

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

В.И. Калашников, М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина

ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Рекомендовано Редсоветом университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению подготовки
08.03.01 «Строительство»

Пенза 2015

УДК 691.5.58 (075.8)

ББК 38.3 я 73

К89

Рецензенты: кандидат технических наук, заместитель директора по качеству ООО «Строительные материалы» (г. Пенза) В.Ю. Нестеров;
кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление качеством и технология строительного производства» Пензенского ГУАС Л.В. Макарова

Калашников В.И.

К89 Вяжущие вещества: учеб. пособие / В.И. Калашников, М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 96 с.

Изложены основные сведения о получении, составе, строительно-технических свойствах и областях применения минеральных вяжущих веществ, применяемых в строительстве: гипсовых вяжущих, воздушной и гидравлической извести, портландцементе и его разновидностях и др. Рассмотрены физико-химические основы процессов твердения вяжущих веществ. Пособие содержит материалы, предназначенные для фонда оценочных средств.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Технологии строительных материалов и деревообработки» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению 08.03.01 «Строительство», на практических занятиях и при выполнении курсового проекта по дисциплине «Вяжущие вещества».

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2015

© Калашников В.И., Коровкин М.О., Ерошкина Н.А., 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебном пособии рассмотрены теоретические и практические сведения, необходимые для изучения курса «Вяжущие вещества» предусмотренного рабочей программой направления высшего образования 08.03.01 «Строительство» (уровень бакалавриата). Рабочей программой кроме лекционных занятий планируется проведение практических и лабораторных занятий, а также выполнение курсового проекта. В процессе этих занятий студенты, в зависимости от методических возможностей каждого вида занятий, должны приобрести различные профессиональные и общепрофессиональные компетенции. Так, после лекционных занятий и самостоятельной работы у обучающихся должны сформироваться способности использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и математического моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ОПК-1), а также выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ОПК-2). Кроме того, студенты после лекционных и практических занятий должны научиться осуществлять руководство коллективом, готовить документацию для создания системы менеджмента качества производственного подразделения (ОПК-7), при этом уметь использовать нормативные правовые документы в профессиональной деятельности (ОПК-8).

Цель настоящего учебного пособия – дополнить основную учебную литературу, используемую на лекционных и практических занятиях, необходимыми сведениями для более полного овладения методами проектирования в соответствии с техническим заданием (ПК-2), создать основу для проведения предварительного технико-экономического обоснования проектных решений, освоения методов разработки проектной и рабочей документации, оформления законченных проектно-конструкторских работ, контроля соответствия разрабатываемых проектов и технической документации заданию, стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам (ПК-3).

Изучение материала учебного пособия позволит студентам овладеть технологией, методами доводки и освоения технологических процессов производства строительных материалов, изделий и конструкций (ПК-4) и получить навыки изучения научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по профилю деятельности (ПК-9).

ВВЕДЕНИЕ

Вяжущими называют минеральные порошкообразные материалы, которые при затворении водой образуют пластичное тесто, способное со временем затвердевать и образовывать камнеподобное тело.

Эти материалы являются одними из ключевых элементов в технологиях современного строительства. Достаточно сказать, что разработка, совершенствование и налаживание широкого промышленного производства основного вяжущего современности – портландцемента – обеспечивают выпуск доминирующего в современном строительстве конструктивного материала – железобетона.

Вяжущие материалы использовались еще в строительной практике государств древнего мира. Наиболее известны достижения в применении этих материалов в строительстве Древнего Рима. Некоторые здания и сооружения, построенные древнеримскими строителями из «римского бетона», сохранились до наших дней. Современные исследования позволяют предположить, что строительство некоторых древнеегипетских сооружений, включая пирамиды, было выполнено с применением вяжущих, которые в настоящее время называют геополимерными.

Отличительными особенностями минеральных вяжущих являются минимальная глубина переработки сырья и простота технологии. Эта особенность характерна для большинства строительных материалов, что связано с колоссальной материалоемкостью строительства, которое, по существу, направлено на преобразование природной среды обитания человека. И хотя эти преобразования носят локализованный характер и сосредоточены в городах или менее крупных населенных пунктах, а также на транспортных путях, объемы изъятия материалов из природной среды для строительной индустрии и затраты энергии на переработку сопоставимы с геологическими процессами. В связи с этим оптимизация технологии использования вяжущих строительного назначения имеет большое экономическое и экологическое значение.

Особую роль в развитии технологии производства и использования вяжущих играют разработка новых и совершенствование известных технологий применения вяжущих на основе многотоннажных промышленных отходов: металлургических и топливных шлаков, золошлаковых отходов тепловых электростанций. Объемы использования этих материалов в строительстве промышленно развитых стран очень велики, что связано с высоким научно-техническим уровнем строительной индустрии в этих странах. В России, имеющей большие запасы полезных ископаемых, промышленность строительных материалов

ориентирована в основном на использование природного сырья, однако со временем научно-технический прогресс позволит применять промышленные отходы в технологии строительных материалов.

Перспективным направлением совершенствования энерго- и ресурсосберегающих технологий вяжущих является производство вяжущих щелочной активации на основе шлаков и зол тепловых электростанций. Эти технологии в полной мере соответствуют современной концепции жизнеподдерживающего развития человечества. Понимание процессов, протекающих при производстве, твердении и эксплуатации вяжущих и материалов на их основе, а также умение правильно организовать лабораторный контроль свойств вяжущих позволяют технологам предприятий оптимизировать производственные процессы.

1. ВОЗДУШНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Воздушные вяжущие вещества при затворении водой твердеют в воздушно-сухой среде. При насыщении водой изделий, изготовленных на воздушных вяжущих, происходит значительная потеря их прочности, а при циклическом насыщении и высушивании – разрушение.

К воздушным вяжущим относятся воздушная известь, а также гипсовые и магнезиальные вяжущие.

Низкая водостойкость уменьшает область применения воздушных вяжущих, однако они обладают рядом ценных свойств.

Одним из наиболее распространенных воздушных вяжущих является строительный гипс, который широко используется для внутренних отделочных работ. Важные преимущества строительного гипса – низкая энергоемкость производства, а также быстрый набор прочности, что значительно сокращает продолжительность технологических процессов. Кроме того, процесс гидратации является обратным процессу обжига, что делает теоретически возможным рециклинг гипса.

Другим достаточно широко распространенным воздушным вяжущим является известь. Этот материал использовался для производства строительных растворов различного назначения, однако постепенно известь была вытеснена портландцементом и в настоящее время используется только для производства сложных растворов.

Другой областью применения извести является получение известково-кремнеземистых вяжущих автоклавного твердения для производства силикатного кирпича и силикатного ячеистого бетона.

Магнезиальные вяжущие находят ограниченное применение – для получения износостойких полов и для производства отделочных материалов. Объемы их производства невелики, и в ближайшем будущем не следует ожидать увеличения потребности в этих вяжущих.

1.1. Гипсовые и гипсоангидритовые вяжущие

Общая характеристика гипсовых вяжущих

Гипсовые вяжущие получают на основе термической обработки природного гипсового камня, основным веществом которого является двухводный сульфат кальция CaSO_4 . В строительстве применяются различные виды гипсовых вяжущих на основе полуводных и безводных сульфатов кальция. Однако наиболее распространен β $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, который принято называть строительным гипсом. Другие виды гипсовых вяжущих (ангидритовое вяжущее, ангидритовый отделочный

цемент, безобжиговый гипсовый цемент, технический гипс) имеют ограниченное применение и используются только в особых случаях.

Строительный гипс получают при обжиге гипсового камня при температуре 140...180 °С в условиях атмосферного давления. Продуктом этого обжига является β-полугидрат, состоящий из более мелких кристаллов по сравнению с α-полугидратом (технический гипс), в связи с чем необходим более высокий расход воды для получения равной с α-полугидратом консистенции. Мелкая кристаллическая структура строительного гипса является причиной его более высокой водопотребности и низкой прочности в сравнении с техническим гипсом, который получают на основе α-полугидрата. Однако технология α-полугидрата более сложна и затратна; поэтому с экономической точки зрения применение β-полугидрата в строительстве более оправданно.

Ангидритовое вяжущее получают путем помола нерастворимого ангидрита (безводный гипс, CaSO_4) с катализаторами твердения, в качестве которых используют сульфаты натрия, калия, железа в количестве 0,5...2 %, а также известь (2...3 %), обожженный доломит (5...8 %) и доменный шлак (10...15 %). Обжиг этого вяжущего вводится при температуре 600...750 °С. Повышение температуры приводит к снижению прочности из-за образования свободной извести. Твердение вяжущего происходит в результате гидратации нерастворимого ангидрита и его перекристаллизации с образованием на начальной стадии двухводного коллоидного гипса и на последующей – кристаллического двухводного гипса.

Ангидритовый отделочный цемент получают одно- или двукратным обжигом гипсового камня с активатором твердения при температуре 600...700 °С. Сырье для производства этой разновидности гипсового вяжущего должно содержать не более 1,5 % примесей и менее 0,05 % Fe_2O_3 (который снижает белизну вяжущего). В качестве активатора твердения применяют алюмокалиевые квасцы или буру, растворами которых сырье пропитывают перед обжигом. Помол этого вида вяжущего производят в фарфоровых или других мельницах, исключающих попадание в готовый продукт примесей, снижающих его белизну. Измельчение ведут до остатка на сите № 008 5...10 %.

Ангидритовый отделочный цемент используется для производства отделочных растворов, архитектурных деталей и элементов декора.

Высокообжиговый ангидритовый цемент (эстрихгипс) получают обжигом гипсового камня при температуре 800...1000 °С. При такой температуре гипс полностью обезвоживается, а некоторое количество сульфата кальция разлагается, образуя 2...4 % CaO , который служит катализатором твердения. Более высококачественный эстрихгипс по-

лучается, если в сырье содержится 3...4 % карбонатной примеси и 5...7 % глинистой примеси.

Эта разновидность высокообжигового гипса отличается более высокой водо- и морозостойкостью за счет повышенной плотности и пониженной водонепроницаемости. Эстрихгипс характеризуется повышенной стойкостью к истиранию и используется при производстве бесшовных полов.

Безобжиговый гипсовый цемент получают путем тонкого помола природного гипсового камня. Его твердение происходит в результате перекристаллизации гипса и возникновения кристаллизационных структур, обеспечивающих значительную прочность. При твердении наблюдается усадка от 2 до 4 %. Водопотребность этого вяжущего составляет около 20 %.

Для ускорения твердения вводят NaHSO_4 , Na_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

Твердение низкообжиговых гипсовых вяжущих

Схватывание и твердение α - и β -модификаций гипса обусловлены переходом их при взаимодействии с водой в двугидрат в соответствии с уравнением



При гидратации гипса выделяется теплота в количестве 134 кДж на 1 кг β -полуhydrата.

Исследуя твердение гипса, известный французский химик А.-Л. Лавуазье в 1768 году пришел к выводу, что при гидратации гипса происходит быстрое образование мелких чешуйчатых кристаллов, которые, переплетаясь между собой, образуют прочную массу.

По теории А. Ле Шателье (1887 г.), при смешении с водой полуводный гипс растворяется с образованием насыщенного водного раствора. В растворе он взаимодействует с водой и переходит в двуводный сульфат кальция. Так как растворимость полуhydrата в воде выше, чем растворимость двуhydrата, раствор становится пересыщенным по отношению к последнему. Поэтому кристаллы двуводного гипса выпадают из раствора. Это создает условия для растворения новых порций полуhydrата.

По мере выделения из раствора все новых и новых количеств двуводного гипса кристаллики его растут, переплетаются, срастаются, что обуславливает схватывание и твердение гипсового теста.

Различные виды полуводного гипса по своим основным свойствам во многом схожи. Главное различие состоит преимущественно в пока-

зателях прочности. Истинная плотность разновидностей полуводного гипса колеблется в пределах 2,6...2,75 г/см³. Насыпная плотность в рыхлом состоянии обычно составляет 800...1100, в уплотненном – 1250...1450 кг/м³.

Дисперсность гипсовых вяжущих, зависящая от степени измельчения при помоле и влияющая на водопотребность материала, прочность и некоторые другие свойства, оценивается по остатку на сите с размерами ячеек в свету 0,2 мм (в % по массе от просеиваемой пробы). При этом различают: грубый помол (индекс I), остаток на сите не более 23 %; средний помол (индекс II) – 14 %; тонкий помол (индекс III) – 2 %.

Водопотребность. Теоретически для гидратации полуводного гипса с образованием двуводного необходимо 18,6 % воды по массе вяжущего вещества. Практически же для получения теста стандартной консистенции по ГОСТ 23789–79 (нормальная густота) для β-полугидрата требуется 50...70 % воды, а для α-полугидрата – 35...45 %. Стандартной консистенции соответствует расплыв массы до диаметра (180±5) мм.

Затвердевший гипс представляет собой твердое тело с высокой пористостью, достигающей 40...60 % и более. Естественно, что с увеличением количества воды затворения пористость гипсового изделия возрастает, а прочность уменьшается.

Водопотребность гипса увеличивается с повышением степени его измельчения. Водопотребность гипса значительно снижается при введении с водой затворения замедлителей схватывания – кератинового, известково-клеевого, синтетических жирных кислот, лимонной и щавелевой кислот – в количестве до 0,1...0,3 % массы вяжущего. Использование этих добавок позволяет снизить нормальную густоту на 10...15 %. С помощью замедляющих и пластифицирующих добавок снижают нормальную густоту на 10...20 %, что повышает прочность и водостойкость гипса.

Гипсовые вяжущие в основном применяют для производства гипсовой сухой штукатурки, гипсокартона, штукатурных и шпаклевочных составов для внутренних работ, стеновых камней и различных архитектурных форм. Гипсовые вяжущие могут использоваться и при изготовлении наружных гипсовых конструкций малоэтажных зданий для их защиты от увлажнения.

Гипс может применяться для производства гипсоцементно-пуццолановых вяжущих и изделий на их основе.

Сырье для гипсовых вяжущих

В соответствии с ГОСТ 4013–82 гипсовое сырье в зависимости от содержания $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ делится на 4 сорта. Сырье 1 сорта должно содержать не менее 95 % двуводного сульфата кальция, сырье 2, 3 и 4 сортов – 90, 80 и 70 %, соответственно. В сырье могут содержаться примеси: песок, глина, известняк.

Сырьем для производства гипсовых вяжущих служит гипсовый камень и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, а иногда гипсосодержащие отходы – фосфогипс, борогипс и т.д. Для некоторых видов гипсовых вяжущих используют ангидрит – безводный сульфат кальция. Природный гипс (гипсовый камень) – белый минерал, часто окрашенный примесями в серый, красноватый или желтоватый цвет. В природе встречается несколько разновидностей гипса (рис. 1.1): плотный мелкозернистый алебастр, по внешнему виду напоминающий мрамор (рис. 1.1, а); селенит – волокнистый минерал, состоящий из нитевидных кристаллов, имеющих шелковистый отлив, и гипсовый шпат – пластинчатый минерал с плоскими, полупрозрачными кристаллами (рис. 1.1, б).

а



б

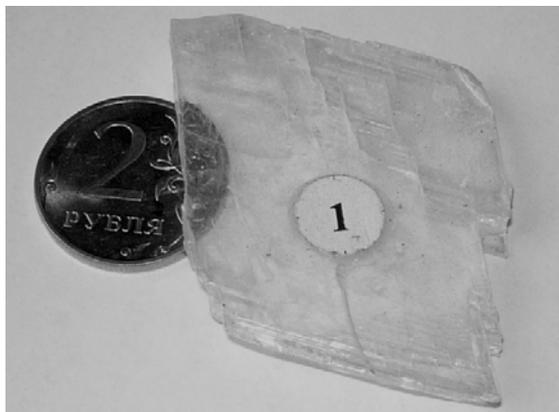


Рис. 1.1. Минералогические разновидности гипса:
а – алебастр; б – гипсовый шпат

Реже в природе встречается безводная разновидность сульфата кальция – ангидрит. Гипс относится к осадочным хемогенным породам, которые образовались при высыхании соленых озер. Кроме природного сырья, для производства можно использовать техногенные продукты, важное значение из которых имеет фосфогипс, образующийся при переработке природных фосфоритов в фосфорную кислоту и фосфорные удобрения. Однако современные технологии пока не позволяют получать гипсовое вяжущее приемлемого качества на основе этих отходов.

Основные запасы гипсового сырья в России находятся в Тульской, Астраханской, Пермской, Нижегородской, Иркутской, Оренбургской областях, Краснодарском крае, Чувашской республике, республике Татарстан, Башкортостане и Таймырском АО.

1.1.1. Строительный гипс

Дегидратация двуводного гипса

Химически связанная вода природного гипса начинает выделяться из кристаллической решетки уже при 60 °С. Однако этот процесс идет очень медленно. Общепринятым считается схема превращения гипса при нагревании (рис. 1.2). Выделение воды из кристаллогидратов начинается при 107 °С. При этом образуется β-полугидрат. Выход воды приводит к разрушению зерен; поэтому эта форма гипса характеризуется высокой дисперсностью и водопотребностью. В автоклаве или в растворе при температуре 105 °С $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ превращается в α-полугидрат. Вода в этих условиях удаляется в жидком состоянии без разрушения зерен. Крупнокристаллическое состояние α-полугидрата является причиной меньшей водопотребности и большей прочности. При температуре 180...200 °С полугидраты обезвоживаются, при этом не происходит перестройки кристаллической решетки. Обезвоженные полугидраты характеризуются высокой гигроскопичностью и быстро переходят в полугидраты. При нагревании обезвоженных β-полугидратов до температуры 200 и 300 °С соответственно они переходят в растворимые α- и β-ангидриты с перестройкой кристаллической решетки. При дальнейшем нагревании (см. рис. 1.2) образуется нерастворимый ангидрит. При температуре более 800 °С сульфат кальция начинает разлагаться на CaO и SO_3 . Такой материал называется эстригипс.

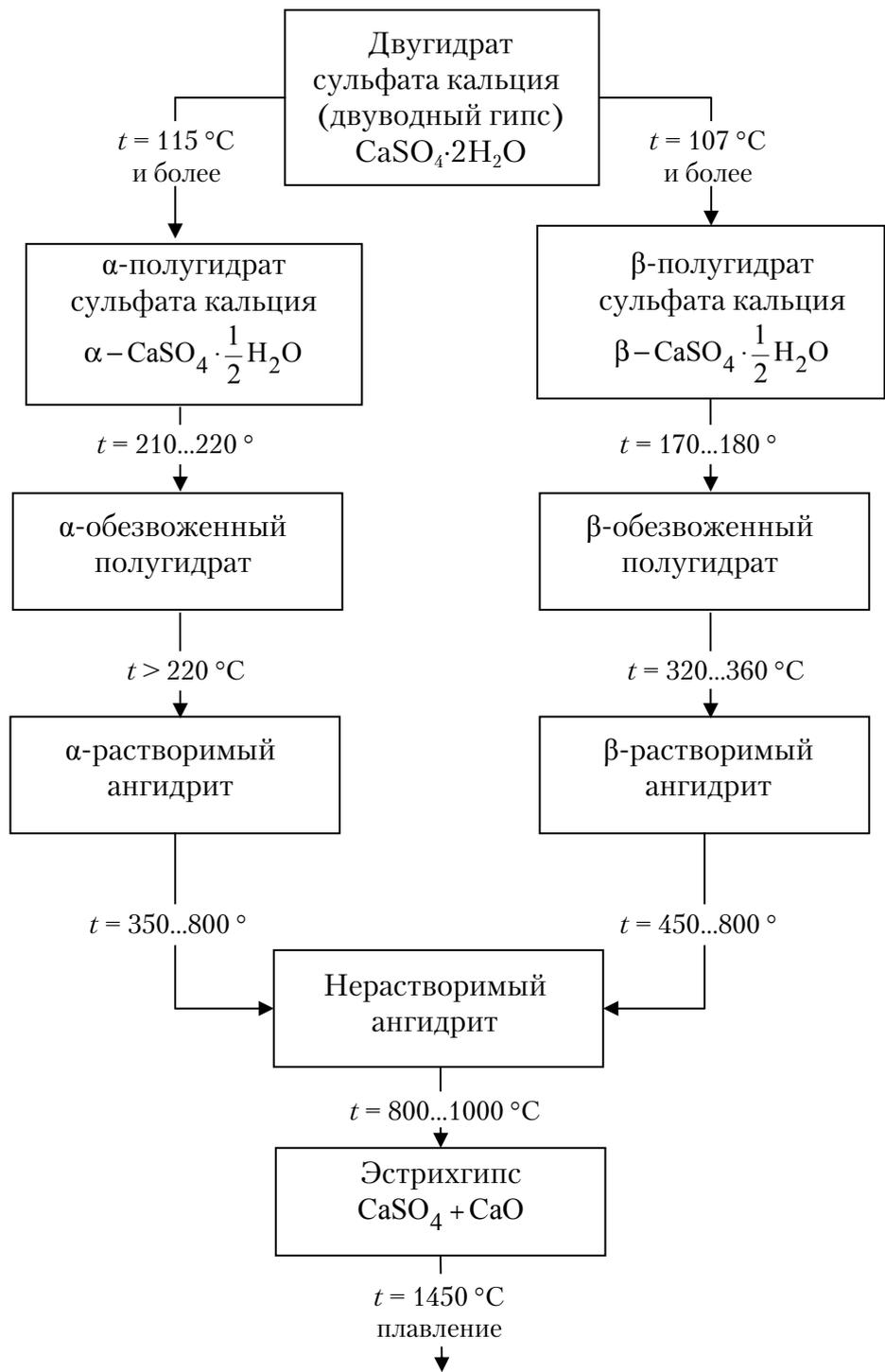


Рис. 1.2. Схема условий образования модификаций водного и безводного сульфата кальция

Технология получения строительного гипса

Гипсовое вяжущее можно получать различными способами, сущность которых состоит в том, что сырье (в виде мелкой щебенки или порошка) первоначально подвергают тепловой обработке, при которой из двуводного гипса выделяется кристаллизационная вода в капельно-

жидком состоянии и он переходит в α -полугидрат, имеющий вид крупных плотных кристаллов. Затем полученный материал сушат в условиях, исключающих возможность гидратации полугидрата, после чего его измельчают.

Тепловая обработка двухводного гипса с получением α -полугидрата может осуществляться в автоклавах в среде насыщенного пара при давлении 0,15...0,3 МПа и в водных растворах некоторых солей при атмосферном давлении и температуре 105...110 °С.

Автоклавные способы, в свою очередь, разделяют на такие, при которых обезвоживание осуществляют в автоклаве, а сушку продукта – в специальном аппарате или же обезвоживание и сушку проводят в одном аппарате.

Производство строительного гипса из плотной гипсовой породы состоит из трех главных операций: дробления гипсового камня, помола и обжига материала. *Основные способы производства строительного гипса, применяемые в настоящее время, можно разделить на следующие три группы, характеризующиеся: предварительной сушкой и измельчением сырья в порошок с последующей дегидратацией гипса (обжиг гипса в гипсоварочных котлах); совмещением операций сушки, помола и обжига двухводного гипса; обжигом гипса в виде кусков различных размеров в шахтных, вращающихся, камерных и других печах. Полугидрат в порошок измельчают после обжига.*

Помол влажного двухводного гипса затруднителен; поэтому на современных заводах эту операцию совмещают обычно с сушкой гипса. Шахтная мельница состоит из камеры измельчения, вала, ротора с билами и шахты высотой 12...15 м. Била шарнирно соединяются с билодержателями, которые, в свою очередь, шарнирно крепятся к диску ротора. Гипсовый камень в виде щебня размером до 3...4 см подается тарельчатым питателем через течку в верхнюю часть камеры измельчения на быстровращающиеся била. Для повышения износоустойчивости била наплавляют твердыми сплавами слоем толщиной 5...8 мм.

После выхода из мельниц газопылевую смесь направляют в систему пылеочистительных устройств, в которых из газового потока осажается гипсовый порошок. От эффективности работы пылесадительных устройств в значительной мере зависят санитарные условия на заводе и на прилегающей к нему территории, а также производственные потери. Поэтому на современных гипсовых заводах устанавливаются многоступенчатые системы очистки. На первой ступени улавливаются крупные частицы, на второй – осаждаются тонкие фракции и, наконец, на последней ступени газы очищаются от мельчайших частиц.

Способ самозапаривания отличается от предыдущих тем, что предусматривает создание избыточного давления в запарниках в резуль-

тате испарения из гипсового камня гигроскопической части гидратной воды. Для этой цели были разработаны два типа самозапарников (вертикальный и вращающийся горизонтальный).

Технологическая схема производства строительного гипса с использованием варочных котлов периодического действия

В соответствии с технологической схемой (рис. 1.3) используется гипсовый камень в кусках размером 300..500 мм, который подвергается первичному дроблению в щековых дробилках до размера 30...50 мм и вторичному — до размера частиц 0...15 мм — в молотковых. Возможно одностадийное дробление и молотковых дробилках до частиц размером 0...25 мм.

Тонкий помол гипсового щебня по данной схеме может осуществляться и аэробильных, шахтных, роликово-маятниковых и других мельницах.

