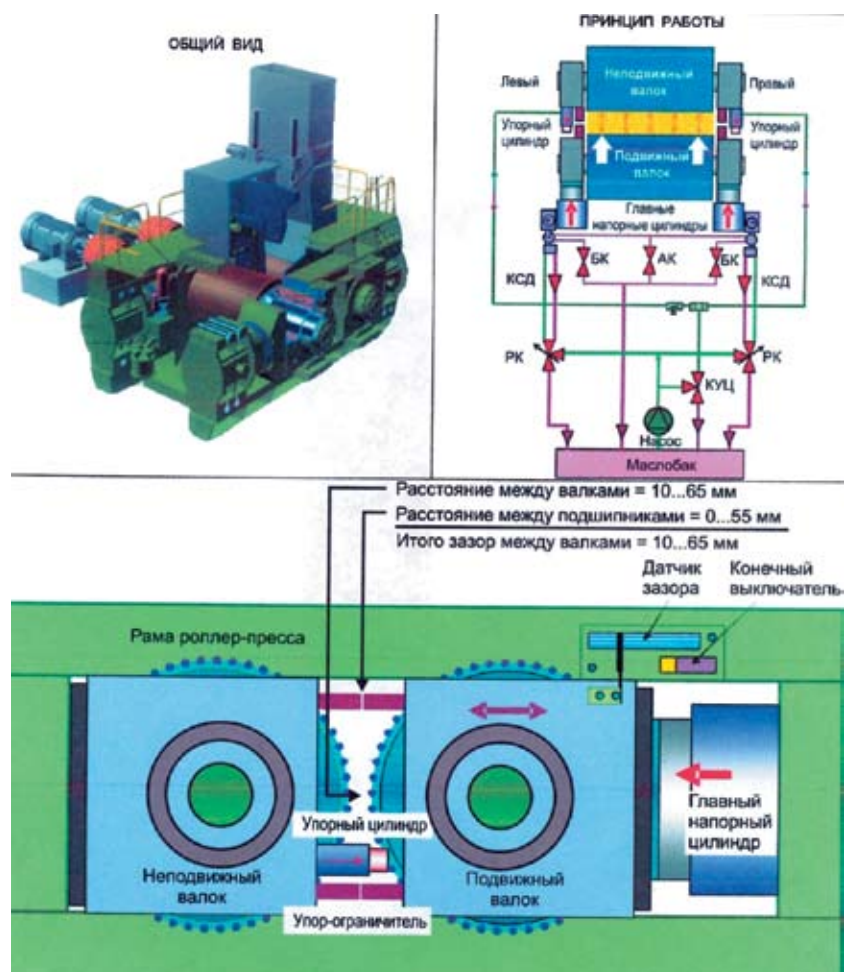


Рис. 5. Прессвалковый измельчитель

Технические характеристики различных типоразмеров прессвалкового измельчителя фирмы КХД (Германия):

	100...40	100...63	115...100
Производительность, т/ч	60	90	150
Потребляемая мощность, кВт	180	270	450
Установленная мощность, кВт	2x110	2x160	2x300

Реализация в цементной промышленности технологических систем измельчения с применением прессвалкового измельчителя значительно повышает эффективность измельчения системы в целом. Оборудование существующих помольных установок ПВИ позволяет увеличить их производительность до 50%. Важным преимуществом ПВИ является возможность сочетания процессов дезагломерации и сепарации. На рис. 6 показана работа роллер-пресса при предизмельчении цемента и кусковых минеральных добавок перед подачей в шаровую мельницу.

Однако в настоящее время нет полной ясности о качестве цемента, полученного при помоле только в роллер-прессе.

Считается, что вследствие изменения условий измельчения с ударного действия в шаровой мельнице на способ раздавливания в роллер-прессе несколько ухудшается качество цемента из-за повышения водопотребности. В связи

с этим, как правило, в последнее время используются схемы предизмельчения клинкера и кусковых минеральных добавок с обязательным дальнейшим помолом цемента в шаровой мельнице. Такая схема оптимальна для производства наноцементов всех классов.