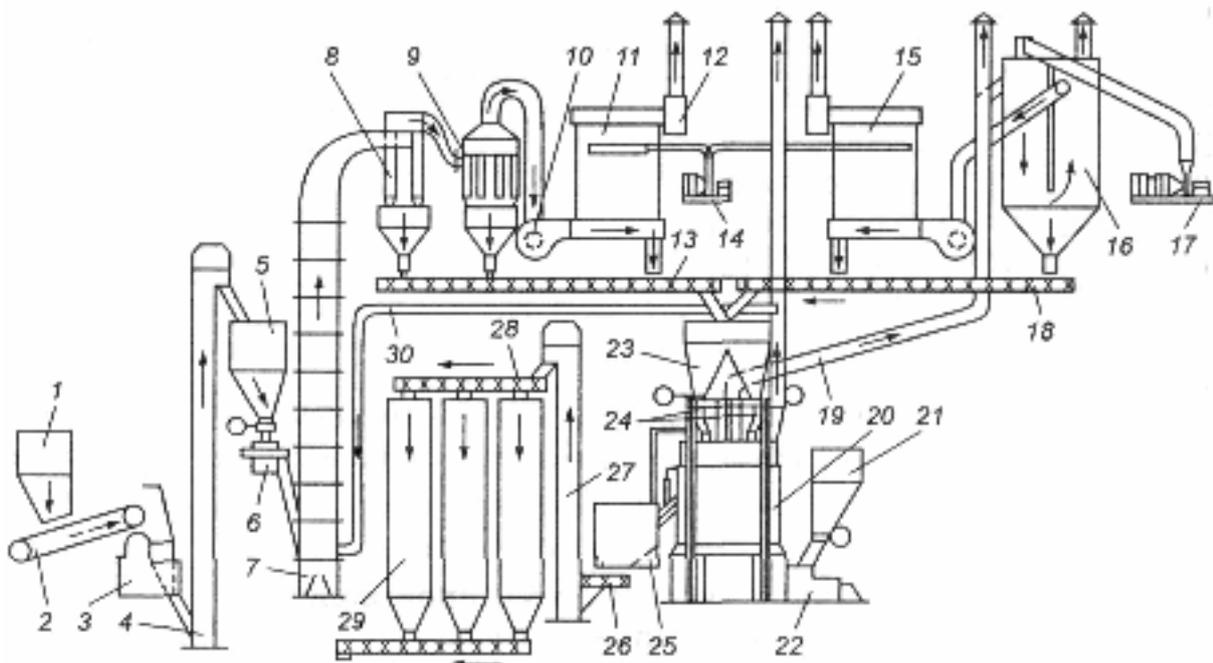


Рис. 1.3. Технологическая схема производства строительного гипса с применением варочных котлов периодического действия:
 1 – бункер гипсового камня; 2 – ленточный конвейер; 3 – щековая дробилка;
 4 – элеватор цепной; 5 – расходный бункер гипсовой щебенки;
 6 – тарельчатый питатель; 7 – шахтная (или аэробильная) мельница;
 8 – циклоны; 9 – батарея циклонов; 10, 12 – вентиляторы;
 11, 15 – рукавные фильтры; 13, 18 – винтовые конвейеры;
 14, 17 – калориферы; 16 – камера пылеосаждения; 19 – паропровод;
 20 – гипсоварочный котел; 21 – бункер твердого топлива;
 22 – топка; 23 – бункер гипсовой муки; 24, 26 – питатели;
 25 – бункер томления; 27 – элеватор; 28 – винтовой конвейер;
 29 – силосы гипсового вяжущего; 30 – газопровод

Основной помольной установкой для измельчения гипса является шахтная мельница, представляющая собой молотковую мельницу с гравитационным сепаратором. Эта мельница служит не только для помола, но и для сушки гипса.

Температура газов при входе в мельницы находится в пределах 300...500 °С.

Тонкость помола материала и производительность мельниц зависят от скорости газового потока. Газопылевая смесь после выхода из мельниц проходит через систему пылеулавливающих устройств (циклоны, батареи циклонов, рукавные фильтры и электрофильтры). Движение газов в системе принудительное и осуществляется за счет работы центробежных вентиляторов.

Осажденный в системе пылеочистки гипсовый порошок поступает в расходные бункеры над варочными котлами.

В зависимости от температуры газов при выходе из мельниц (85...105 °С) температура порошка может колебаться от 70 до 95...100 °С.

Варка гипса в гипсоварочных котлах производится при постоянном перемешивании и длится 1...2 ч и более. Максимальная температура материала в момент выгрузки из котла, в зависимости от свойств сырья и предъявляемых к вяжущему требований, находится в пределах 140...180 °С.

Варка гипса проходит в три стадии. На первой стадии при температуре до 110...112 °С нагревается порошок и начинается интенсивная дегидратация гипса. На второй стадии при температуре 120 °С происходят обезвоживание и испарение кристаллизационной (гидратной) воды. На третьей стадии процесс дегидратации прекращается.

По мере прекращения парообразования и увеличения плотности полученных продуктов дегидратации гипса масса уплотняется и снижается ее уровень в котле (первая «осадка» порошка). Вторая «осадка» наблюдается в последний период варки и соответствует обезвоживанию полугидрата сульфата кальция до растворимого безводного сульфата кальция (ангидрита).

Готовый продукт выгружается из котла в приемный бункер, откуда механическим или пневматическим транспортом передается в силосные склады для хранения и отгрузки потребителям.

Разновидностью рассмотренной технологической схемы является схема с вторичным помолом гипсового вяжущего после варки. Вторичный помол гипсового вяжущего в шаровых мельницах после варки способствует значительному улучшению его технических свойств. Во время вторичного помола обнажается двугидрат, оставшийся необезвоженным в ядре частиц. Под влиянием тепла, развивающегося от тре-

ния и удара шаров, двугидрат сульфата кальция переходит в полугидрат, а растворимые формы ангидрита присоединяют выделяющиеся пары воды и переходят в полугидрат. Одновременно с увеличением тонкости помола частиц в шаровых мельницах частицам полугидрата придается пластинчатая, чешуйчатая форма, обеспечивающая повышенные пластические свойства материала.

Более эффективными мельницами для помола и сушки сырья и готового вяжущего являются среднеходовые кольцевые мельницы. Они получили широкое распространение за рубежом. На некоторых предприятиях по производству гипсовых вяжущих работают мельницы фирмы «Клаудиус-Петерс». Их используют либо для помола и сушки гипса, либо для помола и обжига гипса. Технологический процесс производства по схеме, приведенной на рис. 1.4, не отличается от рассмотренного ранее, за исключением процесса помола и сушки гипсового сырья в мельнице «Клаудиус-Петерс». Наиболее благоприятный режим измельчения в этой мельнице обеспечивается при наличии в материале непрерывной гранулометрии.

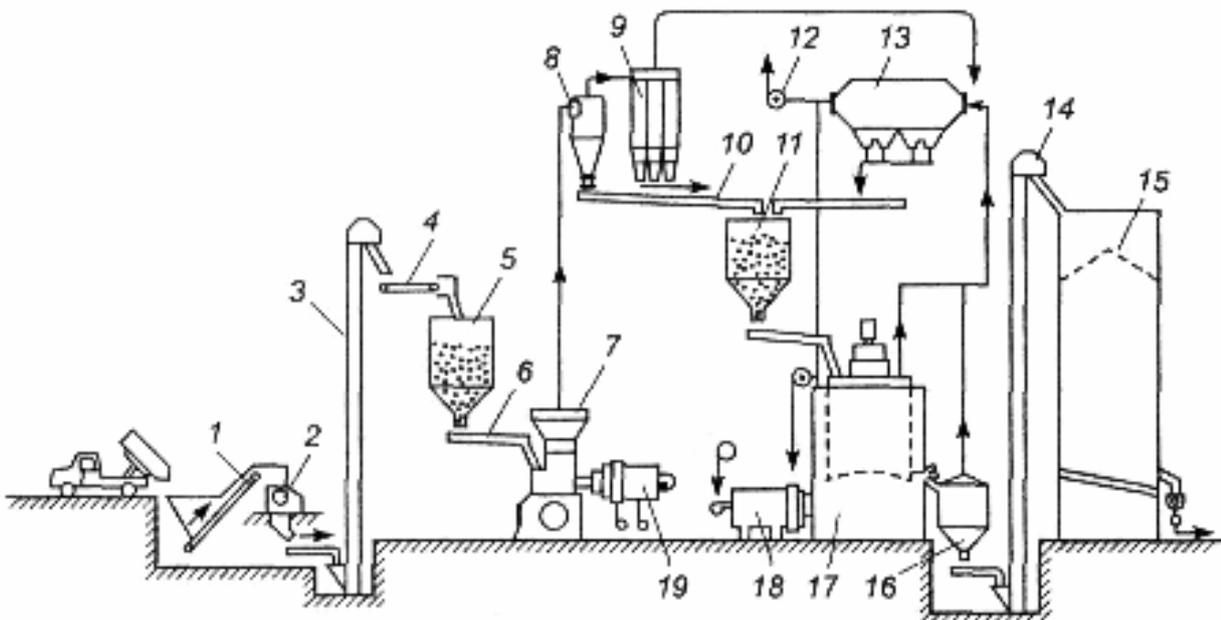


Рис. 1.4. Технологическая схема производства строительного гипса с использованием мельницы «Клаудиус-Петерс» и гипсоварочного котла (Шедокский гипсовый комбинат): 1 – питатель; 2 – дробилка; 3 – элеватор; 4 – питатель; 5 – бункер гипсовой щебенки; 6 – питатель; 7 – мельница «Клаудиус-Петерс»; 8 – сдвоенный циклон; 9 – батарейный циклон; 10 – питатель гипсовой муки; 11 – бункер гипсовой муки; 12 – центробежный вентилятор; 13 – электрофильтр; 14 – элеватор; 15 – силос гипсового вяжущего; 16 – камера (бункер) томления; 17 – гипсоварочный котел; 18, 19 – топка

Технологическая схема производства строительного гипса с использованием котлов непрерывного действия

Более совершенной технологической схемой является производство строительного гипса с применением варочных котлов непрерывного действия, что позволяет максимально автоматизировать технологический процесс производства гипсовых вяжущих. На рис. 1.5 приведена технологическая схема производства строительного гипса с применением варочных котлов непрерывного действия по проекту линии СМА 400, АО Самарский завод «СТРОММАШИНА».

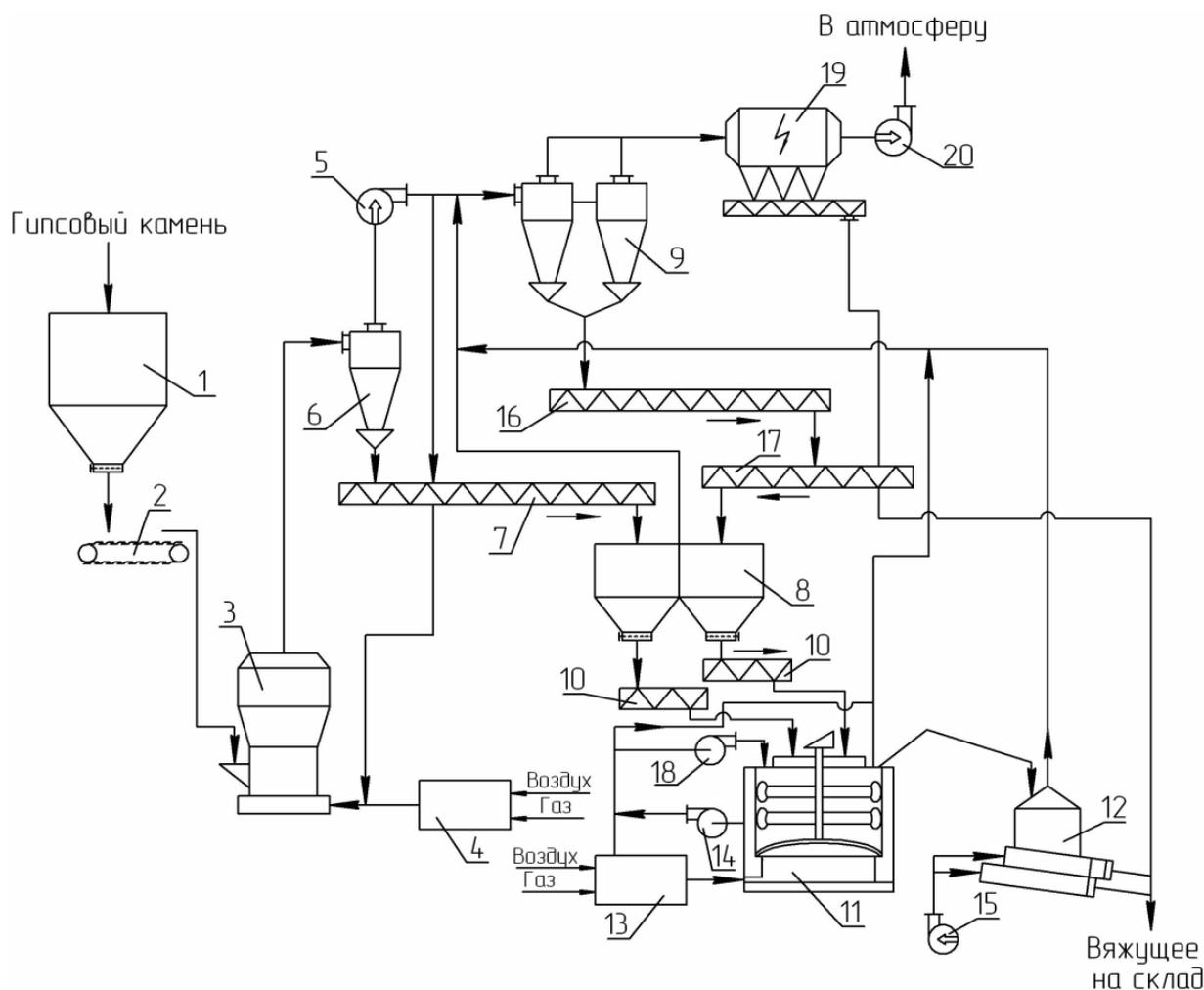


Рис. 1.5. Технологическая схема производства строительного гипса с применением варочных котлов непрерывного действия:
 1 – бункер сырья; 2 – питатель цепной; 3 – мельница тарельчато-роликовая;
 4 – топка к мельнице; 5 – вентилятор к мельнице; 6 – циклон I ступени;
 7, 10, 16, 17 – конвейеры винтовые; 8 – бункер сырьевой муки;
 9 – циклон II ступени; 11 – котел гипсоварочный; 12 – холодильник гипса;
 13 – топка котла; 14, 18 – дымосос; 15 – вентилятор холодильника;
 19 – электрофильтр; 20 – вентилятор отходящих газов; А – подача исходного материала; В – подача сжатого воздуха; С – выдача готового продукта; D – отходящие газы

Помол гипсового сырья производится в тарельчато-роликовой мельнице непрерывного действия, измельченный продукт из которой воздушным потоком направляется в циклон 1-й ступени, затем в винтовой конвейер и далее в бункер сырьевой муки. Тонкие частицы гипса улавливаются в циклонах 2-й ступени и в электрофилт্রে и направляются также в бункера сырьевой муки. Дальнейший технологический процесс осуществляется в соответствии с технологической схемой производства строительного гипса (см. рис. 1.3, 1.4), но в непрерывном автоматизированном режиме.

Длительность пребывания материала в аппаратах регулируется режимом загрузки и выгрузки, в зависимости от температуры гипса на выходе из котла.

Вследствие непрерывного поступления в котлы свежего гипсового порошка в них в течение всего процесса тепловой обработки поддерживается постоянная и высокая степень насыщения окружающего материал воздуха водяными парами, что приводит к улучшению модификационного состава и свойств получаемого гипсового вяжущего.

Технологическая схема производства строительного гипса с использованием вращающихся печей

Технологическая схема производства строительного гипса во вращающихся печах (сушильных барабанах) приведена на рис. 1.6.

В зависимости от размера кусков исходного гипсового камня и требуемых размеров кусков, направляемых на обжиг, дробление осуществляют по одно- или двухступенчатой схеме в щековых или других дробилках. Исходное сырье дробят до размеров частиц 0...35 мм в поперечнике.

Полученный гипсовый щебень подвергается грохочению на фракции 0...10; 10... 20 и 20...35 мм, которые направляются в соответствующие бункера над печью обжига. Обычно щебень различных фракций обжигается отдельно. Для каждой фракции выбирается соответствующий режим обжига. Из бункера гипсовый щебень с помощью питателя, например тарельчатого, непрерывно поступает во вращающуюся печь.

Обжиг гипса во вращающихся печах может осуществляться при непосредственном соприкосновении с горячими газами, образующимися при сжигании топлива за счет передачи тепла через стенки барабана при его наружном обогреве.

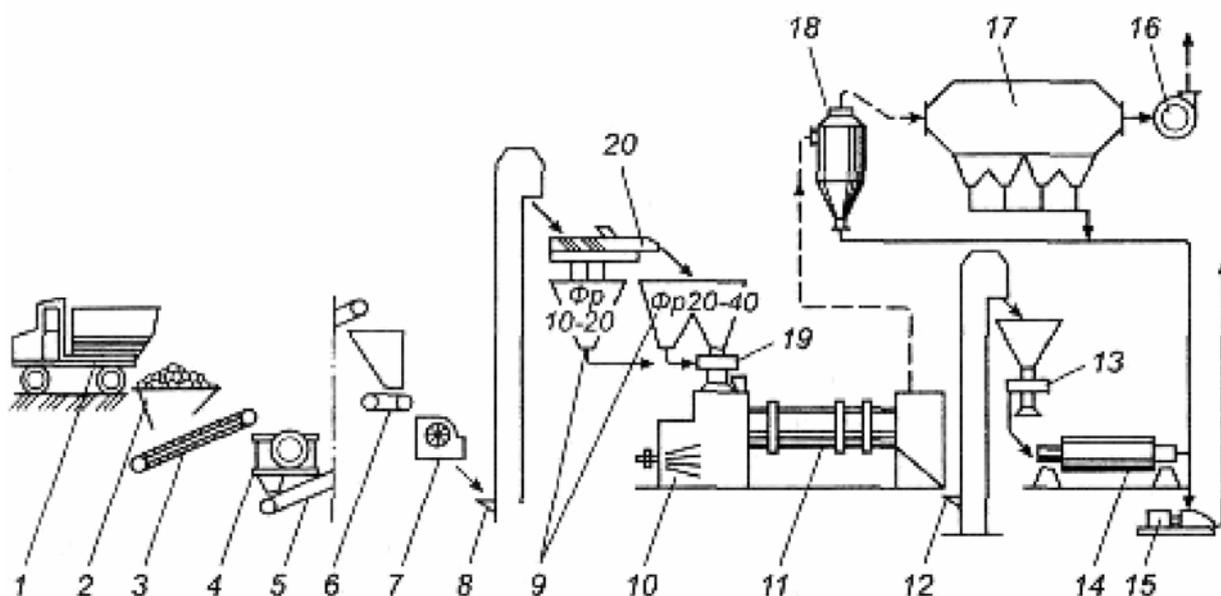


Рис. 1.6. Технологическая схема производства строительного гипса во вращающихся печах:

- 1 – автосамосвал; 2, 9 – бункера; 3, 6, 13 – питатели; 4, 7 – дробилки; 5, 8, 12 – транспортирующие машины (конвейер и элеваторы); 10 – топка; 11 – сушильный барабан; 14 – трубная мельница; 15, 19 – питатели; 16 – дымосос; 17, 18 – пылеосадительное оборудование; 20 – грохот

Вращающиеся печи (сушильные барабаны) могут работать на твердом, жидком и газообразном топливе.

Температура газов при входе в печь при прямотоке составляет 950...1000 °С, при противотоке – 730...800 °С. Температура газов при выходе из печи при прямотоке – 170...220 °С, при противотоке – 100...110 °С.

Обожженный материал поступает в расходные бункера, расположенные над шаровой мельницей. Равномерное питание мельницы материалом обеспечивается питателем. Поступающий в мельницу материал имеет температуру 80...100 °С.

В мельнице (обычно двухкамерной) производится помол обожженных кусков гипсового камня. В отличие от гипсоварочных котлов продукт обжига в печах получается неоднородным по модификационному составу, имеется значительное количество недожога (двугидрата сульфата кальция) и пережога (ангидрита). В мельнице кроме помола осуществляется выравнивание вещественного состава продукта за счет перехода недожога и пережога в полугидрат.

После помола гипсовое вяжущее направляется в бункера (силосы) хранения и на расфасовку.

Современные производства гипсовых вяжущих осуществляются по аналогичным технологическим схемам, но преимущественно для транспортирования сыпучих и порошкообразных материалов используются системы пневмотранспорта, обеспечивающие высокую степень очистки воздуха от пыли.

Основным недостатком такой технологии является неоднородный вещественный состав продукта, выходящего из вращающейся печи по сравнению с гипсоварочными котлами. Это обусловлено значительно большими размерами кусков дегидратируемого гипса, что неизбежно ведет либо к недожогу сердцевины щебня, либо пережогу до ангидрита его внешней оболочки. По этой причине такие технологии значительно меньше распространены.

Технологическая схема производства строительного гипса с использованием аппаратов совмещенного помола и обжига

Производство гипсовых вяжущих в этих аппаратах заключается в совмещенном обжиге и помоле гипсового сырья в шахтных, шаровых и других мельницах.

Процесс производства состоит из следующих технологических переделов:

- дробление гипсового камня в щековых конусных и других дробилках;

- совмещенные тонкое измельчение и обжиг гипса в шахтных, шаровых и других мельницах при температуре входящих в мельницу газов 600...700 °С;

- осаждение измельченного и обожженного материала в газоочистительных аппаратах;

- транспортирование готового вяжущего на склад.

Технологическая схема производства строительного гипса с использованием шаровой мельницы для совмещенного обжига и помола приведена на рис. 1.7.

Отдельные технологические схемы отличаются друг от друга применяемыми мельницами тонкого помола и дробильным оборудованием. Кроме того, мельницы могут работать по замкнутому циклу или по схеме с однократным использованием теплоносителя.

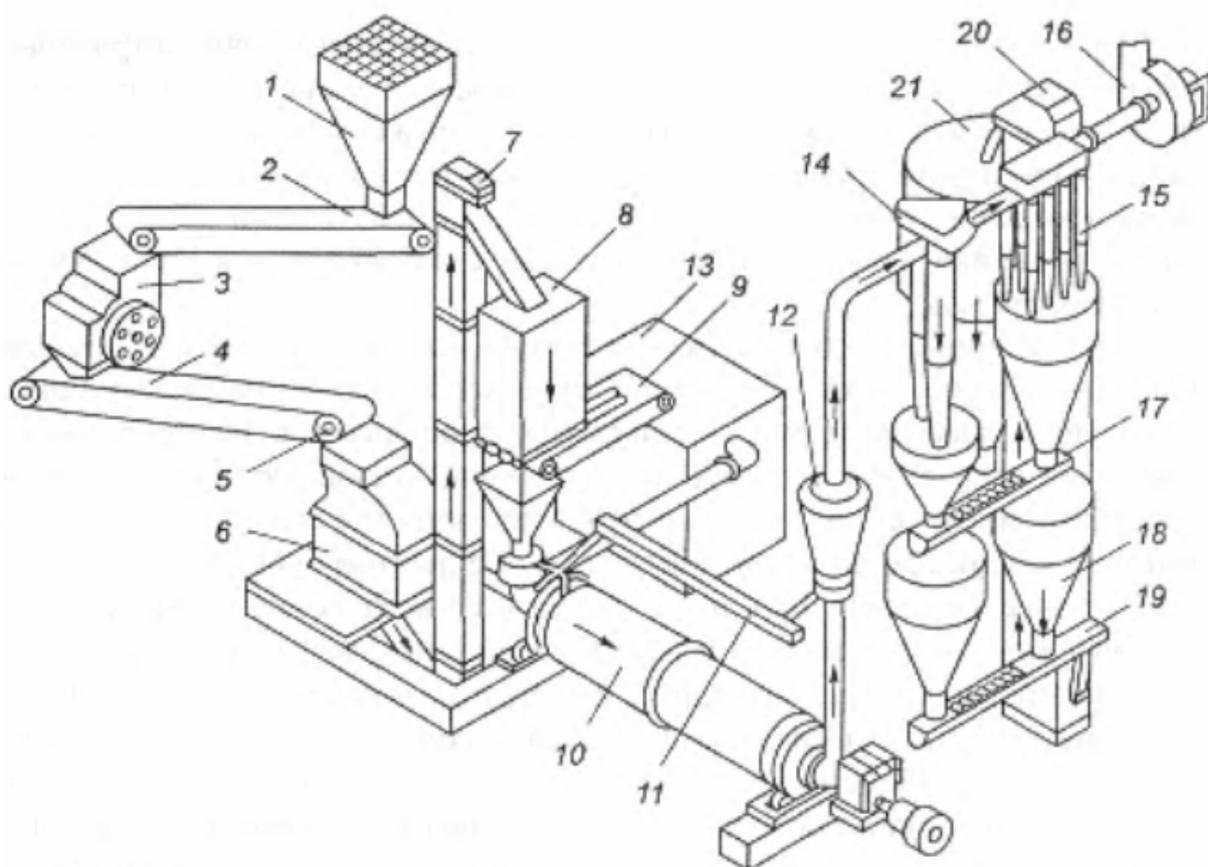


Рис. 1.7. Технологическая схема производства строительного гипса с использованием шаровой мельницы для совмещенного обжига и помола:
 1 – приемный бункер; 2, 4 – ленточный конвейер; 3 – щековая дробилка;
 5 – магнитный сепаратор; 6 – дробилка молотковая; 7 – элеватор; 8 – бункер;
 9 – барабанный затвор; 10 – мельница шаровая; 11 – винтовой конвейер
 возврата материала; 12 – сепаратор воздушный; 13 – топка; 14 – система
 пылеосаждения I ступени; 15 – система пылеосаждения II ступени;
 16 – вентилятор высокого давления; 17, 19 – винтовой конвейер;
 18 – промежуточный бункер; 20 – элеватор; 21 – бункер готового вяжущего

Технологическая схема производства строительного гипса с использованием печей кипящего слоя

Принцип работы печей кипящего слоя основан на прогрессивном способе обжига, заключающемся в том, что под слой гипсового сырья равномерно по сечению подаются горячие дымовые газы, пронизывающие материал с такой скоростью, при которой частицы гипса не выносятся потоком из слоя, но совершают внутри слоя колебательные или беспорядочные, ограниченные объемом слоя, движения. Слой как бы «кипит», почему и называется кипящим или псевдооживленным, т.е. подобным жидкости.

Равномерность псевдоожижения зависит от морфологии, фракционного состава частиц, конструктивных особенностей печи и гидродинамического режима работы установки.

На рис. 1.8 приведена технологическая схема производства строительного гипса с использованием дегидратации гипса в печи кипящего слоя, названной котлом-дегидратором и разработанной институтом «Гипростройматериалы».

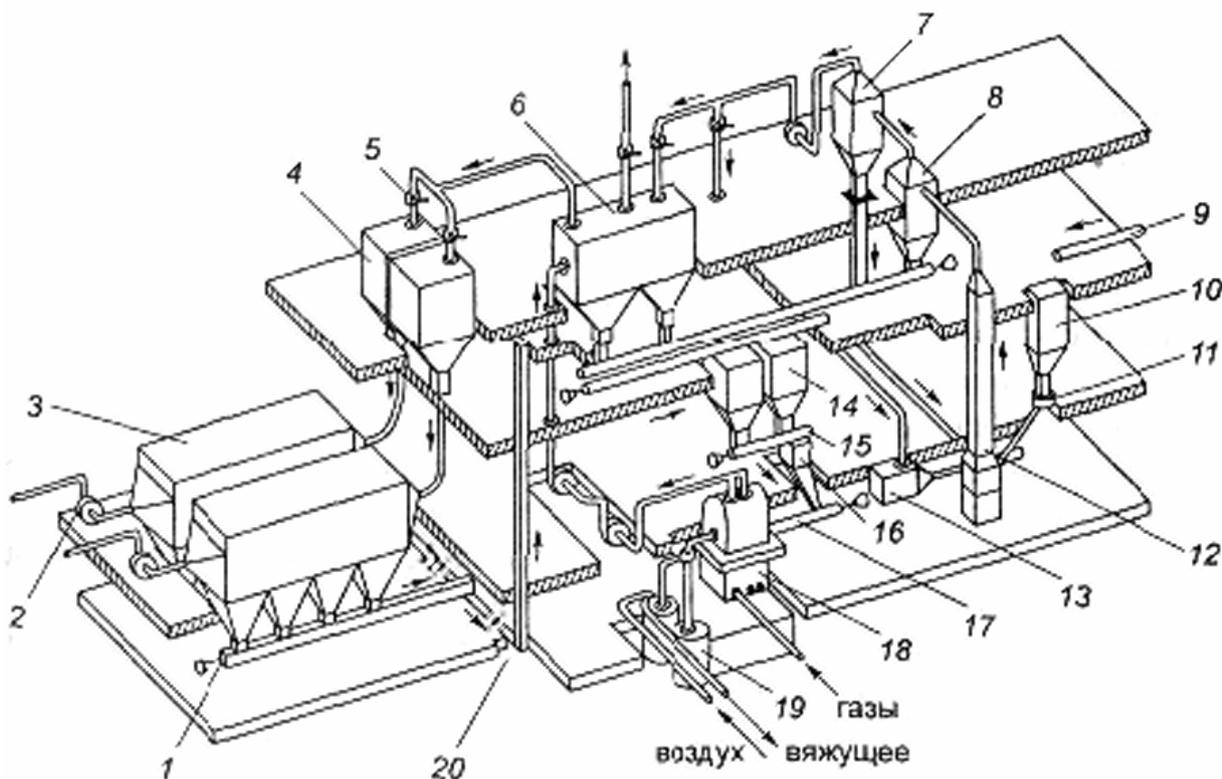


Рис. 1.8. Технологическая схема производства строительного гипса с обжигом в печи кипящего слоя производительностью 50 тыс. т/год, разработанной институтом «Гипростройматериалы»:

- 1 – винтовой конвейер; 2 – вентилятор; 3 – электрофильтр;
- 4 – камеры смешения; 5 – дроссельная заслонка; 6 – камера смешения;
- 7 – батарея из 8 циклонов; 8 – батарея из 4 циклонов; 9 – ленточный конвейер;
- 10 – бункер гипсового щебня; 11 – тарельчатый питатель;
- 12 – шахтная мельница; 13 – теплогенератор; 14 – бункера расходные;
- 15 – винтовой питатель; 16 – точка; 17 – винтовой питатель;
- 18 – печь-дегидратор; 19 – пневмокамерные питатели; 20 – элеватор

В соответствии с этой схемой обжиг сырья осуществляется в печи-дегидраторе при температуре 160...180 °С. Дегидратор располагается над топкой, снабженной четырьмя горелками, встроенными в футеровку. Продукты горения, разбавленные воздухом до 800...950 °С, просасываются вентиляторами высокого давления через днище и создают кипящий слой материала.

При автоматизации обжига в кипящем слое основным показателем процесса является температура в слое. Регулирующие воздействия при стабилизации температур осуществляются изменением расхода гипсового порошка, так как изменение параметров дымовых газов можно проводить только в узких пределах. При обжиге природного гипсового сырья работа печи характеризуется следующими показателями: температура входящих газов до 1000 °С, выходящих – 130...150 °С; температура в слое – 135 °С; температура гипса на выходе из печи – 100...125 °С; скорость газов 1,5... 2 м/с.

Печь работает под разрежением. Общее сопротивление печи 11,2 кПа, в том числе сопротивление слоя – 8,6 кПа. Удельный расход топлива 32 кг. Время обжига гипса 40 мин. Гипс измельчается в шахтной мельнице. Коэффициент использования тепла составляет 85 %.

1.1.2. Высокообжиговые гипсовые вяжущие

Особенностью производства этих вяжущих является то, что для устранения замедленных сроков схватывания и твердения возникает необходимость введения при их производстве активаторов твердения.

Технологическая схема производства ангидритового цемента

По технологии П.П. Будникова ангидритовый цемент получают путем обжига гипсового сырья при температуре 600...700 °С и последующего тонкого помола обожженного материала с различными добавками, активизирующими схватывание и твердение.

В качестве активаторов (катализаторов) твердения применяют преимущественно гашеную или негашеную известь (2...5 % массы ангидрита), основной доменный шлак (10...15 %) или обожженный при 800...900 °С доломит (3...8 %). Можно также применять для этой цели различные сульфаты, например: бисульфат и сульфат натрия (0,6 %), медный и железный купорос (9 %), сульфат глинозема или алюминиевые квасцы (2 %).

При использовании в качестве активатора обожженного доломита в исходном сырье должно находиться не менее 18 % MgO. Основной гранулированный шлак должен содержать не менее 46 % CaO, не менее 9 % Al₂O₃ и не более 3 % MgO.

При наличии в ангидрите сернистого кальция не рекомендуется применять сульфатные соединения, так как в этом случае объем ангидритового цемента при твердении изменяется неравномерно.

Технологическая схема производства ангидритового цемента с применением в качестве катализатора обожженного доломита приведена на рис. 1.9.

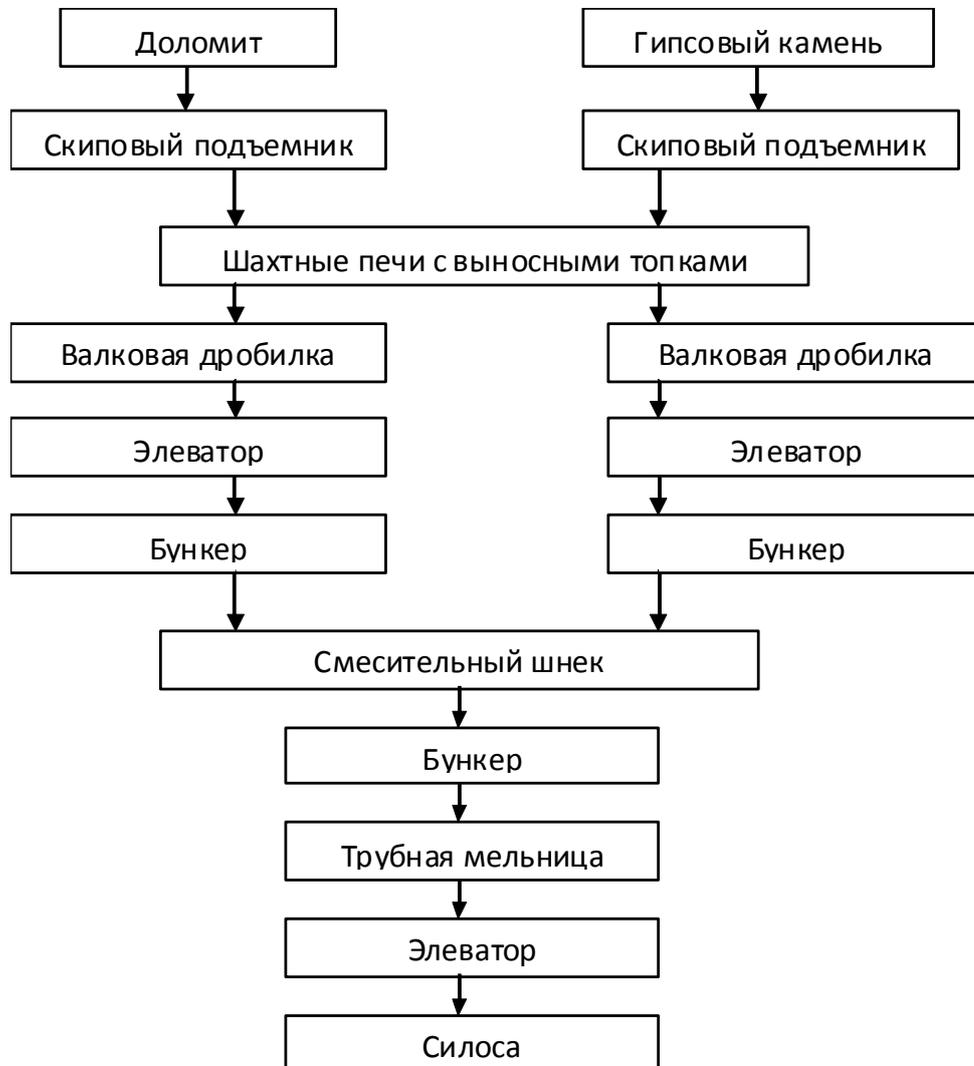


Рис. 1.9. Технологическая схема производства ангидритового цемента

Разновидностью ангидритового цемента является отделочный гипсовый цемент. Его получают одно- или двукратным обжигом гипсового камня с малым содержанием оксида железа при температуре выше 650 °С совместно с активизаторами и последующим его тонким помолом. Природный гипсовый камень, содержащий не менее 98,5 % дигидрата и не более 0,05 % оксида железа и 0,5 % карбонатов, вначале обжигают при 180...200 °С, затем пропитывают раствором алюмокалиевых квасцов. Их берут в количестве 3...4,5 % массы гипса и растворяют в нагретой до 80 °С воде. В растворе квасцов гипс выдерживают

1...2 ч, затем вторично обжигают при 650...700 °С в течение 3...4 ч и измельчают до остатка 0...1 % на сите №02 и не более 5...10 % на сите №0085.

Отделочный цемент получают также обжигом природного гипсового камня при 600...750 °С с последующим затворением измельченного ангидрита растворами квасцов, буры и других солей при концентрации их из расчета 2...3 % массы ангидрита. Отделочный цемент, получаемый при двустадийном обжиге, характеризуется улучшенными свойствами.

На заводах фирмы «Лафарж» для дегидратации гипсового сырья используют установку фирмы «Келсайдин». По этой технологии порошкообразный материал подается сверху в реактор. Дегидратация гипсового порошка происходит во взвешенном состоянии при его передвижении вниз благодаря газовой воздушной теплоносителю, поступающему в реактор из генератора тепла. Готовый продукт выгружается в нижней части реактора.

Фирмы «Бабкок-БШХ» и «Кнауф» используют для производства ангидритового или многофазового гипсового вяжущего колосниковую печь. В этом случае куски гипсового сырья различных фракций размером 5...50 мм укладывают на колосниковую решетку слоями. Решетка движется со скоростью 20...35 м/ч. Температура верхнего слоя материала в камере обжига не превышает 700 °С, а нижнего – 300 °С. Производительность колосниковых печей достигает 1200 т/сут.

На колосниковой решетке гипсовое сырье не подвергается истиранию. Это позволяет получать материал требуемого зернового состава. Производство практически не пылит, а поэтому не требует установки обеспыливающих устройств.

В этой схеме предусмотрено вторичное использование теплоносителя с температурой 230...270 °С путем подачи из зоны охлаждения и обжига в камеру сгорания. Термическая эффективность агрегата при этом превышает 70 %.

Заслуживают внимания способы получения ангидритового вяжущего, разработанные в Казанской архитектурно-строительной академии и в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева.

В Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева разработан способ производства ангидритового вяжущего повышенной водостойкости из фосфогипса (рис. 1.10).

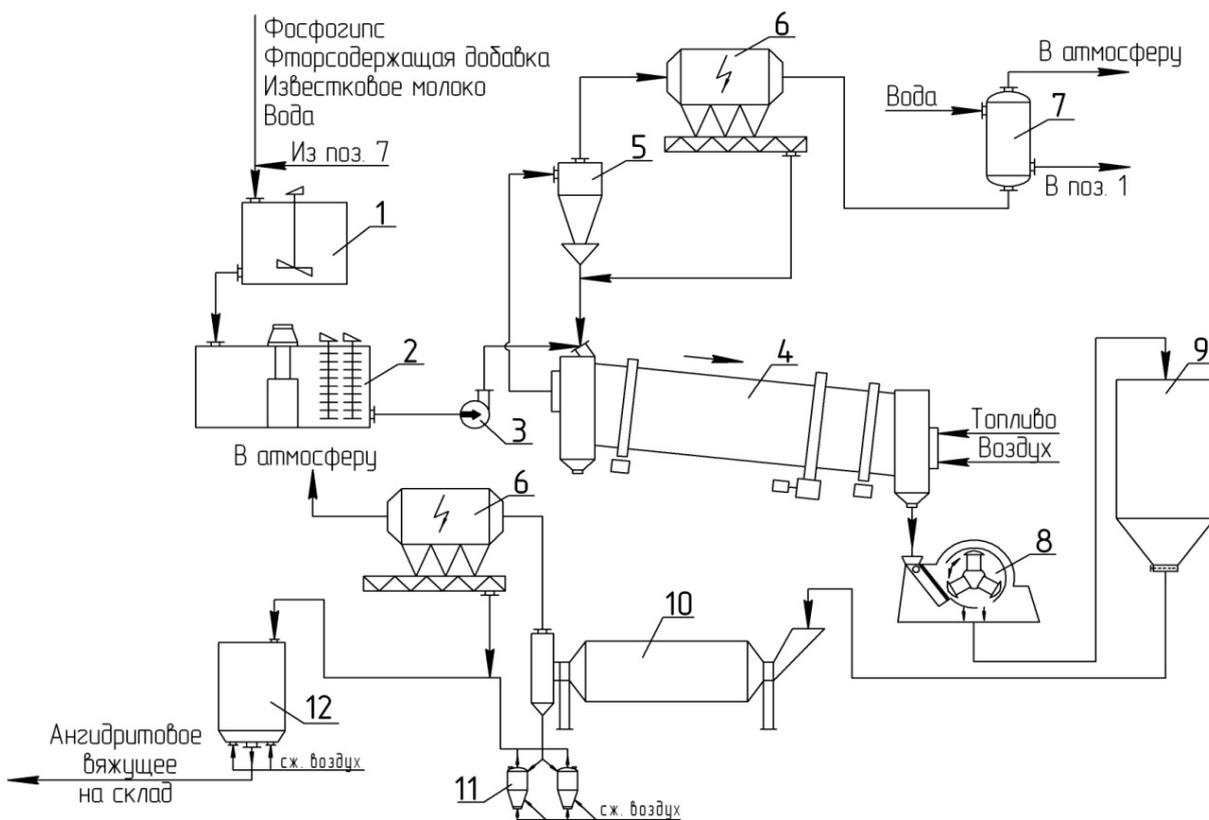


Рис. 1.10. Технологическая схема производства ангидритового вяжущего повышенной водостойкости из фосфогипса (спецификация по тексту)

По данной технологии фосфогипс подвергают нейтрализации известковым молоком, что позволяет перевести водорастворимые соединения фосфора и фтора в нерастворимые соли. Дозирование известкового молока осуществляют в таком количестве, чтобы содержание образующегося в ходе реакции нейтрализации CaF_2 было в пределах 1,0...1,5 мас. % в пересчете на фтор. При этом отношение в пульпе $\text{т:ж} = 1,5...2$, а рН сырьевого шлама находится на уровне 10...11.

Сырьевые материалы подают в репульпатор 1 на смешение, а затем полученный шлам перекачивают в шлам-бассейн 2, откуда насосом 3 он подается во вращающуюся печь 4 размером 3,6×100 м. Выходящие из печи газы очищаются от пыли в циклоне 5, электроfiltре 6 и абсорбере 7, после чего выбрасываются в атмосферу. Промывные воды из абсорбера 7 направляются в голову процесса – на приготовление шлама в репульпаторе 1.

Полученный в печи 4 ангидритовый клинкер измельчается в молотковой дробилке 8, а затем через расходный бункер 9 направляется на помол в трубную мельницу 10. Ангидритовое вяжущее пневмокамерным насосом 11 подается в силос 12.

Свойства полученного таким образом ангидритового вяжущего следующие. Предел прочности при сжатии 40...45 МПа, изгибе 10...15 МПа в 28-суточном возрасте воздушно-влажного твердения. Коэффициент водостойкости 0,8...0,9.

В УП «Научно-исследовательский институт строительных материалов» разработан технологический процесс получения ангидритового вяжущего из фосфогипса (рис. 1.11).

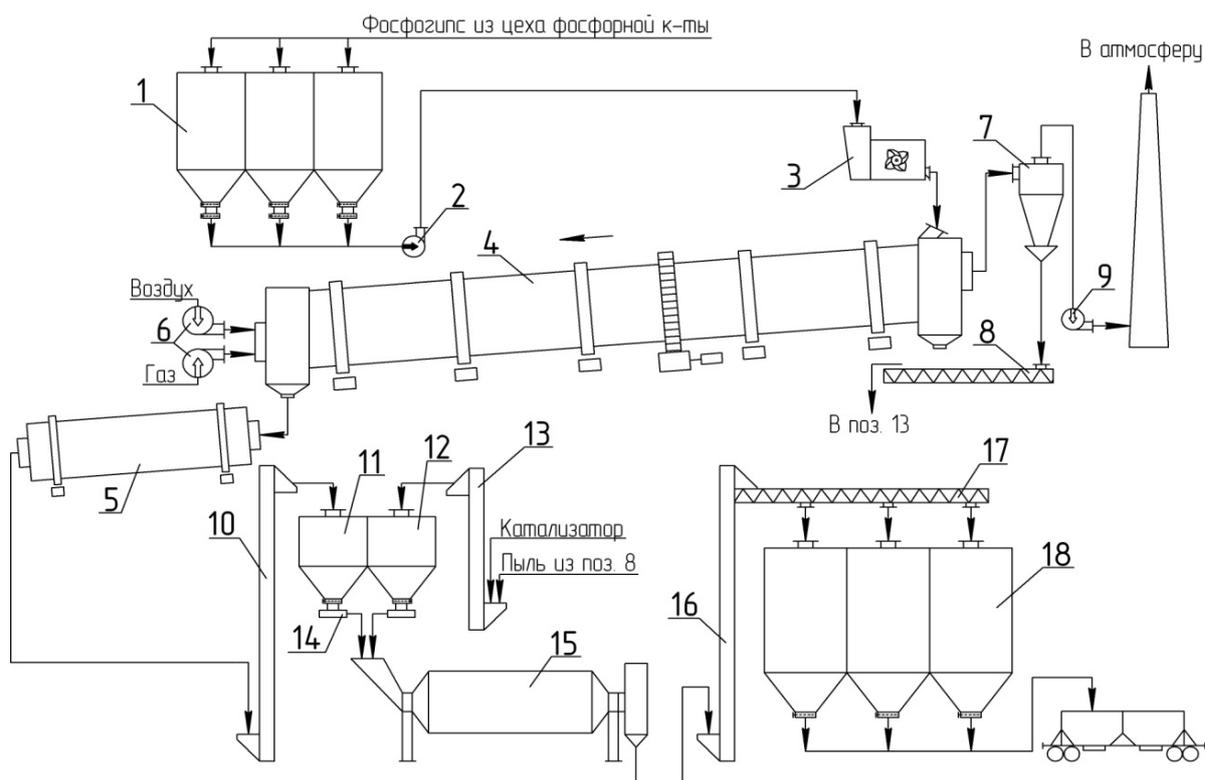


Рис. 1.11. Технологическая схема производства фосфоангидритового цемента:

- 1 – промежуточные емкости; 2 – центробежный насос; 3 – питатель;
- 4 – вращающаяся печь; 5 – барабанный холодильник; 6 – вентилятор;
- 7 – циклон; 8 – шнек для удаления пыли; 9 – дымосос; 10, 13, 16 – элеватор;
- 11, 12 – бункера; 14 – питатель; 15 – шаровая мельница; 17 – шнек;
- 18 – силосы

Основные технологические параметры данного процесса следующие. Температура обжига 1100...1200 °С при использовании сульфатных катализаторов и 1000...1050 °С в случае применения известьсо-державшего активатора.

Существуют и другие технологии производства гипсовых вяжущих. Совершенствование этих технологий позволяет снизить энергоемкость и повысить качественные характеристики гипсовых вяжущих.

Технологическая схема производства эстрихгипса

Эстрихгипс производится путем обжига гипсового сырья (двуводрата или ангидрита) при температуре 900 °С и выше.

Температура обжига для различных сортов гипсового камня различна и зависит от его плотности, величины кусков и т.д. Прочность затвердевшего эстрихгипса возрастает с повышением температуры обжига.

Технологическая схема производства эстрихгипса приведена на рис. 1.12.



Рис. 1.12. Технологическая схема производства эстрихгипса

Технологическая схема производства безобжигового гипсового цемента

Гипсовый камень подвергается дроблению в щековой дробилке, после чего просеивается на инерционном грохоте. Фракция 20... 80 мм подается в бункер щебня, а гипсовая мелочь – на переработку в строительный гипс или другие нужды. Гипсовый щебень посредством транспортного устройства поступает в шахтную печь для обжига при температуре от 900 °С и выше. Обожженный материал направляется в шаровую мельницу для помола, откуда отправляется на склад.

Технологические схемы производства безобжиговых гипсовых вяжущих веществ

Технологическая схема производства ангидритового вяжущего

Производство безобжигового ангидритового вяжущего включает следующие основные технологические операции:

- дробление природного ангидрита до кусков размером не более 20...30 мм в щековой или другой дробилке;
- сушка его при температуре 170...180 °С до влажности 0,5...1 %;
- помол высушенного ангидрита совместно с активизаторами твердения в шаровых или других мельницах;
- складирование и хранение ангидритового вяжущего не более 1...2 месяцев.

Технологическая схема производства безобжигового гипсового цемента

Гипсовый цемент можно изготавливать путем тонкого помола гипсового камня в шаровой или другой мельнице по сухому или мокрому способу с введением активизирующих добавок или без них.

С целью повышения водоустойчивости изделий из гипсового цемента вводятся портланд- или шлакопортландцемент, основные гранулированные или отвалыные доменные шлаки, котельные шлаки, кирпичный бой, доломитовая пыль и другие известьсодержащие материалы. Ввод только извести хотя и увеличивает водостойкость, но сильно снижает прочностные свойства цемента.

Контрольные вопросы

1. Какое сырье используется для производства гипсовых вяжущих?
2. Какие виды гипсовых вяжущих Вы знаете?
3. При каких условиях образуются α - и β -модификации полугидрата сульфата кальция?