Поэтому в период снижения объемов производства обычного цемента есть все предпосылки для производства наноцементов на действующих цементных предприятиях или на предприятиях по производству бетонной продукции. В настоящее время многие цементные заводы остановили свои цеха по помолу цемента, оборудованные мельницами 2,6x13 м, хотя они могут еще с большим успехом быть переориентированы на производство наноцементов, давая при этом очень хорошие технологические и экономические результаты, как это показали промышленные испытания по производству наноцементов на технологической линии с такой шаровой мельницей и пресс-валковым предизмельчителем на цементном заводе в Китае [3].

### Оптимальная технологическая схема производства наноцемента

Оптимальная схема получения механоактивированных цементов – вяжущих низкой водопотребности – с сохранением производительности шаровых трубных мельниц и

соответственно приемлемых удельных энергозатрат на тонну готового продукта реализована нами на цементном заводе Шин-хуа в г. Цзин-хуа, провинции Дзедзян, КНР (рис. 7).

Данная технологическая линия включает в качестве вспомогательного дробильно-помольного оборудования мощную прессвалковую дробилку VSTM-2003 производительностью до 150 т/ч, мощность привода 400 кВт. В качестве основного помольного агрегата используется трубная трехкамерная шаровая мельница 2,9x11 м производительностью 50 т/ч по выпускаемому цементу с минеральными добавками марки 32,5 по стандарту КНР ASTM-2003. Мощность привода мельницы 1200 кВт, скорость вращения барабана 19,0 об./мин.

В предизмельчитель – пресс-валцы подаются все компоненты смеси, включая портландцементный клинкер и минеральные добавки в кусковом виде (не более 300 мм в поперечнике), без предварительной сушки. Зазор между валками составляет около 40 мм. Конструкция шаровой трубной мельницы 2,9x11 м предусматривает создание в ней разрежения на выходе продукта максимально до 1100 Па для увеличения производительности за счет уноса мелкодисперсных частиц смеси.

Для исключения уноса частиц модификатора нами был установлен уровень разрежения на входе в мельницу – 75 Па, на выходе – 560 Па. Шаровая мельница 2,9x11 м включала 3 камеры, разделенные диафрагмами. Длина первой