4. Какое химическое вещество определяет свойства строительного гипса?
5. Какими характеристиками определяется качество строительного гипса?
6. Что является причиной более высокой водопотребности строительного гипса в сравнении с техническим гипсом?
7. Какие процессы протекают при твердении гипса?
8. При каких условиях получают высокообжиговые разновидности гипсовых вяжущих?
9. При какой температуре производится варка строительного гипса?
10. Напишите уравнение химических превращений при варке гипса.
11. Чему равен теоретический выход гипса?
12. Чем определяется отличие практического выхода гипса от теоретического?
13. В чем причина низкой прочности гипса, варка которого производилась при пониженной температуре?
14. С какой целью используются химические добавки в технологии строительных материалов на основе гипса?
15. Какие виды добавок используются в технологии гипсовых материалов?
16. Каков механизм действия пластифицирующих добавок на свойства гипсового теста?
17. Почему водоредуцирующие добавки при оптимальных дозировках ускоряют схватывание гипсового теста, а при повышенных – замедляют?
18. За счет чего повышается прочность гипса при использовании водоредуцирующих добавок?
19. Какие Вы знаете замедлители схватывания гипса?
20. Для каких технологий целесообразно использовать ускоритель схватывания и твердения гипса?
21. Можно ли за счет применения водоредуцирующих добавок сократить сроки схватывания и твердения гипса?
22. Каким показателем характеризуют водостойкость строительных материалов?
23. В чем причина низкой водостойкости гипса?
24. Как водостойкость гипса влияет на область его применения?
25. Какие существуют способы повышения водостойкости гипса?
26. Почему применение гидрофобизирующих добавок не обеспечивает значительного повышения длительной водостойкости гипсовых.

1.2. Известь воздушная

Известь воздушная – вяжущее вещество, получаемое в результате обжига не до спекания известняка или других карбонатных горных пород.

1.2.1. Требования к сырью

Для производства извести используются карбонатные осадочные горные породы – известняки и доломиты (мел, известняк, доломит). Известняки состоят из углекислого кальция CaCO_3 и небольшого количества примесей (глина, кремнезем, оксид железа, доломит и др. экз.). Теоретически чистый CaCO_3 состоит из 56 % CaO и 44 % CO_2 . Он встречается в виде 3-х минералов кальцита, арагонита и ваттерита. Чистые разновидности имеют белый цвет, но большинство окрашены.

Кальцит кристаллизуется в ромбоэдрической тригональной системе. Плотность кальцита $2,71 \text{ г/см}^3$. Твердость по Моосу – 3. Растворимость в отсутствии CO_2 при 25°C составляет $0,014...0,015 \text{ г/л}$, при 100°C – $0,03...0,04 \text{ г/л}$. Взаимодействует с соляной кислотой и разлагается с выделением CO_2 .

Арагонит – менее распространенный минерал – кристаллизуется в ромбической системе и характеризуется плотностью $2,92 \text{ г/см}^2$, твердостью – $3,5...4,0$. При нагревании до $300...400^\circ\text{C}$ арагонит превращается в кальцит.

В гидротермальных условиях образуется $\mu\text{-CaCO}_3$ – ваттерит. В доломитизированных известняках двойная углекислая соль $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, теоретически состоит из 54 % CaCO_3 и 46 % MgCO_3 или 30 % CaO , 22 % MgO и 48 % CO_2 . Плотность доломита $2,8...2,9 \text{ г/см}^3$.

Для производства воздушной и гидравлической известей используют известняки 7 классов по ОСТ 21-27–76 (табл.1.1).

Таблица 1.1
Требования к известняку для производства извести

Состав сырья	Класс						
	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
CaCO_3 , %, не менее	92	86	77	72	52	47	72
MgCO_3 , %, не более	5	6	20	20	45	45	8
Глинистые примеси ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), %, не более	3	8	3	8	3	8	20

Для производства воздушной извести применяют следующие виды известково-магнезиальных карбонатных пород минерального и органического происхождения:

1. Зернисто-кристаллический мраморовидный известняк (мрамор).
2. Мелкокристаллический (известняк).
3. Землисто-рыхлый или мел.
4. Известняк-ракушечник.
5. Оолитовый известняк.
6. Известковый туф.
7. Доломитизированный известняк.
8. Доломит.

Органогенное происхождение

Зернисто-кристаллический известняк или мрамор наиболее чистое сырье, но в связи с высокими декоративными свойствами он используется в качестве отделочного материала, а для производства извести практически не применяется.

Плотные известняки широко применяются в производстве, они имеют высокую прочность, мелкозернистую кристаллическую структуру.

Мел тоже очень часто чистое сырье, но в силу малой прочности обжигается лишь во вращающихся печах.

Известковый туф отличается высокой пористостью и находит применение в зависимости от прочности как в шахтных, так и во вращающихся печах.

Известняк-ракушечник — раковины, цементированные углекислым кальцием, редко применяется для обжига в шахтных печах.

Оолитовый известняк, состоящий из плотно цементированных оолитов и скелетных остатков организмов, прочно цементированных перекристаллизованным кальцитом, — хорошее сырье для извести.

Доломитизированные известняки (доломиты) отличаются достаточной прочностью и применяются для изготовления магнезиальной и доломитовой извести.

Средняя плотность плотных известняков 2400...2800, мела — 1400...2400, водопоглощение $W_{\text{ИЗВЕСТИ}} = 3...8\%$, $W_{\text{МЕЛА}} = 15...25\%$. В настоящее время начинают использовать отходы химической, пищевой, металлургической промышленности.

Очень чистые и плотные известняки обжигают при $t=1100...1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Количество и вид примесей отражается на выборе печей, температуре и продолжительности обжига. Чем больше в известии доломита, глины, железа, песка, тем ниже должна быть температура обжига ($900...1150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Раньше считалось, что известь хорошего качества можно получить только при использовании чистых известняков. Однако сейчас произ-

водственной практикой доказано, что даже при значительных примесях глины и песка до (5...6 %), равномерно распределенных в общей массе, при правильном ведении обжига можно получить высококачественную известь.

Примеси гипса снижают пластичность известкового теста, и известь становится медленногасящейся.

Неблагоприятно сказывается и наличие Fe_2O_3 , который при температуре 1200 °С образует легкоплавкие эвтектики и вызывает рост кристаллов CaO.

Физико-механические свойства пород также оказывают влияние на выбор способа производства и режима обжига. Для обжига в шахтных печах пригодны породы с $R_{СЖ} > 20...30$ МПа (мел, известняк-ракушечник не пригодны).

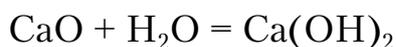
Породы с малой термостойкостью также нельзя использовать для обжига в шахтных печах. Например, некоторые крупнокристаллические известняки рассыпаются во время обжига.

1.2.2. Виды воздушной извести

Комовая негашеная известь является полупродуктом. Если ее применяют в гашеном виде, то предварительно перерабатывают в гидратную известь (пушонку) или в известковое тесто.

Основная операция при получении этих видов извести – гашение, которое состоит в обработке извести водой для перевода оксидов кальция и магния в гидраты. При гашении идет самопроизвольный распад кусков извести на тонкодисперсные частички размером не более 5...20 мкм. Чем дисперснее частички гашеной извести, тем пластичнее получаемое из нее тесто и тем более ценными строительными свойствами оно обладает. Высокая пластичность (жирность) теста определяется содержанием в нем тончайших фракций гидроксида кальция и магния (0,02...0,5 мкм). В гашеной извести должны отсутствовать неогасившиеся частицы оксидов кальция и магния, которые при последующей гидратации в затвердевших растворах и бетонах могли бы отрицательно влиять на их качество. При гашении следует стремиться к полному переводу оксидов кальция и магния в их гидраты $Ca(OH)_2$ и $Mg(OH)_2$ и получению продукта с максимальной дисперсностью частичек.

Гашеная известь (пушонка) получается в процессе взаимодействия извести с водой:



При гашении извести выделяется значительное количество теплоты, составляющее 1160 кДж на 1 кг оксида кальция. При гашении может происходить сильный разогрев, вызывающий кипение воды. Перегрев извести при гашении приводит к укрупнению частиц готового продукта. Чем выше температура гашения извести (особенно паром) в гидратную известь-пушонку, тем крупнее и прочнее образующиеся агрегаты гидроксида кальция, почти неспособные в дальнейшем в смеси с водой распадаться на тончайшие частички и давать высокопластичное тесто. При гашении извести в тесто целесообразно устанавливать температуру гасящейся массы в пределах 60...80 °С с тем, чтобы, с одной стороны, не было перегрева материала, а с другой – процесс взаимодействия извести с водой протекал достаточно интенсивно и скоро. Предотвращению перегрева, особенно местного, в толще кусков способствуют также применение измельченной извести (до 1...10 мм), перемешивание во время гашения и, наконец, установление оптимального количества воды для гашения в соответствии со свойствами извести. Перемешивание материала предотвращает также возможное образование пленок $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на частицах оксида кальция и прекращение ее гидратации. Воду нужно вводить в материал в полном объеме или отдельными дозами с тем, чтобы удерживать температуру массы в указанных пределах.

1.2.3. Свойства воздушной извести и области ее применения

По ГОСТ 9179–77, строительная воздушная известь разделяется на три сорта. Истинная плотность негашеной извести колеблется в пределах 3,1...3,3 г/см³, и на нее влияют главным образом температура обжига, наличие примесей, недожога и пережога. Истинная плотность гидроксида кальция зависит от степени кристаллизации и равна: для $\text{Ca}(\text{OH})_2$, кристаллизованной в форме гексагональных пластинок, – 2,23, для $\text{Ca}(\text{OH})_2$ аморфной – 2,08 г/см³. Средняя плотность комовой негашеной извести в куске в большой мере зависит от температуры обжига и возрастает с 1,6 (известь, обожженная при 800 °С) до 2,9 г/см³ (длительный обжиг при 1300 °С). Насыпная плотность, кг/м³, для извести других видов следующая: для молотой негашеной в рыхлонасыпном состоянии – 900...1100, в уплотненном – 1100...1300; для гидратной извести (пушонки) в рыхлонасыпном состоянии – 400...500, в уплотненном – 600...700; для известкового теста – 1300...1400.

Пластичность, обуславливающая способность вяжущего придавать строительным растворам и бетонам удобообрабатываемость, – важнейшее свойство извести. Пластичность извести связана с ее высокой во-

доудерживающей способностью. Тонкодисперсные частички гидроксида кальция, адсорбционно удерживая на своей поверхности значительное количество воды, создают своеобразную смазку для зерен заполнителей в растворной или бетонной смеси, уменьшающую трение между ними. Вследствие этого известковые растворы обладают высокой удобообрабатываемостью, легко и равномерно распределяются тонким слоем на поверхности кирпича или бетона, хорошо сцепляются с ними, отличаются водоудерживающей способностью даже при нанесении на кирпичные и другие пористые основания. Все это благоприятно отражается на производительности труда при кладочных и штукатурных работах, на их качестве, а также на долговечности кладки и штукатурки. Известь до сих пор является одним из основных материалов, используемых для изготовления чисто известковых и сложных (известково-цементных, известково-гипсовых и др.) строительных растворов.

Прочность растворов и бетонов на строительной воздушной извести прежде всего зависит от условий ее твердения. Медленно твердеют при обычных температурах (10...20 °С) и через месяц приобретают небольшую прочность (0,5...1,5 МПа) растворы на гашеной извести. Гидратное твердение растворов на молотой негашеной извести дает возможность через 28 сут воздушного твердения достичь прочности при сжатии до 2...3 МПа. При автоклавном твердении можно легко готовить плотные известково-песчаные бетоны с прочностью при сжатии до 30...40 МПа и более. Прочность растворов и бетонов на строительной извести возрастает также с увеличением ее активности и уменьшением до некоторого предела водоизвесткового отношения.

Известково-песчаные бетоны и изделия автоклавного твердения, особенно изготовленные на молотой негашеной извести, характеризуются высокой водо- и морозостойкостью. В этом отношении они' практически равноценны изделиям из бетонов на цементах.

Из строительной воздушной извести готовят растворы, предназначенные для наземной кладки частей зданий и штукатурок, работающих в воздушно-сухих условиях: бетоны низких марок для конструкций, эксплуатируемых в воздушно-сухих условиях; плотные и ячеистые силикатные (автоклавные) изделия, в том числе крупные блоки и панели; легкобетонные камни, теплоизоляционные и другие материалы автоклавного твердения; смешанные гидравлические вяжущие (известково-шлаковые и известково-пуццолановые цементы); известковые красочные составы.

Широкое применение извести в строительстве обусловлено тем, что она является местным вяжущим веществом. Сырье и топливо для ее получения имеются почти повсюду, а организация производства связана с относительно невысокими капиталовложениями.

1.2.4. Обжиг воздушной извести

Для обжига извести применяют печи различных типов: шахтные, вращающиеся и др. Используют также установки для обжига извести во взвешенном состоянии, в кипящем слое, на специальных решетках и т.д.

Широкое распространение получили шахтные печи, представляющие собой полый цилиндр, имеющий наружный стальной кожух толщиной около 10 мм и внутреннюю огнеупорную кладку и вертикально установленный на фундаменте. Эти печи характеризуются непрерывностью действия, пониженным расходом топлива и электроэнергии, а также простотой в эксплуатации.

По степени обжига различают извести мягкообожженные, среднеобожженные и сильнообожженные. Первые характеризуются отсутствием пережога и быстрой гасимостью. В сильнообожженных известях может присутствовать пережог, для них характерно замедленное гашение.

Процессы, происходящие в печи, разделяют на 3 группы: подогрев, обжиг и охлаждение.

Подогрев сырья осуществляется в верхней части печи при температуре до 850 °С. В этой зоне материал разогревается поднимающимися дымовыми газами. Обжиг происходит в средней части печи, где температура повышается от 850 до 1200 °С и затем снижается до 900 °С. Здесь происходит декарбонизация известняка, т.е. разложение на СаО и СО₂.

В нижней части печи известь охлаждается до температуры 50...100 °С за счет поступающего снизу воздуха.

Для шахтных печей характерен низкий расход топлива.

Вращающиеся печи для обжига извести позволяют получать мягкообожженную известь высокого качества из известняка и мягких карбонатных пород (мел, туф, ракушечник) в виде мелких кусков. Вращающиеся печи допускают возможность полной механизации и автоматизации процесса обжига. Наконец, в них можно применять все виды топлива – пылевидное, твердое, жидкое и газообразное.

Расход условного топлива во вращающихся печах значителен и достигает 25...30 % массы извести, или 6700...8400 кДж на 1 кг. Недостатки вращающихся печей – большой расход металла на 1 т мощности, повышенные капиталовложения и значительный расход электроэнергии.

Для обжига извести применяют вращающиеся печи длиной 30...100 м, диаметром 2...4 м, с углом наклона 3...4° и частотой вращения 0,5...1,2 об/мин. Удельная суточная производительность их достигает 500...700 кг/м³ в расчете на полный объем обжигательного барабана.

С увеличением длины печей производительность их возрастает, а расход топлива снижается.

Для уменьшения расхода топлива на обжиг извести во вращающихся печах и для утилизации теплоты газов, выходящих из печей с температурой 750...800 °С, применяют разные способы. В частности, за печами ставят нагреватели, в которые направляют предназначенный для обжига кусковой материал. Отсюда с температурой 500...800 °С он поступает во вращающуюся печь, а из нее в холодильник. При таком способе работы печи расход теплоты на обжиг снижается до 4600...5030 кДж/кг извести.

Применяют самые разные конструкции нагревателей сырья (шахтные, ступенчатые, циклонные и т.п.). Работают они за счет теплоты отходящих газов. Созданы также установки, представляющие собой сочетание шахтной печи диаметром до 6...8 м с вращающейся печью диаметром около 2,5 м. При этом мелкокусковой фракционированный известняк обжигается на 80 % в шахте с использованием кокса и окончательно – во вращающейся печи. Суточная производительность подобной установки достигает 400...500 т при затрате теплоты около 4200 кДж/кг.

Выбор типа печи для обжига извести определяется производительностью завода, физико-механическими свойствами и химическим составом известняка, видом топлива и требуемым качеством извести.

В результате обжига получают комовую известь, которую транспортируют на склад ленточными конвейерами со стальной лентой. Комовую известь хранят в механизированных складах бункерного типа или в силосах, в которых обеспечиваются герметизация, аспирация и обеспыливание. Известь перевозят в специально оборудованных автомашинах или вагонах. При хранении и транспортировке необходимо предотвращать увлажнение извести, т.к. при этом ухудшается ее качество.

1.2.5. Производство комовой и молотой извести в шахтных печах

Рациональной схемой производства извести является такая, при которой известняк, а для пересыпных печей и топливо поступают на заводской склад в сортированном виде. При этом сырье сортируют на дробильно-сортировочной фабрике или установке карьера, а твердое топливо – на шахте.

Если сырье и топливо поступают на заводской склад в несортированном виде, то на заводе предусматривают дробильно-сортировочное отделение, которое имеет в своем составе дробильно-сортировочные

установки и обеспечивает шахтные печи сырьем и твердым топливом определенного фракционного состава.

Технологическая линия по выпуску фракционированного известняка на карьерах включает следующие операции: разделение известняка на фракции до и выше 120 мм, дробление фракций более 120 мм в щековой дробилке, рассев на вибрационном грохоте на фракции менее 50 мм (мелкая), до 50...80 мм (средняя) и фракцию 80...120 мм – остаток на верхнем сите виброгрохота. После рассева на виброгрохоте фракция известняка менее 50 мм подается в отделение известняковой муки. Фракции 50...80 и 80...120 мм подаются аналогичным оборудованием в печной цех, где обжигаются каждая в отдельной шахтной печи.

Технологическая схема производства молотой извести в шахтных газовых печах представлена на рис. 1.13. Мостовой грейферный кран 1 загружает фракционированный известняк со склада сырья в промежуточный бункер 2, откуда он пластинчатым питателем 3 подается на виброгрохот 4 для отсева кусков размером менее 50 мм. Отсеянная мелочь известняка накапливается в бункере отходов 5, из которого она вывозится автотранспортом на склад отходов известняка.

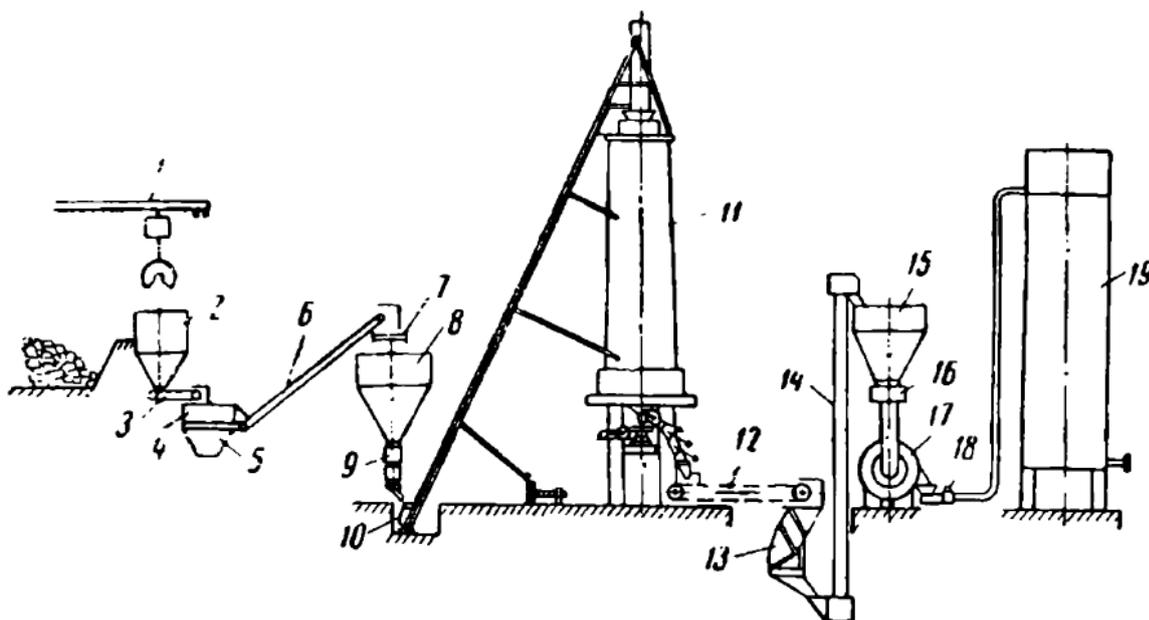


Рис. 1.13. Технологическая схема производства молотой извести в шахтных печах на газообразном топливе:

- 1 – мостовой кран; 2 – промежуточный бункер;
- 3 – пластинчатый питатель; 4 – вибрационный грохот;
- 5 – бункер известняка фракции менее 50 мм; 6 – наклонный ленточный транспортер;
- 7 – горизонтальный ленточный транспортер;
- 8 – бункер; 9 – автоматический дозатор; 10 – ковш; 11 – шахтная печь;
- 12 – пластинчатый транспортер; 13 – молотковая дробилка;
- 14 – элеватор; 15 – бункер извести; 16 – тарельчатый питатель;
- 17 – шаровая мельница; 18 – пневмовинтовой насос;
- 19 – склад молотой извести

В зависимости от количества отходов и наличия потребителей фракция известняка менее 50 мм либо используется в дальнейшем для переработки на известняковую муку, либо продается другим организациям – заводам силикатного кирпича, строительным организациям.

Очищенная фракция известняка наклонным ленточным транспортером 6 подается на горизонтальный ленточный транспортер 7 с плужковыми сбрасывателями и далее в приемные бункера 8 печей. Из бункера определенная фракция известняка автоматическим дозатором 9 подается в ковш 10 скипового подъемника и далее загружается в шахтную печь 11.

В печи известняк, по мере опускания, подвергается нагреванию до 1000...1200 °С и разлагается на CaO и CO₂. Образующиеся газообразные продукты удаляются из печи дымососом через газоочистное устройство, а известь, охлажденная в нижней части печи движущимся навстречу холодным воздухом, через выгрузочный механизм поступает на общий для всех печей пластинчатый транспортер 12.

Пластинчатый транспортер подает комовую известь в молотковую дробилку 13, где она измельчается до размера кусков менее 25 мм и ковшовым элеватором 14 загружается в бункер 15. Из бункера дробленая известь тарельчатым питателем 16 равномерно загружается в шаровую мельницу 17. Молотая известь из мельницы забирается пневматическим насосом 18 и транспортируется на силосный склад молотой извести 19, откуда она направляется потребителю автомобильным или железнодорожным транспортом.

При выпуске извести в комовом виде пластинчатый транспортер 12 направляет ее в промежуточный бункер, откуда она либо отгружается потребителям, либо транспортируется ленточным транспортером на склад комовой извести.

1.2.6. Производство комовой и мелкодисперсной извести во вращающихся печах

В длинных вращающихся печах без запечных теплообменников на известь обжигают чистые карбонатные породы любой механической прочности, включая влажный мел, известняковый туф, известняк-ракушечник, рыхлый известняк и т.д. В коротких вращающихся печах с запечными теплообменниками целесообразно обжигать известняки средней и высокой механической прочности. Карбонатные породы фракции до 50 мм при обжиге во вращающихся печах со слоевыми запечными теплообменниками необходимо использовать в виде узких фракций, например 10...20 и 20...50 мм.

Технологическая схема производства комовой извести во вращающейся печи со слоевым запечным теплообменником приведена на рис. 1.14.

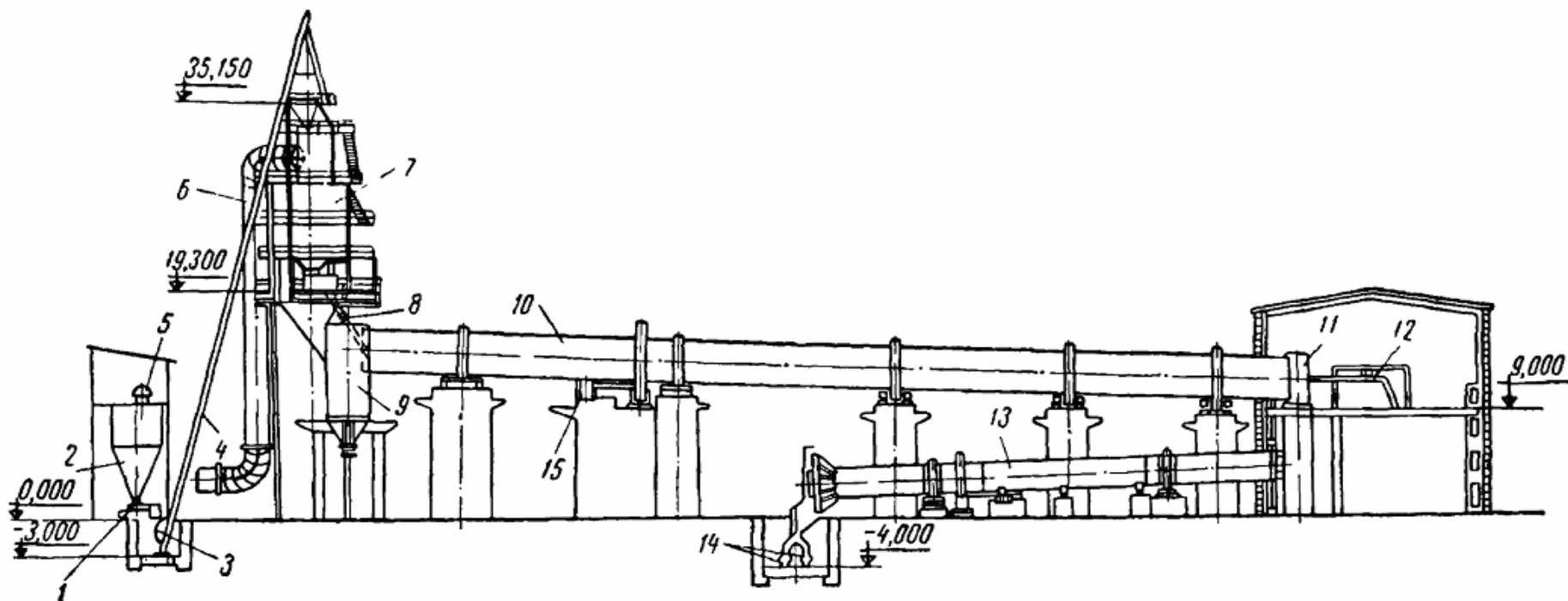


Рис. 1.14. Технологическая схема производства комовой извести во вращающейся печи со слоевым запечным теплообменником:
 1 – электровибрационный питатель; 2 – приемный бункер; 3 – ковш;
 4 – скиповой подъемник; 5 – ленточный транспортер; 6 – газоход;
 7 – шахтный подогреватель; 8 – течка; 9 – пылеосадительная камера;
 10 – вращающаяся печь; 11 – горячая головка печи; 12 – форсунка;
 13 – холодильник; 14 – пластинчатые конвейеры

Известняк фракции 20...50 мм ленточным транспортером 5 загружается в приемный бункер 2, откуда электровибрационным питателем 1 подается в ковш 3 скипового подъемника 4. По сигналу автоматического уровнемера, расположенного в подогревателе 7, скиповой подъемник загружает в него известняк. Подогретый в теплообменнике отходящими печными газами до температуры 600...625 °С известняк равномерно выгружается из него кареточным питателем и по течке 8 поступает во вращающуюся печь 10.