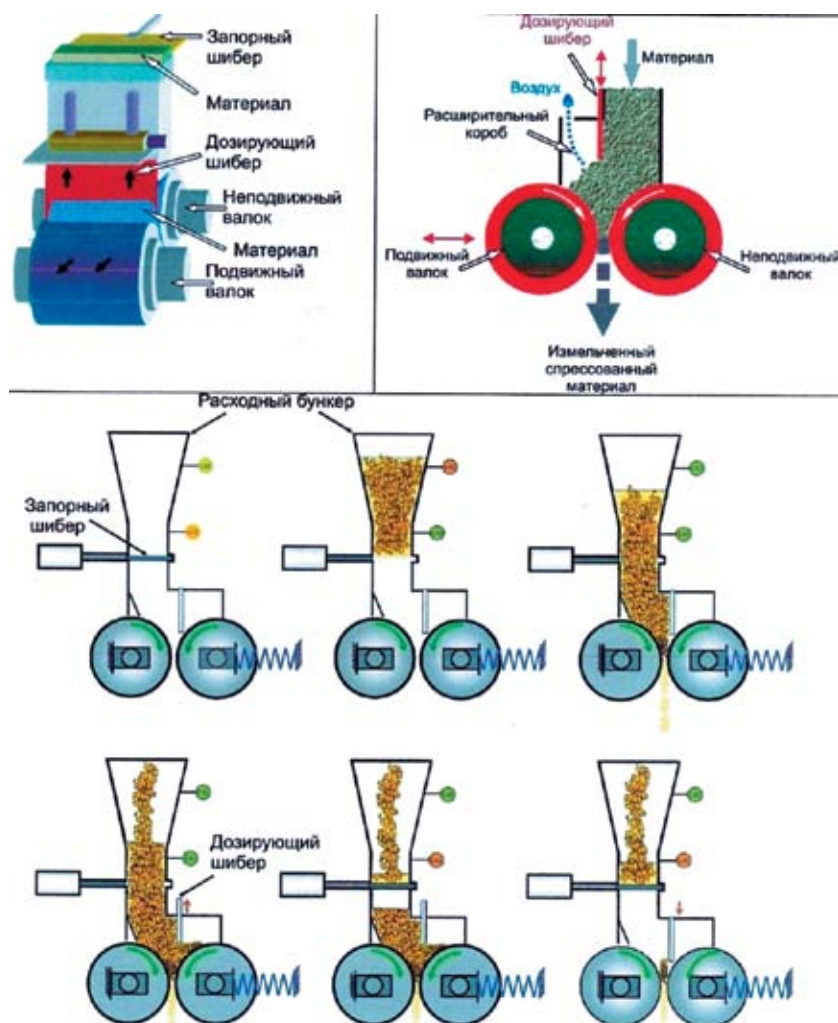


Рис. 6. Работа роллер-пресса как предизмельчителя клинкера и минеральных добавок

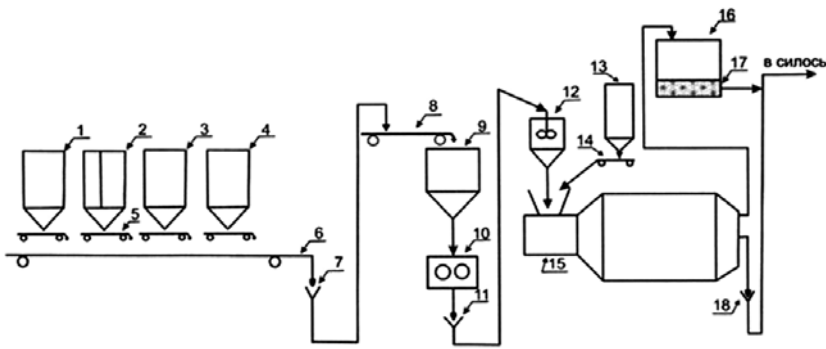


Рис. 7. Схема оптимальной технологической линии по производству наноцементов: 1-3. Бункера миндобавок и гипса. 4. Бункер клинкера. 5. Весовые дозаторы (тензометрические). 6, 8. Ленточные конвейеры. 7, 11, 18. Цепные элеваторы. 9. Расходный бункер. 10. Дробилка-измельчитель. 12. Расходный бункер с мешалкой для гомогенизации смеси. 13. Расходный бункер модификатора. 14. Ленточный дозатор. 15. Шаровая мельница. 16. Рукавный фильтр. 17. Шнек

камеры 2,9 м, шаровая загрузка – шары диаметром 50 мм, общей массой 28 тонн. Длина второй камеры 2,3 м, шаровая загрузка – цилиндры трех видов: диаметром – 12, 14 и 16 мм. Длина цилиндров 20–25 мм, общей массой 22 тонны. Длина третьей камеры – 5,3 м, мелющая загрузка – цилиндры диаметром 8, 10 и 12 мм, длиной 20 мм, общей массой 48 тонн.

Суммарная толщина разделительных диафрагм составляет 0,5 м. Высота порога разделительных диафрагм – 200 мм. На задней стенке мельницы с внутренней стороны наварены лопасти для ускорения выгрузки готового продукта из мельницы. При разгрузке в ней остается не более 1,5 тонны продукта. На передней крышке предусмотрены жалюзи для засоса воздуха при создании разрежения в мельнице.

Добавку китайского производства серии FDN-05 в сухом виде вводили в исходную смесь в расходный бункер 12 после предварительного измельчения компонентов в пресс-вальцах до размера 0ч25 мм и гомогенизации смеси в смесителе с принудительным перемешиванием. Заводской обычный состав смеси: клинкер – 63%; вулканический камень – 6%; сланец – 16%; угольный шлак – 6%; известняк – 7%; гипс – 5%.

Перед началом каждого испытания мельницу разгружали за счет ее работы на холостом ходу до момента прекращения выхода из нее продукта.