Выходящие из печи газообразные продукты проходят через пылеосадительную камеру с температурой 700...750 °С, поступают в теплообменник шахтного типа, где отдают часть своего тепла известняку, охлаждаясь до температуры 430...450 °С. После теплообменника печные газы по газоходу 6 просасываются дымососом Д-18 через две группы циклонов НИИОГАЗ ЦН-15 диаметром 800 мм и выбрасываются в дымовую трубу.

Во вращающейся печи размером 2,7×50,6 м известняк подогревается до температуры 1100...1200 °С и разлагается на известь и углекислый газ. Жидкое топливо вводится в печь через форсунку 12. Выходящая из вращающейся печи с температурой 1000 °С известь поступает в одnobарабанный холодильник 13 размером 1,8×20,7 м, где охлаждается вторичным воздухом до температуры 100...120 °С. Из холодильника известь, поступившая на один из пластинчатых конвейеров 14 (один резервный), транспортируется в дробильно-помольное отделение.

Технологическая схема производства мелкодисперсной извести во вращающейся печи с циклонным теплообменником приведена на рис. 1.15.

Известняк средней механической прочности краном 1 грузится в приемный бункер 2, откуда пластинчатым питателем 3 подается в дробилку ударного действия 4. Измельченный известняк из дробилки ленточным конвейером 5 транспортируется в печное отделение, где ковшовым элеватором 6 загружается в промежуточный бункер 7.

Из бункера известняк скребковым питателем 8 равномерно подается в шахтную мельницу 9. В шахтную мельницу из циклона 12 поступают печные газы с температурой 350 °С. Известняк измельчается в шахтной мельнице до фракции 0...1,2 мм, высушивается, подогревается до температуры 140 °С и выносится из нее потоком в группу циклонов 14. Таким образом осуществляется подогрев сырья в первой ступени (шахтной мельнице).

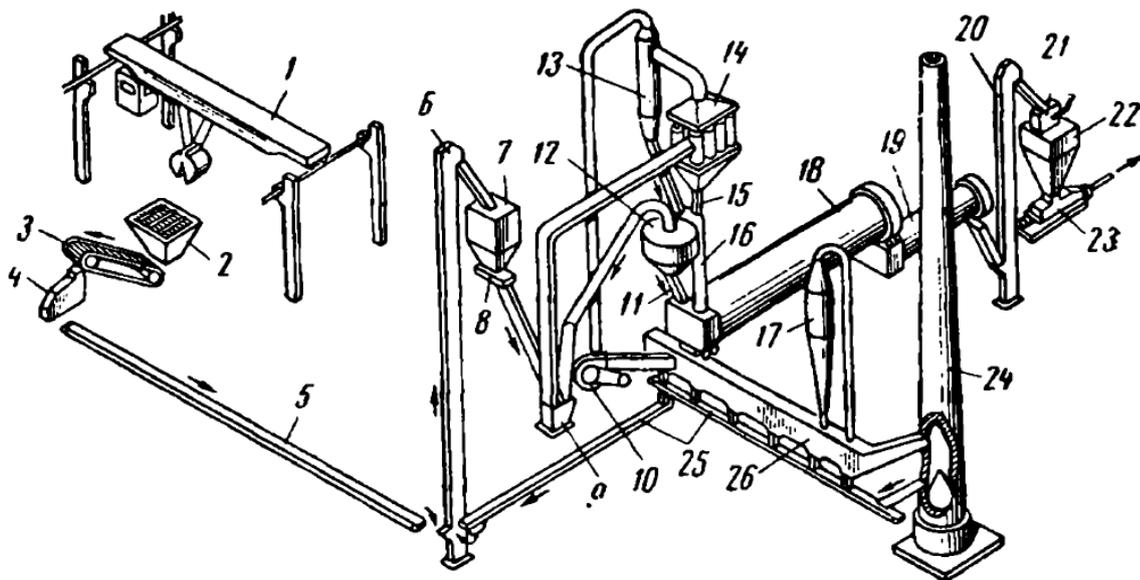


Рис. 1.15. Технологическая схема производства мелкодисперсной извести во вращающейся печи с циклонным теплообменником:
 1 – мостовой кран; 2 – приемный бункер; 3 – пластинчатый питатель;
 4 – дробилка ударного действия; 5 – ленточный конвейер;
 6 и 20 – элеваторы; 7 – промежуточный бункер; 8 – скребковый питатель; 9 – шахтная мельница; 10 – дымосос; 11 и 15 – течи;
 12 – циклонный теплообменник; 13 – батарейный циклон;
 14 – циклоны НИИОГАЗ; 16 и 26 – газоходы;
 17 – вертикальный электрофильтр; 18 – вращающаяся печь;
 19 – холодильник; 21 – весы; 22 – бункер извести;
 23 – пневмовинтовой насос; 24 – дымовая труба; 25 – шнеки

Осажденный в циклонах известняк через уплотнительный клапан и течку 15 поступает в газоход 16. В газоходе материал подхватывается выходящим из вращающейся печи с температурой 600 °С потоком газов и транспортируется в циклонный теплообменник 12. В циклоне материал подогревается во взвешенном состоянии до температуры 300...350 °С (вторая ступень подогрева), отделяется от газов и через уплотнительный клапан по течке 11 поступает во вращающуюся печь 18 на обжиг. После очистки от материала в циклонах 14 печные газы поступают на доочистку в батарейный циклон 13 и дымососом 10 по газоходу 26 направляются на окончательную очистку от пыли в вертикальный электрический фильтр 17. Осажденный в циклоне 13 материал через уплотнительный затвор и течку поступает в газоход 16 и потоком газов уносится в циклон 12. Очищенные в электрофильтре 17 дымовые газы через трубу 24 выбрасываются в атмосферу.

Выпавшие в пылеосадительной камере, электрофильтре и газоходе 26 частицы материала шнековыми транспортерами 25 направляются через элеватор 6 в технологическую линию.

Во вращающейся печи известняк (карбонатит) обжигается при температуре 1000...1100 °С и после охлаждения в барабанном холо-

дильнике 19 ленточным элеватором 20 через весы 21 подается в бункер извести 22. Из бункера известь пневмонасосом транспортируется в силосный склад.

1.2.7. Производство воздушной гашеной извести в гидратах непрерывного действия

Технологическая схема производства воздушной гашеной извести в гидратах непрерывного действия показана на рис. 1.16.

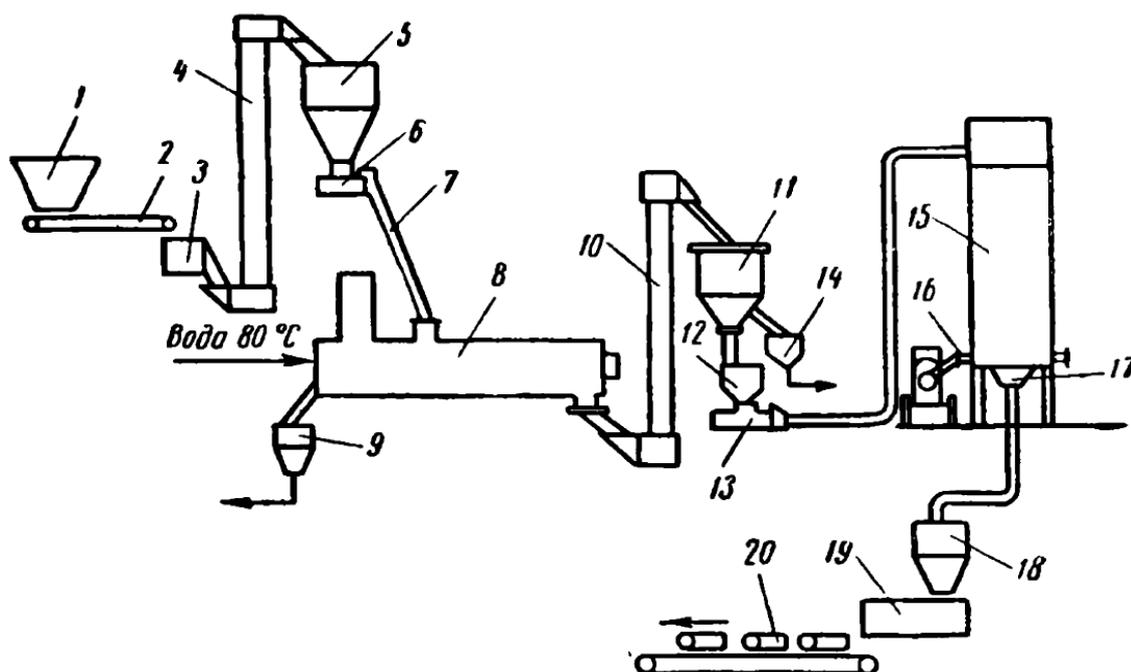


Рис. 1.16. Технологическая схема производства гашеной извести в гидратах непрерывного действия:
 1 – приемный бункер; 2 – ленточный питатель; 3 – молотковая дробилка;
 4 и 10 – элеваторы; 5 – бункер питательный; 6 – дисковый питатель;
 7 – течка; 8 – гидратор; 9 – бункер отходов; 11 – сепаратор;
 12 – бункер промежуточный; 13 – пневмовинтовой насос;
 14 – бункер примесей; 15 – силосный склад пушонки;
 16 и 17 – пневмовыгрузчики боковой и донной выгрузки; 18 – бункер;
 19 – упаковочная машина; 20 – транспортер

Воздушная комовая известь поступает в приемный бункер 1 производства гидратной извести и ленточным питателем 2 подается в молотковую дробилку 3. Дробленая известь элеватором 4 направляется в питательные бункера 5 гидрататоров. Из бункера известь дисковым питателем 6 равномерно загружается через течку 7 в гидратор 8 непрерывного действия.

Через полый вал в гидратор поступает вода с постоянной температурой, равной 80 °C. В первой половине аппарата (в камере с цилинд-

рическим ситом) происходят увлажнение, гашение и разрыхление извести. Непогасившиеся частицы при этом выходят из гидратора и накапливаются в бункере 9. Во второй половине аппарата осуществляются догашивание и сушка извести.

Выдаваемая из аппарата лопастным валом гашеная известь ковшовым элеватором 10 загружается в сепаратор 11. В сепараторе происходит окончательное отделение пушонки от примесей, которые собираются в бункере 14. Известь необходимого фракционного состава поступает из сепаратора в бункер 12, откуда она пневмонасосом 13 загружается в силосный склад гашеной извести 15. Далее пушонку отправляют потребителю автотранспортом, загружаемым с помощью пневмовыгрузателя 16 боковой выгрузки. Известь, выгружаемая из силосов пневморазгрузателем 17 донной выгрузки, направляется в бункер 18 упаковочной машины 19. Упаковочная машина дозирует гашеную известь в бумажные мешки, зашивает их и выдает на ленточный транспортер 20, который отправляет продукцию на склад.

Контрольные вопросы

1. Что используется в качестве сырья для производства строительной извести?
2. Чему равен теоретический выход извести из известняка?
3. Какие типы печей используются для обжига извести?
4. При каких температурах производят обжиг извести?
5. Что такое пережог извести и как он влияет на ее свойства? В чем заключается опасность использования такой извести в технологии строительных материалов?
6. Как влияет недожог извести на ее свойства?
7. Какие виды извести Вы знаете?
8. В технологии производства каких строительных материалов используется строительная известь?

1.3. Магнезиальные вяжущие

К магнезиальным вяжущим веществам относят каустический магнезит, состоящий из MgO , и каустический доломит, состав которого характеризуется формулой $MgO \cdot CaO$. Широко применяется каустический магнезит, который получают обжигом в шахтных или вращающихся печах при температуре $700...800$ °С природного минерала магнезита, состоящего из карбоната магния $MgCO_3$. В природе встречаются кристаллическая и аморфная разновидности магнезита, имеющие различную плотность.

Для получения вяжущего каустический магнезит после обжига измельчают до остатка на сите № 02 не более 5 %, а на сите № 008 – не более 25 %.

Для получения магнезиального цемента вяжущее необходимо затворить растворами солей: $MgCl$, $MgSO_4$, $ZnCl_2$, $FeSO_4$ и др.

Производство каустического магнезита заключается в добыче сырья, его дроблении, обжиге и помоле. При обжиге магнезита он разлагается по реакции $MgCO_3 = MgO + CO_2$. Реакция разложения карбоната магния эндотермическая с затратой 1440 кДж теплоты на 1 кг $MgCO_3$. Разложение $MgCO_3$ начинается примерно при 400 °С, но протекает достаточно полно лишь при 600...650 °С.

При увеличении температуры обжига свыше 800 °С оксид магния постепенно уплотняется и приобретает крупнокристаллическое строение. В таком виде MgO называется периклазом, с водой он почти не взаимодействует.

Нормально обожженный каустический магнезит имеет истинную плотность 3,1...3,4 г/см³. При недожоге истинная плотность каустического магнезита ниже 3,1, а при пережоге – выше 3,4 г/см³ вследствие наличия в нем периклаза с истинной плотностью 3,7 г/см³.

Обжигают магнезит в шахтных печах с выносными топками, а также во вращающихся печах. Обожженный каустический магнезит измельчают до остатка на сите 02 не более 5 %, а на сите 008 – не более 15 %.

Готовое вяжущее обычно упаковывают в металлические барабаны для предотвращения его гидратации.

Гидратация магнезиального вяжущего. При затворении водой каустический магнезит твердеет медленно и обладает небольшой прочностью. При затворении растворами хлористого магния $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ или сернокислого магния $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ скорость твердения резко возрастает.

Концентрацию раствора хлористого магния берут в 12...30° по Боме, а сернокислого магния – 15...20°; чем она больше, тем медленнее схватывается вяжущее, но тем выше конечная прочность получаемого затвердевшего камня. Увеличение концентрации раствора сверх указанных значений приводит к появлению на изделиях трещин с выделением избытка солей в виде налета кристаллов на поверхности.

Строительные изделия, изготовленные на каустическом магнезите с применением хлористого магния, характеризуются гигроскопичностью; при повышенном содержании в них хлористого магния могут давать выцветы. Схватывание и твердение каустического магнезита обусловлено гидратацией оксида магния. При затворении каустическо-

го магнезита водой начинается медленное взаимодействие с ней оксида магния по реакции $MgO + H_2O = Mg(OH)_2$. При активации магнезита водным раствором хлористого или серноокислого магния скорость взаимодействия оксида магния с водой резко возрастает вследствие повышенной его растворимости в указанных растворах.

Магнезиальный цемент в строительстве применяют для устройства теплых бесшовных, так называемых ксилолитовых полов, основным наполнителем которых служат древесные опилки: эти полы относительно малотеплопроводны, мало истираются, негорючи. Для изготовления фибролитовых плит, получаемых формованием из смеси органических наполнителей (стружки, костры и др.) и каустического магнезита, в качестве жидкости затворения используются растворы солей магния.

Каустический доломит – двойная углекислая соль магния и кальция ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$) – слагает горные породы осадочного происхождения. Истинная плотность доломита 2,85...1,95 г/см³. Обычно доломиты содержат около 20 % MgO, 30 % CaO и 45 % CO₂. В природе доломит встречается значительно чаще, чем магнезит.

Обжигая доломиты при разных температурах, можно готовить: каустический доломит, состоящий из MgO и CaCO₃ и получаемый при 650...750 °С, с последующим измельчением; доломитовый цемент, состоящий из MgO, CaO и CaCO₃ и получаемый при 750...850 °С, с последующим измельчением в тонкий порошок. Доломитовый цемент затворяется водой; по показателям прочности при сжатии трамбованных образцов из раствора 1:3 через 28 сут твердения на воздухе характеризуется марками 25...50.

Производство каустического доломита принципиально не отличается от производства каустического магнезита. Доломит в заводских условиях обжигают при 650...750 °С в шахтных печах с выносными топками и во вращающихся печах.

При затворении каустического доломита растворами солей магния CaO реагирует с ними с образованием хлористого или серноокислого кальция, что отрицательно отражается на качестве затвердевшего каустического доломита.

Контрольные вопросы

1. Что является основным химическим веществом в каустическом магнезите и доломите?
2. При какой температуре обжигают каустический магнезит?
3. Что используется в качестве затворителя в магнезиальных вяжущих?

4. При какой температуре MgO превращается в периклаз? Чем характеризуется этот минерал?

5. В каких печах обжигают магнезит и каустические вяжущие?

6. Чем обусловлено схватывание и твердение каустического магнезита?

7. Какие Вам известны области применения магнезиального цемента?

8. Что используется в качестве заполнителя для устройства полов на основе магнезиального вяжущего?

2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

К гидравлическим вяжущим относятся гидравлическая известь, романцемент и портландцемент. Практическое значение в современном строительстве имеет только портландцемент, который является универсальным вяжущим, применяющимся для производства конструктивных и теплоизоляционных бетонов, а также для отделочных и ремонтных работ.

2.1. Гидравлическая известь и романцемент

Гидравлическую известь получают обжигом при температуре 900...1100 °С мергелистых известняков, содержащих от 6 до 25 % глинистых и тонкодисперсных песчаных примесей.

Сырье для производства гидравлической извести и готовый продукт характеризуют основным (гидравлическим) модулем:

$$OM = CaO / (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3),$$

где CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ – содержание в сырье или готовом продукте соответствующих оксидов, %.

Известь считается гидравлической, если значения основного модуля находятся в интервале от 1,7 до 9. При OM = 1,7...4,5 известь называют сильногидравлической, а при OM = 4,5...9 – слабогидравлической. Если гидравлический модуль сырья меньше 1,7, то при обжиге получают романцемент, а если он больше 9 – воздушную известь.

Гидравлическая известь после предварительного твердения на воздухе твердеет в воде и в воздушно-влажной среде. Она может использоваться для приготовления кладочных и штукатурных растворов, эксплуатирующихся во влажных условиях.

Гидравлические свойства вяжущего обеспечиваются минералами, которые образуются при обжиге карбоната кальция с глинистыми примесями – белитом, однокальциевым алюминатом, геленитом и др. При снижении гидравлического модуля содержание этих минералов возрастает, а содержание несвязанного CaO уменьшается.

Производство гидравлической извести включает те же операции, что и производство воздушной извести.

При обжиге сырья, содержащего более 25 % глинистых примесей, получают романцемент. Его технология состоит из тех же операций, что и технология воздушной и гидравлической извести. В романцементе практически весь CaO связывается в силикаты, алюминаты и ферриты. Романцемент характеризуется высокой водопотребностью,

нормальная плотность его теста находится в пределах 35...50 %, поэтому это вяжущее имеет намного меньшую прочность, чем портландцемент. Наибольшая марка по прочности романцемента – 150, в связи с чем романцемент в строительстве был вытеснен портландцементом.

Контрольные вопросы

1. Из какого сырья можно получить гидравлическую известь?
2. Почему для производства гидравлической извести не используется искусственная сырьевая шихта?
3. Как рассчитать гидравлический модуль извести?
4. Как изменятся потери при прокаливании, если увеличится содержание примесей в сырье для получения гидравлической извести?
5. Как называют известь с гидравлическим модулем, равным 4,5...9?
6. В каких условиях твердеет гидравлическая известь?
7. Перечислите области применения гидравлической извести.
8. Какие минералы содержатся в гидравлической извести?
9. Какое вяжущее можно получить из сырья, содержащего более 25 % глинистой примеси?
10. В чем причина низкой прочности романцемента?

2.2. Портландцемент

Портландцемент – это гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее как на воздухе, так и в воде, получаемое путем совместного тонкого помола портландцементного клинкера, гипса, вводимого в качестве регулятора сроков схватывания, и, в некоторых случаях, минеральных добавок.

Клинкер – важнейший компонент цемента – получают путем обжига до спекания сырьевой смеси, состоящей из карбонатных (75...80 %) и глинистых (25...20 %) пород.

2.2.1. Виды портландцемента

Выпускаемый в нашей стране портландцемент для строительных целей должен соответствовать одному из двух стандартов: ГОСТ 10187–87 или ГОСТ 31108–2003. Первый стандарт разработан на основе отечественного опыта производства и применения цемента, а второй гармонизирован со стандартом Европейского Сообщества EN 197-1.

ГОСТ 10187–87 подразделяет цементы на следующие виды: портландцемент, портландцемент, содержащий не более 20 % активных ми-

неральных добавок, и шлакопортландцемент с добавкой шлака более 20 %.

Портландцемент по прочности разделяют на 4 марки: 400, 500, 550 и 600. Для шлакопортландцемента предусмотрено три марки: 300, 400 и 500. Для быстротвердеющего цемента – 400 и 500. Для быстротвердеющего шлакопортландцемента – 400.

В ГОСТ 31108–2003, который гармонизирован со стандартом Европейского Сообщества EN 197-1, вместо марок введены классы по прочности при сжатии в возрасте 28 суток: 22,5; 32,5; 42,5; 52,5. Значения классов прочности имеют вероятностный характер и установлены с доверительной вероятностью 95 %.

В ГОСТ 31108–2003 помимо требований к прочности в возрасте 28 сут для всех цементов, кроме 22,5Н и 32,5Н, дополнительно нормируются требования к прочности в возрасте двух суток, а для цементов классов 22,5Н и 32,5Н нормируется прочность в возрасте 7 сут. Для цементов классов 32,5 и выше в зависимости от прочности в возрасте 2 суток предусмотрено деление на два подкласса: Н (нормально твердеющий) и Б (быстротвердеющий).

По вещественному составу в новом стандарте цементы подразделяются на пять типов:

- ЦЕМ I – портландцемент, содержащий от 95 до 100 % клинкера;
- ЦЕМ II – портландцемент с минеральными добавками, который может содержать от 6 до 20 % доменного или электротермофосфорного шлака, пуццолановой добавки, золы-уноса, известняка, глиежа, а также от 6 до 10 % микрокремнезема;
- ЦЕМ III – шлакопортландцемент, содержащий от 35 до 64 % клинкера и от 36 до 65 % доменного или электротермофосфорного гранулированного шлака;
- ЦЕМ IV – пуццолановый цемент, содержащий от 65 до 79 % клинкера и от 21 до 35 % пуццолановой добавки;
- ЦЕМ V – композиционный цемент – цемент, в состав которого входит от 40 до 78 % клинкера, от 11 до 30 % шлака и пуццолановой добавки.

Кроме основных компонентов в состав цемента входит до 5 % вспомогательных материалов – добавки, регулирующие сроки схватывания, обычно – гипсового камня.

В зависимости от содержания добавок в этом стандарте предусмотрено 5 типов цемента (табл. 2.1).

Т а б л и ц а 2 . 1

Физико-механические свойства портландцементов
различных классов

Класс проч-ности це-мента	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте				Начало схваты-вания, мин, не ранее
	2 сут, не менее	7 сут, не менее	28 сут		
			не менее	не более	
22,5Н	–	11	22,5	42,5	75
32,5Н	–	16	32,5	52,5	
32,5Б	10	–			
42,5Н	10	–	42,5	62,5	60
42,5Б	20	–			
52,5Н	20	–	52,5		45
52,5Б	30	–			

2.2.2. Сырье для производства цементного клинкера

Сырье для получения портландцемента содержит в необходимых соотношениях четыре главных оксида – CaO , SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Для обеспечения этих соотношений необходимо совместное использование карбонатного и алюмосиликатного сырья. Если в состав алюмосиликатного сырья не входят в оптимальном соотношении оксиды SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 , то для приготовления сырьевой шихты используют кремнеземистые, глиноземистые и железистые корректирующие добавки – побочные продукты промышленности (колошниковая пыль, пиритные или колчеданные огарки) или горные породы (опока, диатомит, боксит, каолин).

В технологии портландцемента в качестве карбонатного и алюмосиликатного сырья возможно использование отходов некоторых отраслей промышленности. К числу таких отходов относятся шлаки, золы, бокситовый (нефелиновый) шлам и др. Однако основным сырьем для производства цемента на сегодняшний день являются природные материалы – карбонатные горные породы и глины.

В качестве карбонатного сырья в технологии портландцемента используются известняк или мел, а также мергель – природная тонкозернистая смесь карбонатных и глинистых минералов. Известняк и мел содержат более 90 %, а мергель – 50...75 % карбоната кальция CaCO_3 . В состав этих горных пород обычно входят примеси – глинистые минералы, кварц и др. Достаточное содержание в сырьевой шихте карбоната кальция – около 3/4 от общей массы сырья – обеспечива-

ет высокую долю оксида кальция в портландцементном клинкере – 63...66 %.

В качестве второго компонента сырья, содержащего оксиды кремния, алюминия и железа, обычно используется глина.

Содержание в сырьевой шихте MgO более 3 % и серного ангидрида более 1 % нежелательно, так как в цементах с повышенным содержанием этих оксидов могут происходить неравномерное увеличение объема и сброс прочности.

При расчете состава сырьевой шихты учитывают не валовое содержание главных оксидов клинкера, а их соотношение, которое выражается в виде модулей:

– гидравлического (основного) $m = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$;

– силикатного (кремнеземистого) $n = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$;

– алюминатного (глиноземистого) $p = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_3$,

где CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ – содержание оксидов в сырьевой шихте, %.

Для расчетов удобнее использовать не гидравлический модуль m , а коэффициент насыщения клинкера известью:

$$\text{KH} = \frac{\text{CaO} - 1,65\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0,7\text{SO}_2}{2,8\text{SO}_2}.$$

Значения модулей и коэффициента насыщения обычно находятся в следующих интервалах: $n = 1,7...3,5$, $p = 1...3$, $\text{KH} = 0,88...0,92$. В зависимости от значений этих характеристик сырьевой шихты получают клинкеры с различающимися соотношениями минералов, что позволяет получать различные виды цементов – сульфатостойкий, быстротвердеющий и др.

Основным сырьем для производства извести является известняк или мел. В связи с тем что при обжиге известняка 40 % вещества теряется в виде углекислого газа, строить цементные заводы экономически целесообразно только вблизи крупных месторождений карбонатных пород.

Доля глины в сырьевой шихте значительно меньше, чем доля карбонатных пород – приблизительно 1/4 часть.

Химический состав клинкера колеблется в сравнительно широких пределах. Главные оксиды цементного клинкера – оксид кальция CaO, диоксид кремния SiO₂, оксиды алюминия Al₂O₃, железа Fe₂O₃, суммарное содержание которых 95...97 %. Кроме них в состав клинкера в виде различных соединений в небольших количествах могут входить оксид магния MgO, серный ангидрид SO₃, диоксид титана TiO₂, окси-

ды хрома Cr_2O_3 , марганца MnO , щелочи Na_2O и K_2O , фосфорный ангидрид P_2O_5 и др.

Повышенное содержание оксида кальция (при условии обязательного связывания в химические соединения с кислотными оксидами) обуславливает обычно повышенную скорость твердения портландцемента, его высокую конечную прочность, но несколько пониженную водостойкость. Цементы с повышенным содержанием кремнезема в составе клинкерной части характеризуются пониженной скоростью твердения в начальные сроки при достаточно интенсивном нарастании прочности в длительные сроки. Они отличаются повышенной водо- и сульфатостойкостью.

При повышенном содержании Al_2O_3 , а следовательно, и алюминатов цементы приобретают способность к ускоренному твердению в начальные сроки. Увеличение количества глинозема придает цементам меньшую водо-, сульфато- и морозостойкость.

Соединения оксида железа способствуют снижению температуры спекания клинкера. Цементы, богатые Fe_2O_3 , при низком содержании глинозема ведут себя аналогично высококремнеземистым. Относительно медленно схватываясь и твердея в начальные сроки, они в дальнейшем достигают высокой прочности. Цементы с повышенным количеством оксида железа отличаются высокой стойкостью к действию сульфатных вод.

Повышенное содержание в клинкере MgO вызывает неравномерность изменения объема цемента при твердении; поэтому содержание MgO в клинкере не должно превышать 5 %.

Ангидрид серной кислоты SO_3 в виде гипса необходим для регулирования сроков схватывания портландцемента, его содержание ограничивается пределами 1,5...3,5 %. Более высокое содержание SO_3 может вызвать неравномерное изменение объема цемента вследствие образования гидротрисульфатоалюмината кальция.

Щелочи $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ обычно присутствуют в клинкерах в количестве до 0,5...1 %, причем содержание K_2O , как правило, в несколько раз больше, чем Na_2O . Если щелочей более 1 %, то они вызывают непостоянство сроков схватывания цемента и образование выцветов на поверхности растворов или бетонов. Щелочные соединения могут явиться также причиной опасных деформаций в гидротехнических бетонах на заполнителях, содержащих кремнистые сланцы, опаловидные и другие аморфные видоизменения кремнезема. Для изготовления таких бетонов рекомендуется применять цементы, содержащие не более 0,6 % щелочей (в пересчете на оксид натрия). В клинкерах заводского изго-

товления при химическом анализе может обнаружиться так называемый нерастворимый в соляной кислоте остаток, который состоит обычно из кварцевых частичек, не вступивших в реакцию с CaO во время обжига.

Для производства некоторых разновидностей портландцемента применяют активные минеральные добавки – природные или техногенные силикатные или алюмосиликатные материалы. С использованием осадочных или вулканических горных пород изготавливаются пуццолановые цементы, а при введении в состав цемента доменного гранулированного шлака получают шлакопортландцементы.

Пуццолановые добавки по происхождению делятся на вулканические и осадочные. К вулканическим породам, используемым в качестве пуццолановых добавок, относятся туфы, вулканические пеплы, пемзы, трасы. Осадочные горные породы – опоки, трепелы, диатомиты, сложенные преимущественно опалом и кристобалитом – широко применяются для производства пуццолановых цементов.

Пуццолановые добавки использовались с древних времен в качестве компонента, повышающего водостойкость воздушной извести. Активный кремнезем, основное действующее вещество этих добавок, способен связывать Ca(OH)₂ в цементном камне в труднорастворимые соединения, повышая его водостойкость и стойкость к химической коррозии.

Предварительно активность минеральных добавок может быть оценена по количеству поглощенной извести из известкового раствора. Этот показатель в зависимости от активности материала может находиться в интервале от 50 до 400 мг CaO на 1 г добавки. При меньшем поглощении извести добавка считается инертной. Оценка эффективности добавок и назначение их дозировки производятся по результатам испытания в цементе. Для производства пуццоланового портландцемента в основном используются опоки, так как они более активны и в меньшей степени загущают цементное тесто.

Кремнистые осадочные породы широко распространены на территории России. Месторождения вулканических горных пород в России сосредоточены в основном на Кавказе.

Доменные шлаки имеют сходный с портландцементом химический состав, но в них меньше содержится CaO и больше SiO₂ (рис. 2.1). Минеральный состав шлаков зависит не только от валового содержания оксидов. На образование минералов значительное влияние оказывает скорость охлаждения шлака. При медленном охлаждении образуются так называемые отвалы шлаки, а при быстром – гранулированные.

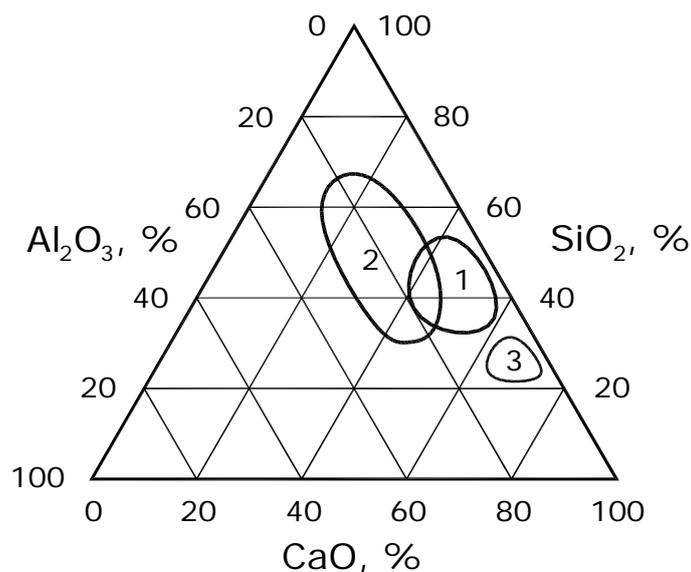


Рис. 2.1. Химический состав шлака (1) золы-уноса (2) и портландцемента (3) на диаграмме $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$

Степень гидравлической активности шлаков характеризуется модулем основности M_0 и коэффициентом качества K :

$$M_0 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}; \quad K = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2},$$

где CaO , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 – содержание в шлаке оксидов, %.

В доменных медленноохлаждаемых закристаллизованных шлаках, как правило, CaO полностью связан с кремнеземом и глиноземом в соединениях меньшей основности, по сравнению с цементным клинкером, с образованием преимущественно двухкальциевого силиката $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, ранкинита $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$, псевдоволластонита $\alpha\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и мелилита (твердые растворы геленита $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ и окерманита $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$). Если оксида кальция больше 44...46 %, то закристаллизованные шлаки приобретают склонность к силикатному распаду: куски и зерна шлака со временем самопроизвольно превращаются в порошок. Это явление обусловлено полиморфным превращением моноклинического двухкальциевого силиката $\beta 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ в ромбический $\gamma 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, происходящим при температуре ниже 525°C и сопровождающимся уменьшением плотности.

Оксид магния в шлаках связывается преимущественно в устойчивые соединения (окерманит и др.) и поэтому не может вызывать неравномерных объемных изменений, что происходит иногда при твердении портландцемента из природного магнезиального сырья, содержащего, как правило, после обжига MgO в виде периклаза.

Оксид магния при обычном содержании его в шлаке (до 8...10 %) является в известной мере заменителем CaO и благоприятно влияет на

гидравлическую активность шлаков. Ряд исследований свидетельствует о возможности использования доменных шлаков, содержащих до 15...20 % MgO, в производстве шлакопортландцемента, но с увеличением его содержания активность вяжущих снижается. Есть данные и о том, что с увеличением содержания MgO в шлаке уменьшается стойкость шлакопортландцементов по отношению к действию растворов MgSO₄; Al₂O₃ в шлаках связывается в соединения, обуславливающие их повышенную гидравлическую активность, особенно при одновременном значительном содержании CaO.

Кремнезема в шлаках всегда больше, чем в портландцементном клинкере. Шлаки с большим содержанием SiO₂ при охлаждении почти не кристаллизуются и застывают в виде стекла.

Расплавы кислых шлаков даже при медленном охлаждении из-за быстрого возрастания их вязкости кристаллизуются в незначительной мере и после отверждения представляют собой вещество со стекловидной структурой. При быстром охлаждении водой, водяным паром или воздухом расплавы основных шлаков кристаллизуются не полностью и имеют смешанную структуру.

В закристаллизованных доменных шлаках, содержащих до 4...6 % MgO и до 5...10 % Al₂O₃, обнаруживают обычно двухкальциевый силикат (β C₂S, γ C₂S), ранкинит и мелилит с преобладающим содержанием гелентовой составляющей.

Главными фазами в шлаках, содержащих 6...8 % MgO и 15...20 % Al₂O₃ (шлаки уральских металлургических заводов), являются преимущественно мелилит с преобладанием окерманитовой составляющей, а также ларнит C₂S и анортит CaO·Al₂O₃·SiO₂. Кроме того, в шлаках встречаются псевдоволластонит α CaO·SiO₂, мервинит 3CaO·MgO·2SiO₂, монтичеллит CaO·MgO·SiO₂, CaS, MnS.

В основных шлаках преобладают более основные соединения – 2CaO·SiO, 2CaO·Al₂O₃·SiO₂ и др., а в кислых – менее основные, например псевдоволластонит α CaO·SiO₂, анортит и др.

В шлаках, богатых MgO, присутствуют также форстерит 2MgO·SiO₂ и магнезиальная шпинель MgO·Al₂O₃.

В высокоглиноземистых шлаках специальных сортов чугунов содержатся алюминаты 5CaO·3Al₂O₃ или 12CaO·7Al₂O₃, CaO·Al₂O₃ и CaO·2Al₂O₃.

По современным представлениям, стекло, в том числе и шлаковое, не является аморфным, полностью изотропным веществом, как полагали раньше, представляя его в виде затвердевшей бесструктурной жидкости. В действительности, как показывают исследования, стекло характеризуется микронеоднородностью.

В соответствии с ионной теорией, жидкий шлак – это микронеоднородный расплав, состоящий из простых катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Mn^{2+} и других катионов-модификаторов), анионов кислорода и серы, а также устойчивых комплексных анионов. Последние возникают при взаимодействии атомов кремния, алюминия, фосфора и других, так называемых стеклообразующих катионов с атомами кислорода, которые связываются с первыми ковалентными связями.

Комплексные анионы вида $(\text{SiO}_4)^{4-}$, $(\text{AlO}_4)^{3-}$ и т.д. представляют собой тетраэдр, в углах которого находятся центры атомов кислорода. В центре же тетраэдра между четырьмя атомами кислорода располагается атом кремния или алюминия. Своими свободными кислородными связями комплексные анионы могут взаимодействовать как друг с другом, так и с катионами-модификаторами. Например, тетраэдры $(\text{SiO}_4)^{4-}$ могут образовывать политетраэдрические цепи типа $[(\text{SiO}_3)^{2-}]_n$, $[(\text{Si}^2\text{O}^5)^{2-}]_2$ и т.п. В них кремнекислородные тетраэдры могут замещаться тетраэдрами $(\text{AlO}_4)^{5+}$ и др. Катионы-модификаторы и комплексные силикатные анионы с общей формулой $(\text{Si}_x\text{O}_w)^{z-}$ образуют группировки, встречающиеся в расплавах. Эти сложные образования по своему строению приближаются к соответствующим кристаллическим веществам, например к Ca_2SiO_4 , CaSiO_3 и др.

Наибольшей активностью характеризуются группы, состоящие из простейших анионов $(\text{SiO}_4)^{4-}$, $(\text{AlO}_4)^{6-}$, разобщенных катионами кальция, как в структуре ортосиликата. Образованию ортосиликатной структуры способствует присутствие в расплаве магния. Наличие марганца, снижающего активность групп, нарушает эту структуру.

С повышением температуры расплава происходит разрыв связей, группировки ионов становятся более мелкими, менее упорядоченными по строению и вместе с тем более реакционноспособными вследствие термодинамической неустойчивости. Подобные микронеоднородные ионные группы в шлаковых расплавах при быстром охлаждении могут быть в той или иной степени зафиксированы в шлаковом стекле (гранулированные шлаки), а при достаточно медленном охлаждении из этих групп могут путем некоторой перегруппировки и агрегации образоваться кристаллические фазы затвердевшего шлака.

Шлаковые стекла, как и всякое стекло, не имеют определенной температуры плавления; при нагревании они постепенно размягчаются и переходят в жидкое состояние. Находясь в термодинамически неустойчивом состоянии, они проявляют способность кристаллизоваться. Однако кристаллизация тормозится высокой вязкостью при обычных температурах и малой подвижностью крупных анионных радикалов; поэтому при обычной температуре шлаковые стекла сохраняются в

термодинамически неустойчивом состоянии неопределенно долгое время.

2.2.3. Общие сведения о портландцементе

Минералы портландцементного клинкера. При обжиге сырьевой шихты происходит синтез минералов портландцементного клинкера. Минералогический состав клинкера представлен четырьмя основными фазами:

- алит (трехкальциевый силикат), химический состав которого можно описать формулой $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, в сокращенной форме – C_3S ;
- белит (β -двухкальциевый силикат) – $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ или C_2S ;
- алюмоферритная фаза – $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ или C_4AF ;
- алюминатная фаза – $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ или C_2A .

Алит – наиболее важный минерал. Его содержание в портландцементном клинкере – 55...65 %. Алит определяет высокие прочность и темпы твердения. В клинкере он содержится обычно в количестве 45...60 %. Алит рассматривают как твердый раствор трехкальциевого силиката и небольшого количества MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , Cr_2O_3 и др. Хотя содержание этих примесей в трехкальциевом силикате и небольшое (2...4 %), они определенным образом влияют на его структуру и свойства. Таким образом, следует различать трехкальциевый силикат, получаемый в лабораторных условиях из химически чистых компонентов, и алит, образующийся в цементном клинкере.

Белит – второй основной силикатный минерал портландцементного клинкера – отличается медленным твердением, но обеспечивает достижение высокой прочности при длительном твердении портландцемента.

Промежуточное вещество, расположенное между кристаллами алита и белита, включает алюмоферритную и алюминатную фазы, а также второстепенные минералы в кристаллическом виде и стекловидную фазу. Все эти фазы при высоких температурах обжига находятся в расплавленном состоянии.

Алюмоферритная фаза промежуточного вещества клинкера (называемая иногда целитом) представляет собой твердый раствор алюмоферритов кальция разного состава, зависящего, в свою очередь, от состава сырьевых смесей, условий обжига и т.п. При этом возможно образование серии твердых растворов между $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$, C_4AF , CAF_2 и C_2F . В клинкерах обычных портландцементов алюмоферритная фаза по своему составу близка к четырехкальциевому алюмоферриту. Поэтому

C_4AF при расчетах минералогического состава цементного клинкера по химическому составу с известной условностью считают индивидуальным минералом. Истинная плотность C_4AF равна $3,77 \text{ г/см}^3$. В этой фазе часто содержится около 1 % MgO и TiO_2 .

Алюминаты кальция могут встречаться в промежуточном веществе клинкера в виде двух соединений: трехкальциевого алюмината C_3A и пятикальциевого трехалюмината CA_3 , который, по уточненным данным, имеет состав $12CaO \cdot 7Al_2O_3$. Однако в обычных клинкерах с высоким содержанием оксида кальция в сырьевой смеси C_5A_3 обычно отсутствует. C_3A кристаллизуется в кубической системе в виде очень мелких шестиугольников и прямоугольников. Истинная плотность C_3A – $3,04 \text{ г/см}^3$.

Клинкерное стекло обычно присутствует в промежуточном веществе в количестве 5...15 %. Такие значительные пределы колебаний определяются условиями охлаждения клинкера после выхода его из зоны спекания в печи. Стекло состоит преимущественно из CaO , Al_2O_3 и Fe_2O_3 . В нем содержатся MgO и щелочи.

Технология портландцемента включает в себя три группы процессов:

- 1) приготовление сырьевой шихты;
- 2) получение клинкера при обжиге;
- 3) помол клинкера совместно с гипсом, а для некоторых видов цемента – со шлаком или активными минеральными добавками.

Приготовление сырьевой шихты может производиться двумя способами: мокрым и сухим. При мокром способе известняк измельчают в шаровой мельнице в водной среде и в итоге получают шлам, а глину распускают в глиноболтушках. Полученные шламы (суспензии известняка и глины) перемешивают в шламбассейнах. Мокрый способ позволяет получить качественную сырьевую шихту с меньшими затратами. Однако при обжиге такой шихты по сравнению с шихтой, приготовленной по сухому способу, затраты топлива значительно выше. В связи с этим на проектируемых и строящихся в настоящее время заводах предусмотрена только сухая технология приготовления сырьевой шихты, когда ее компоненты предварительно высушиваются и затем измельчаются в порошок в сухом виде. Компоненты шихты в заданных пропорциях перемешиваются в гомогенизаторах с помощью сжатого воздуха. Перед обжигом сырьевая мука гранулируется.

Обжиг шихты, полученной по мокрому способу, ведется в длинных вращающихся печах (170...230 м). Большая длина печи связана с высо-

кими затратами тепловой энергии на нагрев и испарение влаги в сырьевом шламе.

Обжиг при сухом способе введется в коротких печах. Для повышения эффективности обжига в этих печах используются запечные циклонные теплообменники или конвейерные кальцинаторы.

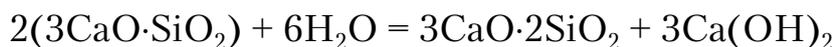
При обжиге происходят следующие процессы:

- испарение физически связанной влаги;
- обезвоживание глинистых минералов;
- декарбонизация;
- синтез алюминатных минералов и двухкальциевого силиката;
- синтез трехкальциевого силиката;
- охлаждение клинкера.

Из вращающейся печи клинкер поступает в холодильник, в котором его температура снижается до 30...50 °С. После этого клинкер измельчается в шаровых мельницах совместно с небольшим количеством гипсового камня, который вводится в цемент для регулирования сроков схватывания. При введении соответствующих минеральных добавок получают различные разновидности цемента: пуццолановый портландцемент, шлакопортландцемент и др.

Гидратация и твердение портландцемента. Твердение смеси вяжущего вещества с водой и достигаемая при этом прочность в начальный и последующие периоды времени зависят от многих факторов – свойств исходных материалов, содержания их в смеси, добавок и температурно-влажностных условий.

Гидратацию алита, основного минерала цементного клинкера, можно описать следующей формулой:



Алит после растворения в воде затвердения разлагается на $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и гель кремнекислоты. При этом концентрация CaO в растворе достигает 500...1500 мг/л, что во много раз превосходит растворимость SiO_2 – не более 15...30 мг/л. Нерастворившийся кремнезем остается на поверхности исходного зерна. На поверхности цементных частичек в начальной стадии образуется гелевая пленка из гидратов (рис. 2.2), состоящая из первичного гидросиликата. В начале взаимодействия цемента с водой алит дает $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и кремнезем в виде свободных радикалов SiO^{-2} . В последующем между $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и этими радикалами, находящимися в твердой фазе, идет реакция с образованием гидросиликатов кальция состава $1,8\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 1,9\text{H}_2\text{O}$. Избыток $\text{Ca}(\text{OH})_2$ от-

лагается в межзерновом пространстве с образованием кристаллов портландита.



Рис. 2.2. Образование гелевидной оболочки вокруг C_3S через 5 минут после начала гидратации¹

При гидратации белита образуются те же продукты, что и при гидратации алита, но количество гидролизной извести, выделившейся в результате этой реакции, значительно меньше.

В результате гидратации силикатных клинкерных минералов образуются главным образом высокоосновные гидросиликаты кальция, имеющие мольное отношение CaO/SiO_2 более 1,5.

После гидролиза и растворения первичных гидратов и диффузии растворенных веществ в пространство между зернами цемента возникает вторичный, «внутренний» гидрат C–S–H (I), по Х. Тейлору, в виде тончайших лепестков (рис. 2.3). В пространстве же между зернами создаются условия для взаимодействия с ионами Ca^{2+} , OH^- и кремнекислотой с образованием третичных гидросиликатов кальция состава $(1,5...2)CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$. Последние выделяются в виде волокон и игл (рис. 2.4) и отличаются более высокой степенью кристаллизации по

¹ Здесь и далее приведены снимки микроструктуры гидратов цементных минералов, представленные в статьях [2 и 3] из списка дополнительной литературы и на сайте строительного университета города Ваймара (ФРГ).

сравнению с С–S–Н (I). Аналогично гидратируется β -двухкальциевый силикат.