В первом эксперименте вводили при помолу цемента 1% масс. модификатора, во втором 0,8% масс., в третьем 0,6% масс. от количества смеси. Добавку в каждом случае вводили равномерно в течение 1 ч 40 мин. В каждой серии отобрано 11 проб. Первая проба – через 20 мин. после начала подачи материала, последующие – через 15 мин. Как показали результаты фракционирования отдельных проб полученных цементов при проведении первой серии испытаний с 1% масс. добавки, появление модификатора в мельнице приводит к смещению гранулометрического диапазона частиц цемента в область более дисперсных значений, т.е. наблюдается увеличение мелющей способности мельницы (табл. 1).

Производительность мельницы задавалась подачей компонентов цемента и составила обычную регламентную заводскую норму – 50 тонн/час. Аналогичные по габари-

там мельницы в России имеют иную шаровую загрузку ввиду отсутствия предызмельчения материалов перед подачей в мельницу.

На российских цементных заводах гранулы клинкера и добавки подаются обычно в первую камеру мельницы, где дробятся в крупку и начинают измельчаться только во второй камере.

Это объясняет низкую тонины цементов (около 300 м<sup>2</sup>/кг) и значительно меньшую производительность мельниц по помолу цемента, например, на заводах ОАО «Воскресенский цементный завод», ЗАО «Липецкий цементный завод» – для мельниц 3,0х14 м производительность составляет около 35 тонн/час, на

ОАО «Михайловский цементный завод» – для мельницы 3,0х14 м производительность составляет около 40 тонн/час. Мельницы габаритами 2,6х13 м, близкие по конструктивным характеристикам к мельнице 2,9х11 м завода Шин-хуа, имеют на цементных заводах России производительность около 25 тонн/час, т.е. в 2 раза меньше китайской. Отсюда и достаточно большие удельные энергозатраты на помол цемента, составляющие 50–60 кВт/т. После предызмельчителя, в частности, пресс-вальцов на цементном заводе Шин-хуа, материал на 60–70% масс. – уже порошок, на 15–20% масс. он представлен в виде крупки до 5–7 мм, а небольшая часть материала (10–15% масс.) попадает в мельницу в виде частиц размером 15–25 мм.

Такой материал интенсивно измельчается уже в первой камере мельницы, а суммарные удельные энергозатраты на цементном заводе Шин-хуа (с учетом пресс-вальцов и шаровой мельницы) находятся в пределах 30–35 кВт на тонну цемента.

В ходе испытаний обнаружено значительное влияние модификатора FDN-05 на интенсивность помола цемента с минеральными добавками. Так, при фиксированной производительности помольной линии 50 тонн в час тонины цементов значительно возросла с вводом модификатора в количестве 0,6–1% масс. цемента и увеличением количества подаваемого вулканического камня (табл. 1).

Это говорит о возможности повышения производительности линии на заводе Шин-хуа на 10–20% при снижении тонины помола цементов до 400–500 м<sup>2</sup>/кг, достаточной для производства малоклинкерных качественных наноцементов.

Как видно по результатам работы мельницы 2,9х11 м в присутствии модификатора, более тонкое измельчение цемента с минеральными добавками происходит в основном за счет измельчения частиц диапазона 30–80 мкм (табл. 1). Введение модификаторов интенсифицирует помол и радикально повышает тонины цементов (табл. 2) за счет нанокапсуляции высокодисперсных зерен цемента и предотвращения их агрегации. Анализ полученных данных по гранулометрии цементов, в частности кривых на рис. 8, показывает, что особенно интенсивно возрастает тонины наноцементов с повышением содержания вулканической породы.



Таблица 1. Дисперсность и гранулометрический состав промышленных партий проб наноцементов, произведенных на заводе Шин-хуа, провинции Джедзян, КНР

Гранулометрический состав, диапазон, мкм	Содержание фракции, %					
	Проба №3		Проба №6		Проба №9	
	Абсолютное содержание частиц диапазона	Общее содержание частиц	Абсолютное содержание частиц диапазона	Общее содержание частиц	Абсолютное содержание частиц диапазона	Общее содержание частиц
<b>Эксперимент №1, ввод 1% масс. модификатора</b>						
0-1,0	-	25,023	16,084	16,084	-	<b>14,627</b>
1,0-5,0	10,61	35,632	17,44	33,523	18,22	<b>32,846</b>
5,0-10,0	8,62	44,247	8,44	41,965	7,35	<b>40,198</b>
10,0-20,0	21,21	65,458	19,88	61,842	18,58	<b>58,782</b>
20,0-30,0	18,36	83,814	19,22	81,064	19,28	<b>78,066</b>
30,0-40,0	7,91	91,723	9,36	90,328	9,91	<b>87,98</b>
40,0-60,0	5,95	97,675	7,20	97,528	8,48	<b>96,457</b>
60,0-70,0	1,57	99,243	2,47	100,00	1,94	<b>98,4</b>
70,0-80,0	0,39	99,633			0,41	<b>98,806</b>
<b>Эксперимент №2, ввод 0,8% масс. модификатора</b>						
0-1,0	-	41,048	-	37,694	-	<b>33,936</b>
1,0-5,0	11,0	52,084	12,05	49,744	11,34	<b>45,275</b>
5,0-10,0	8,13	60,213	8,86	58,601	8,90	<b>54,176</b>
10,0-20,0	16,84	77,056	18,234	76,835	19,02	<b>73,194</b>
20,0-30,0	13,49	90,543	14,37	91,201	15,74	<b>88,932</b>
30,0-40,0	5,26	95,801	5,35	96,555	6,39	<b>95,323</b>
40,0-60,0	3,35	99,155	2,99	99,540	3,93	<b>99,256</b>
60,0-70,0	0,48	99,630	0,306	99,843	0,42	<b>99,677</b>
70,0-80,0	0,70	99,852	0,16	100,00	0,22	<b>99,897</b>
<b>Эксперимент №3, ввод 0,6 % масс. модификатора</b>						
0-1,0	-	33,498	-	42,47	-	<b>25,86</b>
1,0-5,0	11,55	45,043	10,98	53,454	13,04	<b>38,901</b>
5,0-10,0	9,85	54,892	12,35	65,802	9,42	<b>48,318</b>
10,0-20,0	20,675	75,567	18,93	84,733	19,85	<b>68,171</b>
20,0-30,0	15,5	91,066	11,37	96,107	16,43	<b>84,609</b>
30,0-40,0	5,49	96,556	2,83	98,94	7,24	<b>91,842</b>
40,0-60,0	2,98	99,531	1,06	100,00	5,73	<b>97,458</b>
60,0-70,0	0,307	99,838			0,97	<b>98,536</b>
70,0-80,0	0,16	100,00			0,65	<b>99,182</b>

Примечание: Определения выполнены на лазерном гранулометре LA-950 фирмы HORIBA (Япония)

Таблица 2. Удельная поверхность и средний размер частиц образцов цементов с минеральными добавками

Образец*	S, м <sup>2</sup> /кг	d, мкм
1-3	548	413
1-6	556	4,07
1-9	518	4,37
2-3	730	3,10
2-6	783	2,89
2-9	691	3,27
3-3	792	2,86
3-6	936	2,42
3-9	771	2,93
Заводской	462	6,60

\*Здесь и далее обозначения образцов: первая цифра – № эксперимента, вторая цифра – № пробы отбора

Основным требованием к минеральным добавкам является, кроме желательного содержания кремнезема и его соединений, сухое состояние.

В этой связи разработанные технологические схемы для производства механоактивированных цементов с добавками обычно включают участок сушки. Снижение содержания клинкерной части в цементах с минеральными добавками позволяет наряду с ростом энергосбережения значительно уменьшить выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу.

На новых современных заводах помольные цеха также можно переориентировать на выпуск наноцементов с минимальными затратами, особенно если помольные технологические линии оснащены комбинированными системами.