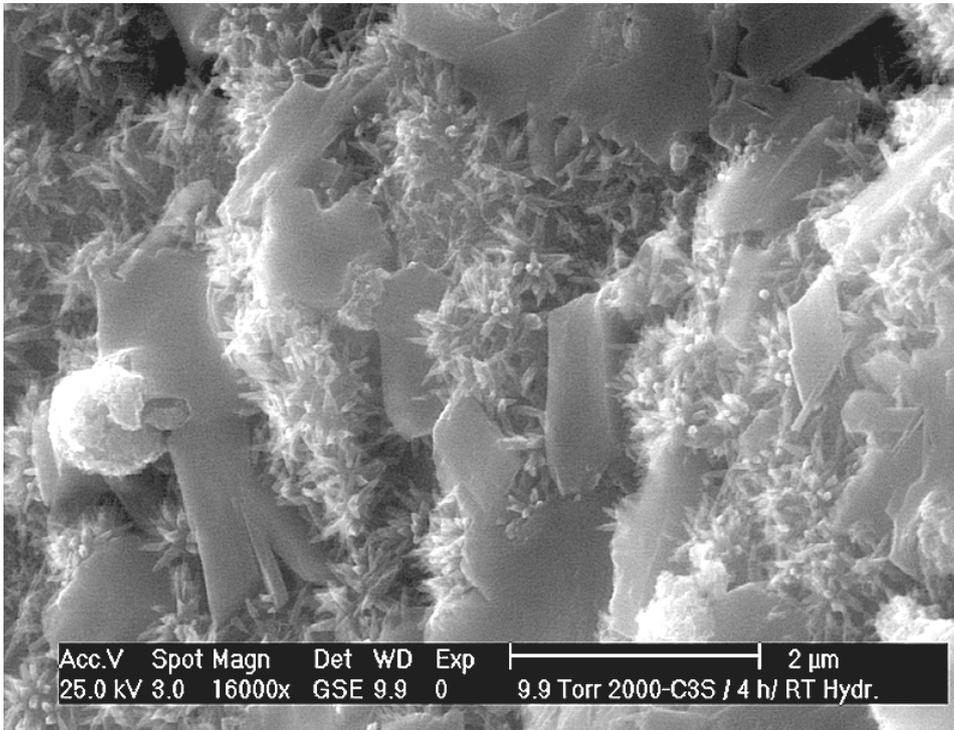


Рис. 2.3. C_3S через 4 часа гидратации:
С–S–Н и портландит

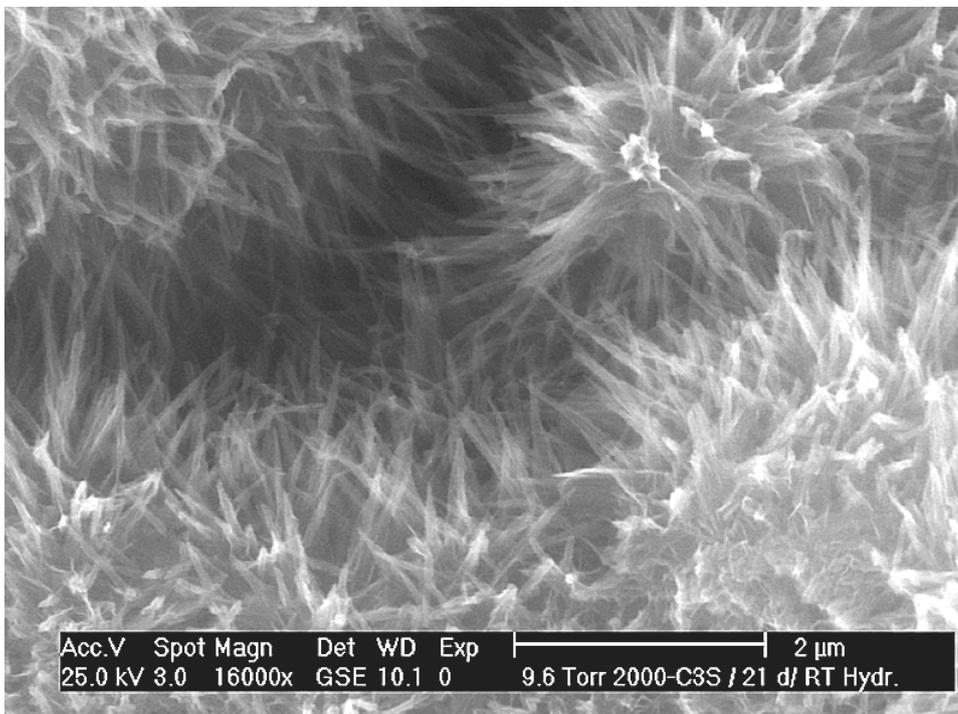


Рис. 2.4. Игольчатые фазы С–S–Н – продукты гидратации C_3S
через 21 сутки

Содержание в клинкере C_3A обычно находится в пределах 6...10 %, однако гидратация этого минерала на ранних стадиях оказывает наибольшее влияние на процессы загустевания и схватывания цементного теста. Это обусловлено тем, что гидратация трехкальциевого алюмината протекает быстрее, чем гидратация других минералов, по схеме



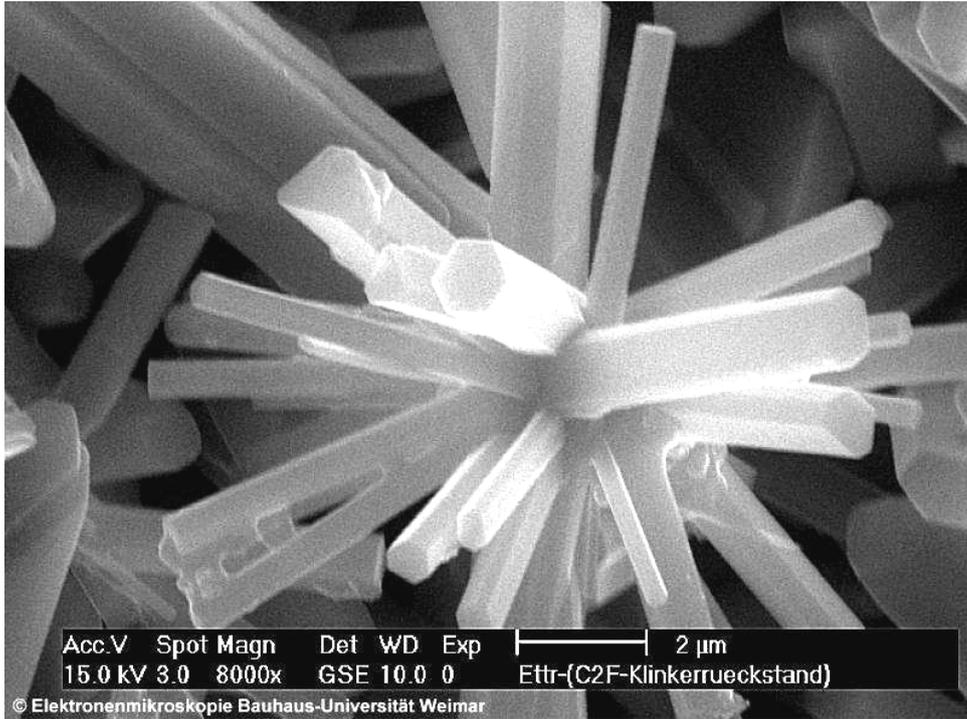
Если не ввести в цемент вещество, регулирующее сроки схватывания, уже через несколько минут после затворения водой цементное тесто слишком быстро потеряет пластические свойства. Для замедления схватывания в цемент вводится сульфат кальция в виде гипсового камня. Взаимодействие трехкальциевого алюмината и сульфата кальция с водой приводит к синтезу кристаллов этtringита $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ (рис. 2.5, а), которые образуют на поверхности трехкальциевого алюмината плотный слой гидрата, затрудняющий дальнейшую гидратацию C_3A (рис. 2.5, б), а также замедляющий потерю подвижности и схватывание цементного теста.

Четырехкальциевый алюмоферрит C_4AF также характеризуется высокой скоростью гидратации. Он обеспечивает высокие темпы твердения цемента в начальный период твердения.

При исследовании процесса твердения цемента основное внимание долгие годы уделялось химическим и физико-химическим процессам, протекающим при его гидратации. Современные методы исследования, в частности сканирующая электронная микроскопия, позволили установить, что структура новообразований (рис. 2.6) оказывает определяющее влияние на прочностные и другие свойства вяжущих. Игольчатые и волокнистые кристаллы гидратов, образующиеся на поверхности зерен цемента, соединяют между собой отдельные частицы и обеспечивают высокую прочность их сцепления (рис. 2.7).

Гидратные новообразования характеризуются высокой дисперсностью. Их удельная поверхность может достигать $2 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5$ м²/кг, т.е. увеличиваться в сравнении с удельной поверхностью исходного цемента в 1000 раз. Продукты гидратации цемента имеют форму лепестков, волокон или иголок, в зависимости от состава новообразований и условий их возникновения. Из-за высокой удельной поверхности продуктов гидратации значительная доля слагающих их атомов и ионов находится на поверхности, и, следовательно, они характеризуются наличием свободной энергии, обуславливающей связь частичек новообразований и твердение всей системы.

a



б

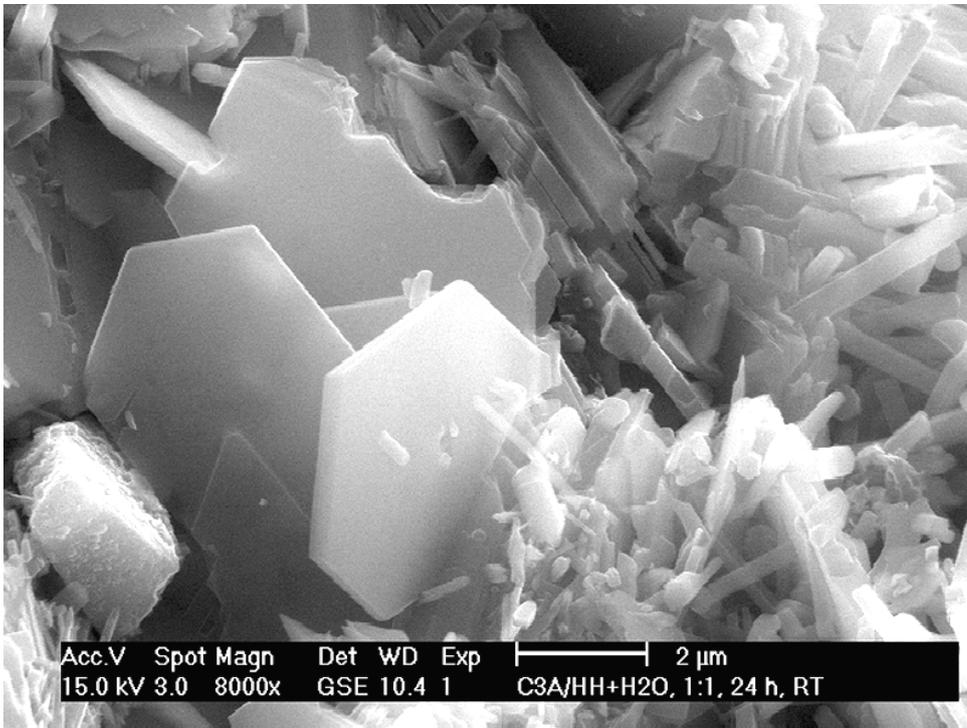


Рис. 2.5. Сросток кристаллов этtringита (а) и продукты гидратации смеси C₃A и полуhydrата после 24 часов гидратации (б)

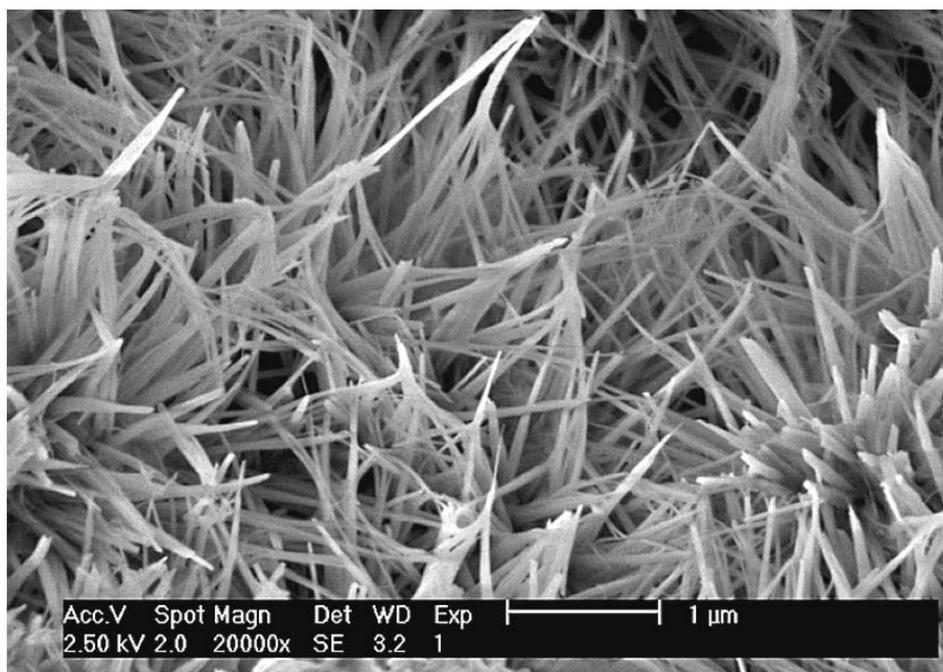


Рис. 2.6. Микроструктура продуктов гидратации C_3S через 600 суток

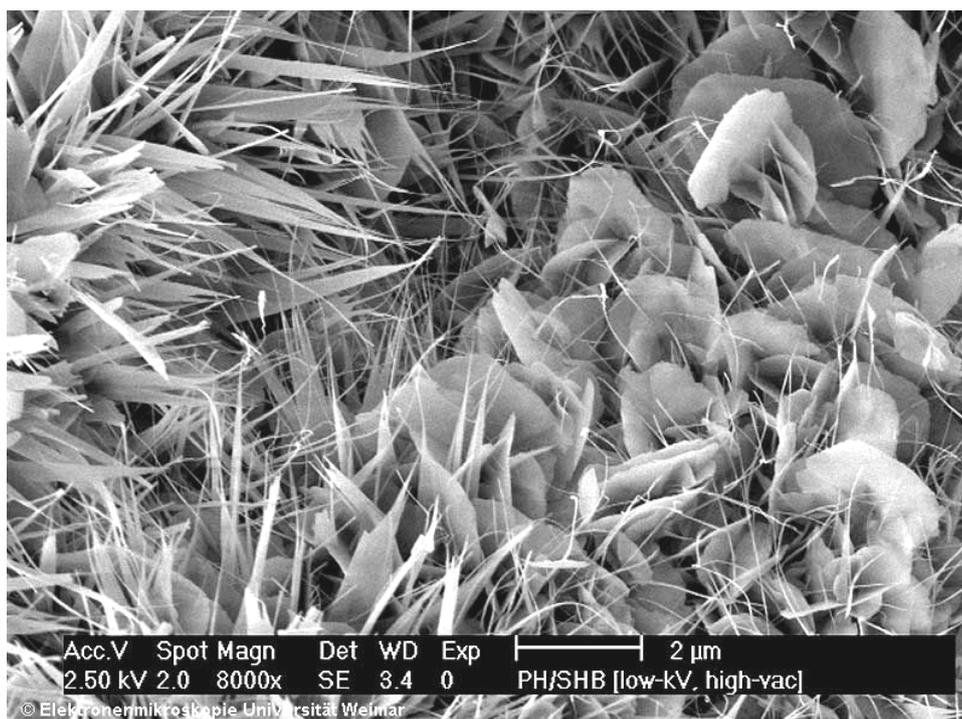


Рис. 2.7. Гидраты силиката кальция (тоберморита)

2.2.4. Мокрый способ производства цементного клинкера

Перспективным по технико-экономическим показателям способом производства цементного клинкера является сухой. В настоящее время строятся цементные заводы только по сухому способу. Однако боль-

шинство предприятий, построенных в России в прошлом веке, работает по мокрой технологии, которая характеризуется высокой энергоемкостью, но позволяет получить цемент более стабильного качества.

Добыча и транспортировка сырья

Цементный завод производительностью 1 млн т/год потребляет примерно 1,7 млн т сырья. Поэтому цементные заводы строятся, как правило, вблизи сырьевых карьеров. Добыча сырья в карьерах ведется открытым способом прямой экскавацией одноковшовыми или многоковшовыми (роторными) экскаваторами, которые выполняют сразу две операции: отделение породы от пласта и ее погрузку. Доставка сырья из карьера производится железнодорожным или автомобильным транспортом, воздушно-канатными дорогами, ленточными конвейерами. В случае добычи мягкого сырья мокрым способом с помощью гидромониторов транспортировка образующегося шлама осуществляется по трубопроводам. Автомобильный транспорт целесообразно применять на сложном рельефе и дальности перевозок до 6 км. К недостаткам этого вида транспорта следует отнести высокую стоимость эксплуатации машин, зависимость от климатических условий и состояния дорог.

Железнодорожный транспорт является самым высокопроизводительным и надежным в любых условиях, однако ему присущи большие капитальные затраты на устройство пути и эксплуатационные расходы на его содержание и ремонт.

В настоящее время 95 % объема перевозок на цементных заводах приходится на железнодорожный и автомобильный транспорт, причем доли каждого примерно равны. Остальные виды транспорта – воздушно-канатный, гидравлический и конвейерный – составляют лишь около 5 %.

Технология приготовления сырьевого шлама

При использовании в качестве сырья мела и глины данная технология состоит из следующих стадий:

- приготовление грубомолотого шлама;
- домол грубомолотого шлама;
- корректировка, гомогенизация и хранение шлама.

Технологический процесс приготовления грубомолотого шлама заключается в дозировании и предварительном измельчении сырьевых материалов в мельнице самоизмельчения типа «Гидрофол»

ММС-70-23С (рис. 2.8). Мельница состоит из следующих элементов: барабана диаметром 7 м и длиной 2,3 м, футерованного бронеплитами (а), загрузочной (б) и разгрузочной (в) цапф, передней (г) и задней (д) торцовых крышек и привода мощностью 1600 кВт. Частота вращения составляет 13 об/мин. Разгрузочная цапфа загружена стальными стержнями $\varnothing 90 \times 3000$ мм массой 15 т. Производительность мельницы 420 т/ч.

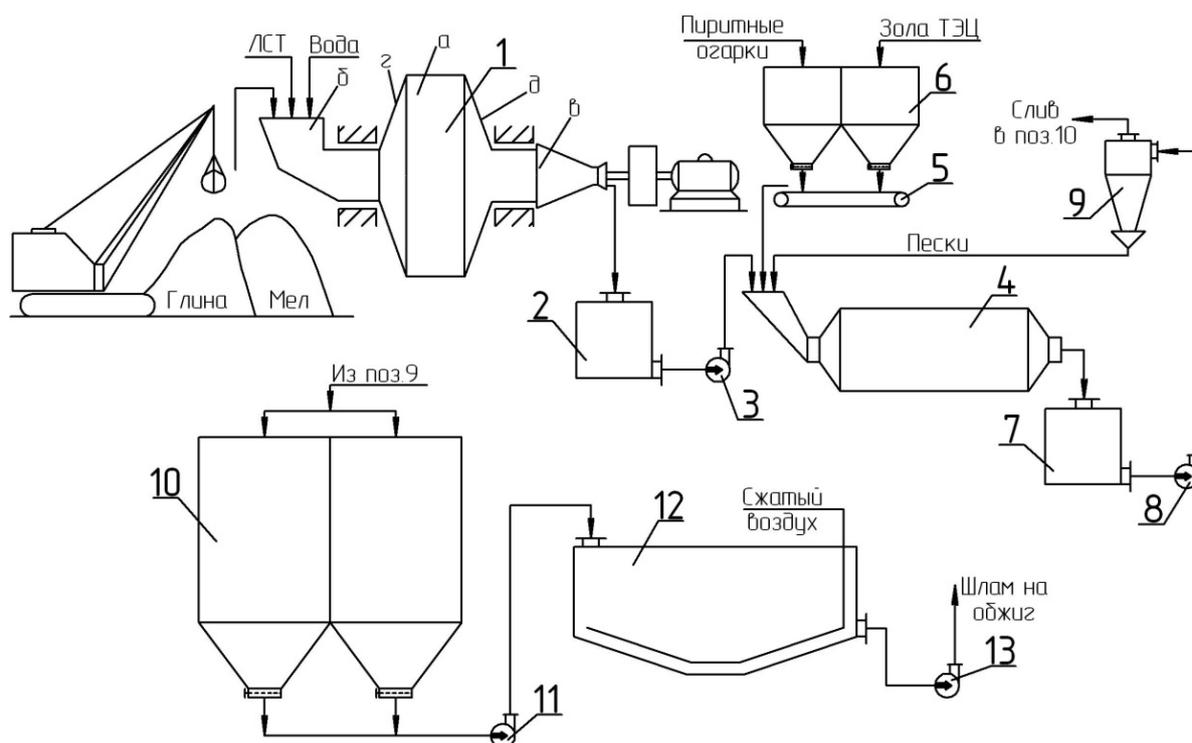


Рис. 2.8. Технологическая схема сырьевого цеха мокрого способа производства цементного клинкера (спецификация по тексту)

Раньше для этих целей использовали глиноболтушки – железобетонные аппараты емкостного типа диаметром 5...12 м и глубиной 2...6 м с крановой мешалкой для перемешивания шлама, однако из-за большого удельного расхода электроэнергии (10...12 кВт·ч/т) и больших трудозатрат они выводятся из эксплуатации. Подача мела и глины в примерном соотношении 3:1 осуществляется экскаватором через загрузные бетонные бункера. Крупность кусков мела не должна превышать 800 мм для глубины 400 мм. В мельницу подается вода из расчета получения шлама влажностью не более 39 %. Сырьевые материалы в мельнице измельчаются и одновременно размучиваются в результате удара, раздавливания и трения.

Из мельницы 1 шлам через выходную решетку со щелями тангенциальной формы размером 20 мм поступает в загруженную стальными

стержнями разгрузочную цапфу, выполняющую, по существу, функцию стрежневой мельницы.

В шлам с целью снижения его влажности добавляют разжижитель – лигносульфонаты технические (ЛСТ) в количестве примерно 0,15 %. Снижение влажности шлама на 1 % увеличивает производительность вращающейся печи на 1,5 % и одновременно сокращает расход топлива на 1...1,5 %. Как правило, влажность мелоглинистого шлама за счет введения в него ПАВ можно снизить на 3...4 %.

Грубомолотый шлам из мельницы 1 поступает в зумпф 2, а далее с помощью центробежного насоса (ГРАТ 350/40) 3 – в сырьевую однокамерную мельницу тонкого помола (МС 3,2×1,5) 4, загруженную мелющими телами-шарами Ø 40×60 мм. Частота вращения 16,94 об/мин, мощность привода 2000 кВт. Производительность одной мельницы 70 т/ч.

Одновременно в мельницы домола 4 подаются корректирующие добавки: пиритные огарки, зола ТЭЦ и др. Дозирование добавок осуществляется ленточными дозаторами 5 непрерывного действия из расходных бункеров 6, расположенных над мельницами домола. Сырьевая мельница может работать как по открытому циклу, когда размалываемый материал проходит через нее однократно, так и по замкнутому, как показано на рис. 2.8. Во втором случае материал не домалывается до необходимой кондиции, а выводится из мельницы и направляется из зумпфа 7 насосом (6ФШ-7А) 8 на сепарацию в гидроциклон 9. В этом аппарате крупная фракция сырьевых материалов, так называемые пески, отделяется от тонкого продукта и направляется на домол в сырьевую мельницу 4. Тонкодисперсный шлам (слив), характеризующийся остатком на сите № 02 не более 3 %, влажностью не более 39 % и растекаемостью в пределах 50...60 см, перекачивается в вертикальные шламбассейны 10.

Замкнутый цикл помола обеспечивает сокращение расхода электроэнергии примерно на 10 % за счет того, что готовая фракция шлама не задерживается в мельнице.

Сырьевой шлам представляет собой полидисперсную и полиминеральную систему, в которой твердая фаза состоит из частиц мела, глины, кварца размером не более 100 мкм. Иными словами, шлам – это полукolloидная система, в которой частицы коллоидно-дисперсной фазы образованы скоплением молекул или ионов растворенного в дисперсионной среде вещества и находятся в равновесии с окружающим раствором.

В структурном отношении шлам представляет собой беспорядочную сетку-каркас, которая образована в результате молекулярного

сцепления коллоидных частиц друг с другом и способна восстанавливаться после разрушения вследствие механического воздействия на нее.

В связи с тем, что в процессе приготовления сырьевого шлама неизбежно наблюдается отклонение фактического его химического состава от заданного из-за погрешностей дозирования и неоднородности сырья, возникает необходимость в его корректировке. Корректировка состава шлама осуществляется по коэффициенту насыщения в вертикальных бассейнах вместимостью 800 м³ каждый. Для этих целей в одном из вертикальных шламбассейнов нарабатывается корректирующий шлам с высоким титром, т.е. содержащий повышенное количество СаСО₃ (меловой шлам), в другом – с низким титром (глиняный шлам). Корректируемый шлам анализируется химически, и рассчитывается необходимое количество корректирующего шлама, которое следует смешать с корректируемым для обеспечения заданной величины КН.

Смешение шламов производится путем добавления расчетного объема корректирующего шлама к корректируемому с последующим их усреднением в том же вертикальном бассейне в течение не менее 45 мин, после чего шлам подвергается химическому анализу. На основании результатов анализа рассчитываются значения КН, *n* и *p*, и при их совпадении с заданными величинами откорректированный шлам перекачивается насосом 11 в один из железобетонных горизонтальных шламбассейнов 12 вместимостью 8000 м³, оборудованных системой пневматического перемешивания, что обеспечивается подачей воздуха под давлением 0,15...0,2 МПа. Расход воздуха составляет примерно 25 м³/мин на 1 м³ шлама.

Из горизонтального шламбассейна 12 шлам влажностью ~38 % центробежным насосом 13 подается в цех обжига.

Обжиг цементного клинкера по мокрому способу

Сырьевой шлам подается в шламовый питатель 1 (рис. 2.9) вращающейся печи. Питание печи осуществляется бесприводным объемным шлампитателем с непрерывным истечением струи. Подача шлама регулируется с помощью щелевых затворов.

Для обжига шлама по мокрому способу наиболее распространенными типоразмерами вращающейся печи являются 4×150, 5×150, 4/4,5×175, 5×185 м. Длина печи зависит от многих факторов, и прежде всего от влажности сырьевого шлама: чем она больше, тем длиннее должна быть вращающаяся печь.

Вращающаяся печь 2 представляет собой сварной стальной барабан с толщиной стенки 20...35 мм, установленный на шести опорах 3 под углом 3,5...4,0° к горизонту. Производительность по клинкеру печи 4×150 м – 34 т/ч, а печи 5×150 – 50 т/ч. Вращение печи осуществляется с помощью привода, состоящего из электродвигателя 4 мощностью 250 кВт, редуктора 5, подвенцовой 6 и венцовой 7 шестерней.