#### Выводы:

На российских цементных предприятиях имеются действующие технологические линии, на которых уже

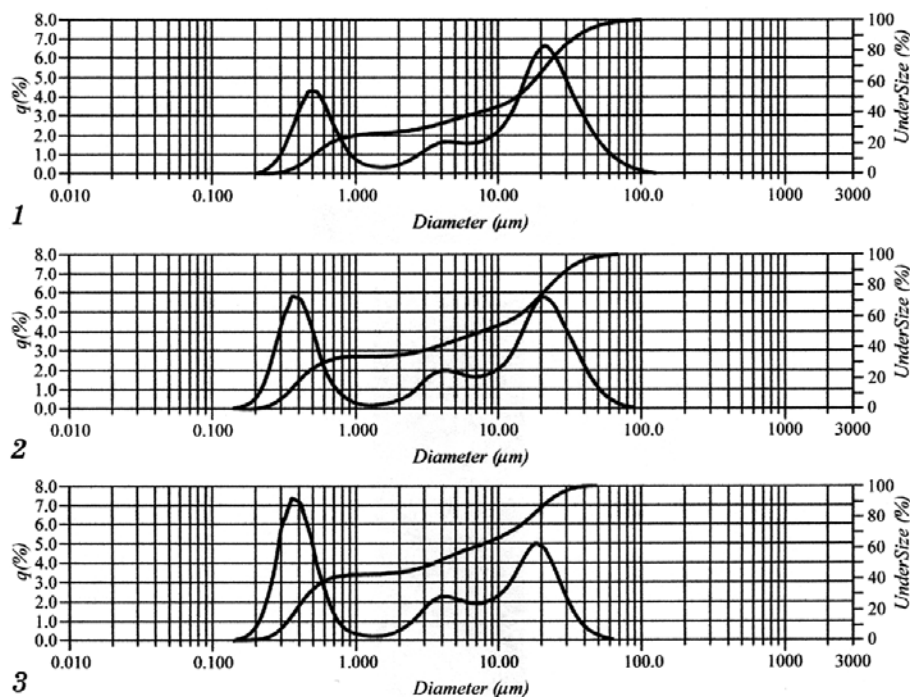


Рис. 8. Кривые гранулометрии промышленных партий наноцементов с минеральными добавками, цементный завод Шин-хуа, провинция Джедзян, КНР: 1 – эксперимент №1, с 63% клинкера и 1,0% масс. модификатора; 2 – эксперимент №2, с 40% клинкера и 0,8% масс. модификатора; 3 – эксперимент №3, с 33% клинкера и 0,6% масс. модификатора

сегодня можно производить наноцементы всех 6-ти классов. Это позволит, не останавливая работающее оборудование, увеличить эффективность его использования, значительно снизит удельные затраты топлива и выбросы

CO<sub>2</sub>, повысит качество цемента, снизит себестоимость и улучшит экономические показатели работы предприятия.

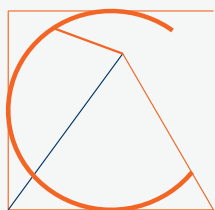
На новых цементных заводах оптимальной схемой производства, пригодной для изготовления наноцементов, являются помольные технологические линии с прессвалковой системой предызмельчения.

Целесообразным представляется модернизация существующих технологических линий помола цементов с установкой предызмельчителей, среди которых прессвалковые – наиболее доступные и дешевые. Они также отличаются минимальными энергозатратами. Такая модернизация повысит производительность шаровых мельниц не менее чем на 30-40%.

#### Библиографический список

1. Бикбау М.Я. Нанотехнологии в производстве цемента. ОАО «Московский ИМЭТ». – Москва, 2008, – 768 с.
2. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. – Москва: Наука, 1979, – 381 с.
3. Бикбау М.Я., Мочалов В.Н., Луи Чень. Производство механохимически активированных цементов (вяжущих) низкой водопотребности // Цемент и его применение, вып. 3, 2008, с. 80-87.

СТРОИТЕЛЬСТВО 24-я специализированная выставка



26-28 октября

Владивосток 2016

16-я выставка технологий  
и оборудования