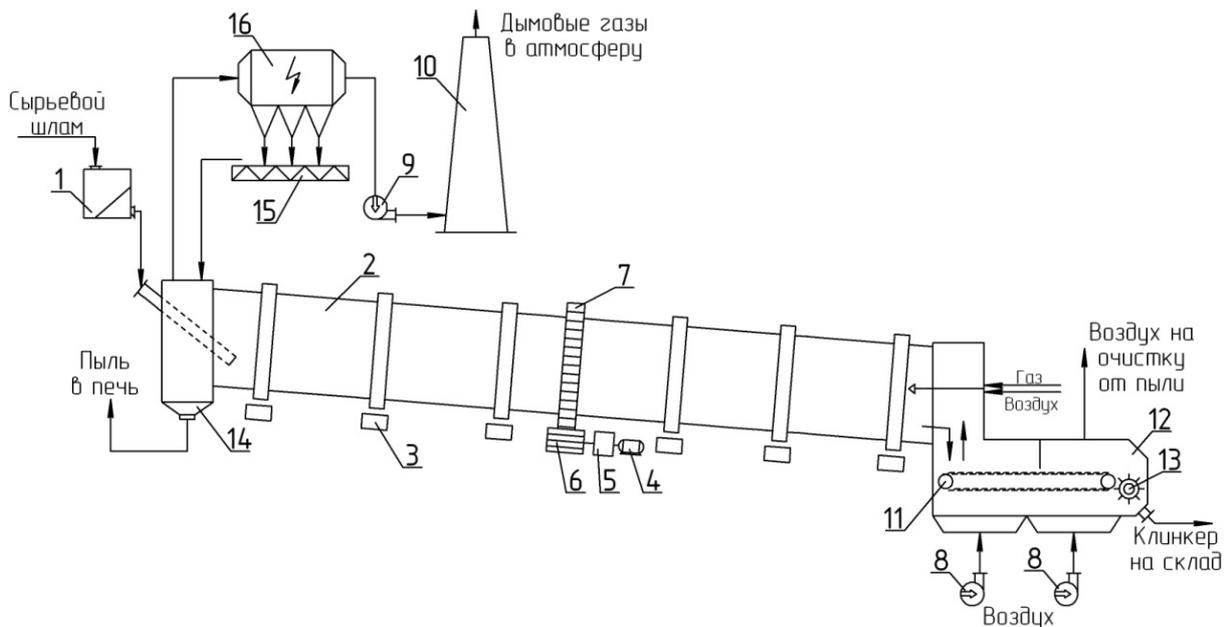


Рис. 2.9. Технологическая схема цеха обжига цементного клинкера

Для предотвращения влияния на корпус вращающейся печи высоких температур, истирающего воздействия продвигающегося при этих температурах материала, агрессивных газов и уменьшения потерь теплоты в окружающую среду предусмотрена защита корпуса огнеупором. Низкотемпературные зоны печи зафутерованы клинкеробетоном, представляющим собой разновидность жаростойкого бетона и состоящим из портландцементного раствора и клинкера в качестве крупного заполнителя. Кроме низкой стоимости, такой огнеупорный материал выгодно отличается от штучного огнеупора по следующим показателям: отсутствие швов – самых уязвимых мест в футеровке, более короткие сроки бетонирования, меньшие трудозатраты. Зона декарбонизации и охлаждения обычно футеруется шамотным кирпичом, а самые высокотемпературные зоны – экзотермических реакций и спекания – периклазохромитовым или хромитопериклазовым кирпичом.

Сырьевой шлам поступает в печь со стороны ее холодного конца, а со стороны выгрузочной части установлено горелочное устройство, че-

рез которое подается для сжигания газообразное топливо и воздух для горения топлива, поступающий из клинкерного холодильника с помощью дутьевых вентиляторов 8. Давление газа на горелочное устройство поддерживается в пределах 120...130 кПа.

Необходимая скорость газового потока в печи, кроме дутьевых вентиляторов холодильника, создается также за счет дымососа 9, установленного между печью 2 и дымовой трубой 10, обеспечивающей разрежение от 8 до 10 кПа. Влияние на скорость газового потока и разрежение в головке печи оказывает и дымосос холодильника, отбирающий из последнего избыток воздуха.

Во вращающейся печи по длине различают 6 зон: испарения, подогрева, декарбонизации, экзотермических реакций, спекания и охлаждения.

Сырьевой шлам, поступивший в первую зону печи, вследствие наклонного ее положения и вращения с числом оборотов на полном ходу 1,52 об/мин постепенно перемещается к выгрузочной части, подвергаясь воздействию высокой температуры отходящих дымовых газов. Для эффективной теплопередачи в этой зоне предусмотрены встроенные теплообменные устройства в виде цепной комбинированной гирляндно-винтовой завесы длиной 30...32 м и шарнирно-винтового шестисекционного теплообменника. Цепная завеса может быть выполнена и со свободно висящими концами и цепными периферийными ковриками. В этом случае длина цепной зоны составляет 24...27 м, а коврика 25...26 м. Схема навешивания цепей и плотность цепной завесы оказывают влияние не только на аэродинамическое сопротивление для дымовых газов, но и на скорость продвижения обжигаемого материала. Цепная завеса в печи в известной мере играет роль пылеулавливающего устройства, уменьшая запыленность отходящих газов.

Шлам, проходя через теплообменные устройства, нагревается до 100 °С. При этом происходят испарение влаги и комкование материала. Длина цепной зоны должна быть такой, чтобы на выходе из нее материал имел влажность в пределах 13...17 %, поскольку в этом случае он будет способен гранулироваться, что очень важно для последующего обжига с точки зрения теплообмена и пылеуноса. В случае короткой цепной зоны материал выйдет из нее с завышенной влажностью, что потребует излишнего расхода теплоты из-за малой поверхности теплообмена.

При слишком большой длине цепной зоны материал будет высушиваться до указанной влажности и гранулироваться преждевременно и поэтому разрушаться цепями. Таким образом, зона испарения вра-

щающейся печи, по существу, работает как барабанная сушилка, которая, как известно, характеризуется низким влагосъемом с печного объема.

По мере дальнейшего продвижения по печи материал поступает в зону подогрева, где он подогревается до 850...900 °С. В этой зоне происходят удаление остатков механической влаги и закатывание материала в гранулы. Кроме этих чисто физических процессов, в сырьевой смеси наблюдаются выгорание органических включений, дегидратация глинистых минералов, вследствие чего понижаются пластические свойства материала. Таким образом, вещественный состав обжигаемого материала на выходе из второй зоны печи включает CaCO_3 , Fe_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, MgCO_3 .

В зоне декарбонизации, как это следует из ее названия, происходят в основном термическое разложение карбонатов кальция и магния, завершение процесса обезвоживания глинистых минералов (удаление цеолитной воды). Эта зона – наиболее напряженная в тепловом отношении часть печи с максимальным потреблением тепла. Подводимое тепло расходуется в основном на протекание эндотермических реакций, а не на нагрев материала. В конце этой зоны температура достигает примерно 1100 °С.

В зоне экзотермических реакций происходит взаимодействие высокоактивного CaO с SiO_2 метакаолинита с образованием силикатов вначале CS , а затем C_2S . Одновременно образуются соединения CA и CF . Вследствие экзотермичности этих реакций температура в зоне резко увеличивается до 1300 °С. На границе между зоной декарбонизации и зоной экзотермических реакций наблюдается световой контраст, условно разделяющий материал на темный и светлый. Образовавшиеся низкоосновные соединения по мере продвижения по печи вследствие насыщения их известью превращаются в C_3A , C_4AF и C_2S . Кроме них в составе материала на выходе из зоны будут присутствовать свободный CaO , а также небольшое количество C_3S , образовавшееся вследствие твердофазового взаимодействия C_2S с CaO .

Вышеперечисленные зоны печи являются, условно говоря, подготовительными для самого главного участка – зоны спекания, в которую материал поступает из зоны экзотермических реакций. Эта зона расположена в непосредственной близости к месту горения топлива – факелу. Граница этой зоны определяется появлением эвтектического или клинкерного расплава. В расплав переходят клинкерные минералы C_3A , C_4AF полностью и частично C_2S и CaO . Алитообразование в этой зоне длится примерно 15...25 мин. На выходе из зоны спекания, температура

в которой поднимается сначала с 1300 до 1450 °С, а затем снижается опять до 1300 °С, материал (клинкер) должен иметь заданный минералогический состав и содержать алит, белит, трехкальциевый алюминат, браунмиллерит и второстепенные клинкерные фазы.

Из зоны спекания клинкер поступает в зону охлаждения, являющуюся самой короткой в печи (4..6 м), пройдя которую он с температурой примерно 1250 °С ссыпается на решетку 11 (см. рис. 2.9) колосникового холодильника (КС-50) 12. Нагретый за счет охлаждения клинкера до 500..650 °С воздух поступает в печь в качестве вторичного воздуха на горение топлива.

Установленная в разгрузочной части колосникового холодильника 12 молотковая дробилка 13 производит предварительное измельчение крупных кусков обмазки и гранул клинкера размером 30..50 мм, отбрасывая при этом раздробленные куски назад в холодильник. Охлажденный и частично измельченный клинкер через разгрузочную решетку поступает на ковшовый транспортер, посредством которого он передается на клинкерный склад на доохлаждение. Туда же поступает клинкерная пыль, уловленная рукавными фильтрами в местах пересыпки клинкера и электрофильтрами 16 при очистке избытка воздуха, выбрасываемого в атмосферу.

Уловленная в пылеосадительной камере 14 и электрофильтре 16 пыль через ячейковые (шлюзовые) питатели по системе шнековых транспортеров 15 подается в бункер пневмовинтового насоса, который направляет ее во вращающуюся печь либо перед цепной завесой, либо за нее.

Вращающаяся печь работает под значительным разрежением; поэтому весь газовый тракт должен быть герметичным с целью уменьшения подсосов холодного воздуха и тем самым обеспечивать экономию топлива.

2.2.5. Технология производства портландцементного клинкера по сухому способу

Изготовление клинкера по сухому способу технологически и экономически целесообразно в тех случаях, когда исходные сырьевые материалы имеют влажность до 10...15 %, а также характеризуются относительной однородностью по химическому составу и физической структуре, что обеспечивает возможность получения гомогенной сырьевой муки при измельчении сырья.

При сухом способе производства цементного клинкера затраты теплоты на его обжиг составляют 3150...4190 кДж/кг, в то время как по

мокрому способу – 5900...6700 кДж/кг. Это достоинство сухого способа превалирует над некоторыми его недостатками (большие капитальные затраты на строительство, худшие санитарно-гигиенические условия, заниженные прочностные показатели цемента и др.).

Технология приготовления сырьевой муки

В случае использования известняка и глины, имеющих относительно небольшую влажность и пиритные огарки в качестве корректирующей добавки, приготовление сырьевой муки может осуществляться по технологической схеме, представленной на рис. 2.10.

Добыча известняка производится с помощью экскаватора 1, а глины – роторной машиной 4. В ряде случаев известняк подвергается грубому дроблению непосредственно в карьере в самоходной молотковой дробилке 2 до размера 1...3 см, после чего там же складировается с помощью штабелеукладчика 3. Полученную щебенку известняка с помощью комплекса машин усредняют и направляют в расходный бункер 7.

Добытая глина также складировается в карьере в открытом складе, после чего роторной машиной и системой ленточных конвейеров подается на объединенный склад глины и добавок (огарки, шлак, гипс), которые разгружаются вагоноопрокидывателем 6, а затем грейферным краном 5 и ленточным конвейером в отделение предварительного измельчения.

Все три компонента – известняк, глина и пиритные огарки, отдозированные с помощью ленточных весовых дозаторов 8, направляются на совместный помол в мельницу самоизмельчения типа «Аэрофол» 9, в которой происходят одновременно помол и сушка сырьевых материалов. В качестве теплоносителя используются дымовые газы с температурой 800...850 °С, образующиеся в выносной топке 12 от сжигания природного газа или мазута. В последнее время на цементных заводах вместо выносной топки применяют газотурбинные установки, в которых сжигается газ, вырабатывается электроэнергия, а отработанные дымовые газы направляются в мельницу в качестве теплоносителя. В случае недостаточно высокой температуры теплоносителя (500...550 °С), выходящего из газотурбинных установок, в мельницу подается смесь дымовых газов. Еще одним видом сушильного агента могут быть дымовые газы, поступающие из цеха обжига.

Измельченная и высушенная до влажности примерно 0,5...1 % сырьевая мука выносится отработанными дымовыми газами в сепаратор 10, в котором крупка отделяется и направляется на домол в труб-

ную мельницу 11. Сухой помол является более энергоемким по сравнению с помолом сырьевого шлама, поэтому для снижения расхода электроэнергии эффективно применять интенсификаторы помола (ССБ, лигнин, триэтанолламин и др.).

Тонкая фракция молотого продукта выделяется в осадительном циклоне 13, после чего теплоноситель мельничным вентилятором 14 направляется на очистку в электрофильтр 16 до содержания пыли 75 мг/м^3 , а затем аспирационным вентилятором 17 через дымовую трубу 18 выбрасывается в атмосферу. Для регулирования температуры дымовых газов, подаваемых в электрофильтр (во избежание достижения ими температуры ниже точки росы), предусмотрен кондиционер 15.

Уловленная годная фракция сырьевой муки в осадительных циклонах 13 и электрофильтре 16 с помощью системы транспортирующих устройств 19, элеватором 20 направляется на корректировку химического состава в силосы 21.

Состав муки корректируют до заданных значений по результатам химического анализа на содержание CaO , SiO_2 , Al_2O_3 и Fe_2O_3 проб муки с помощью рентгеновского спектрометра. Различают корректирование порционное (в силосах) и поточное (в потоке), которое осуществляют по титру (содержанию CaCO_3), титру и модулю, коэффициенту насыщения и модулю.

Порционное корректирование производится в случае значительного колебания химического состава сырья. При его относительно постоянном составе предпочитают этот процесс вести в потоке, для чего корректирующие силосы располагают над смесительными 22, как показано на рис. 2.10.

Если состав муки отличается от заданного, то его корректируют путем добавления в силос муки из корректирующих силосов 21. Корректирующие смеси приготавливают заранее. Обычно одна смесь обогащена карбонатным компонентом, а другая состоит из известняка и пиритных огарков. В соответствии с расчетом корректирующие шихты в необходимом количестве дозируют в смесительный силос 22, после чего полученную смесь гомогенизируют подачей сжатого воздуха.

Общая продолжительность усреднения состава муки длится 1...2 ч, затем ее перекачивают в расходный бункер постоянного уровня 23. Ленточный весовой дозатор 24 направляет сырьевую муку в элеватор 25, который поднимает ее в бункер, установленный в цехе обжига в системе запечных теплообменных устройств.

Воздух, транспортировавший сырьевую муку в силосы, перед удалением в атмосферу очищается в рукавном фильтре 26.

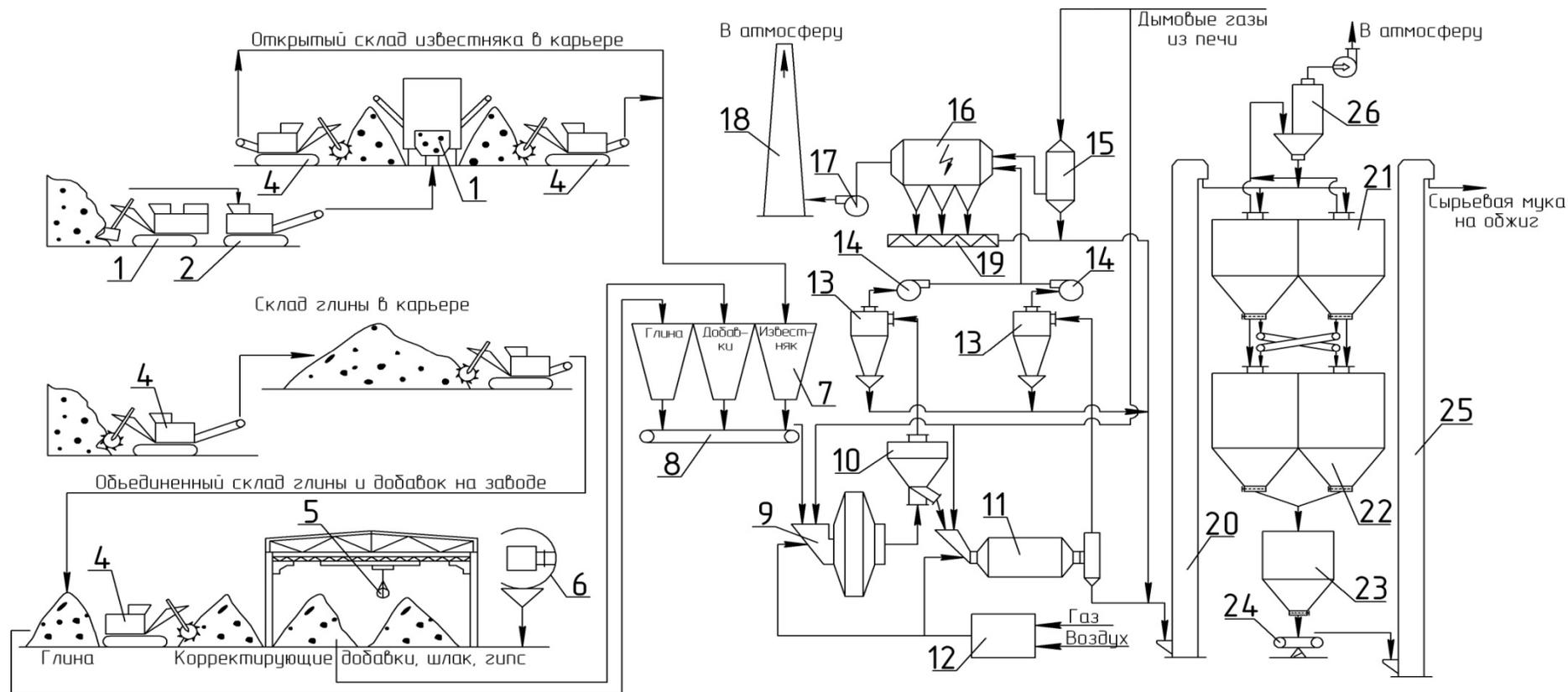


Рис. 2.10. Технологическая схема приготовления сырьевой муки по сухому способу:

- 1 – экскаватор; 2 – самоходная дробилка; 3 – штабелеукладчик; 4 – роторная машина; 5 – кран-перегрузатель; 6 – вагоноопрокидыватель; 7 – приемные бункера сырья; 8 – дозирующие и транспортирующее устройство; 9 – мельница «Аэрофол»; 10 – сепаратор; 11 – трубная мельница; 12 – топка; 13 – циклон; 14 – мельничный вентилятор; 15 – кондиционер; 16 – электрофильтр; 17 – аспирационный вентилятор; 18 – дымовая труба; 19 – механизм уборки пыли; 20, 25 – элеватор; 21 – корректирующий силос; 22 – смесительный силос; 23 – расходный бункер постоянного уровня; 24 – весовой дозатор (расходомер); 26 – рукавный фильтр

Обжиг цементного клинкера по сухому способу

Этот процесс осуществляется в коротких печах с запечными теплообменными устройствами – декарбонизаторами. В декарбонизатор подается до 60 % необходимого для обжига топлива, и именно в нем за короткое время почти полностью завершается процесс декарбонизации. Короткая вращающаяся печь (60...80 м) превращается в тепловой агрегат для спекания клинкера.

Печной агрегат сухого способа обжига клинкера оборудуется четырех-, пяти- или шестиступенчатым теплообменником циклонного типа, который функционирует как ступенчатый противоточный аппарат. Применяют циклоны низкого давления, что минимизирует потребление электроэнергии вытяжным дымососом. Число ступеней теплообменника не превышает шести по той причине, что выигрыш в расходе тепла (5...10 ккал/кг) не покрывает дополнительный расход электроэнергии и капитальные затраты на установку циклона.

На рис. 2.11 представлена технологическая схема цеха обжига цементного клинкера производительностью 3000 т/сут клинкера. Печной агрегат состоит из вращающейся печи 4,5×80 м, двухветвевое пятиступенчатого каскада циклонных теплообменников и колосникового клинкерного холодильника СМЦ-33 типа «Волга».

На обжиг поступает сырьевая мука следующего состава, мас. %: CaO – 43,0±0,02; SiO₂ – 13,5±1,0; Al₂O₃ – 3,5±0,5; Fe₂O₃ – 2,6±0,2; ппп – остальное. Коэффициент насыщения 1,01±0,02; глиноземный модуль $p = 1,3±0,2$, силикатный $n = 2,3±0,2$. Расчетный минералогический состав клинкера из такой муки будет следующий, мас. %: C₃S – 65±5; C₂S – 18±5,5; C₃A – 5,5±1; C₄AF – 12±1.

Принцип действия печного агрегата заключается в следующем: дымовые газы, образовавшиеся от сжигания технологического топлива (природного газа) во вращающейся печи 1 в количестве, составляющем ~40 % от общей потребности, а также в вихревой камере декарбонизатора (60 %), поступают в его смесительную камеру и затем движутся через систему циклонов и газоходов благодаря разрежению, создаваемому запечным дымососом, объединенным с циклонным теплообменником.

Сырьевая мука влажностью не более 1 % из расходного бункера 2 с помощью дозирующих устройств 3 подается в газоходы, соединяющие циклоны IV и V ступеней. Дымовые газы подхватывают муку и направляются в циклоны V ступени диаметром 3,5 м. Дымовые газы, нагревая муку, охлаждаются и с температурой ~300 °С направляются на очистку в электрофильтр 4, а затем с температурой ~150 °С дымососом 5 выбрасываются через дымовую трубу 6 в атмосферу.

С помощью этого дымососа производится и регулирование скорости движения газов в каскаде циклонных теплообменников.

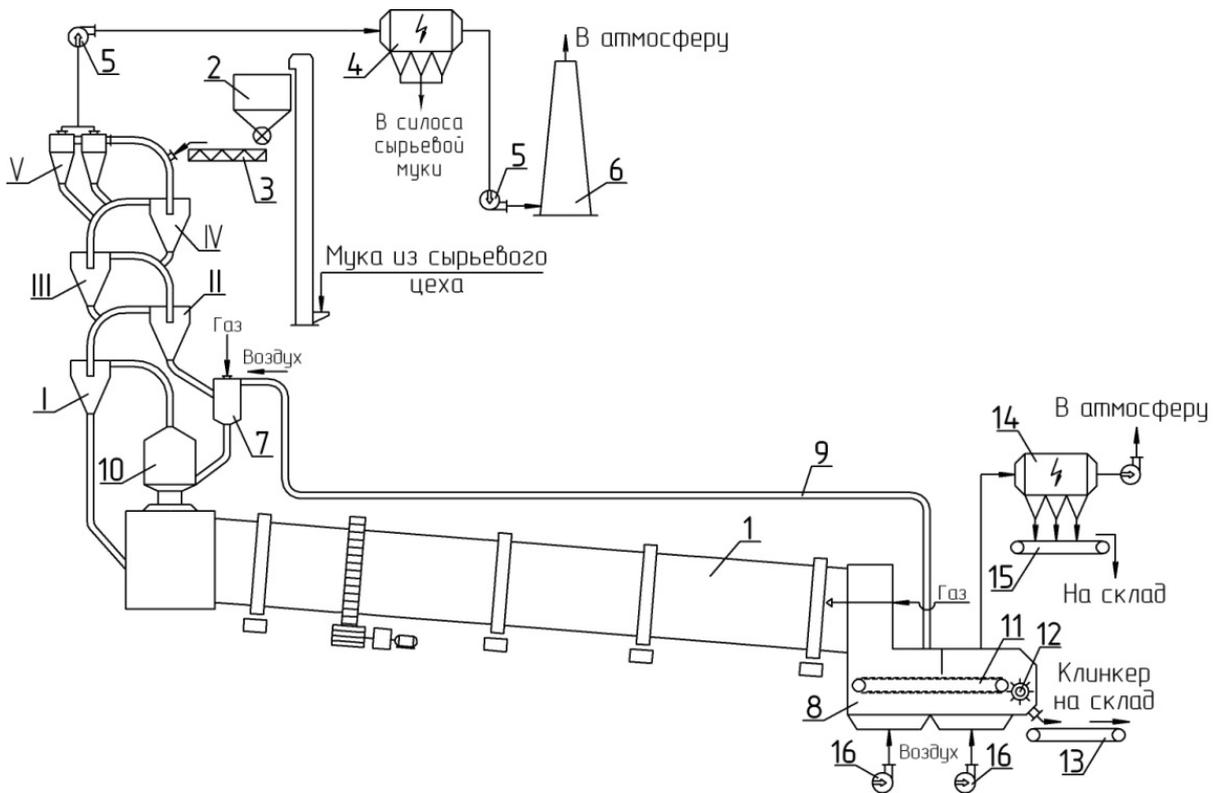


Рис. 2.11. Технологическая схема цеха обжига цементного клинкера по сухому способу (спецификация по тексту)

Отделенная в циклонах пятой ступени сырьевая мука по течкам, соединяющим циклоны V ступени с газоходами IV ступени, поступает в последние диаметром 5,6 м.

В IV, III и II ступенях обеих ветвей теплообменника движение сырьевой муки в газовом потоке, отделение муки от газов, транспортировка ее в нижестоящую ступень происходит аналогично описанному для V ступени.

Из циклонов II ступени обеих ветвей теплообменника сырьевая мука поступает в вихревой кальцинатор 7 декарбонизатора 10, где она равномерно рассеивается горячим воздухом, поступающим из клинкерного холодильника 8, по газоходу экстрагированного воздуха 9.

Рассеяная сырьевая мука и горячие газы в процессе совместного вихревого движения в кальцинаторе 7 быстро нагреваются и поступают в смесительную камеру декарбонизатора 10. В смесительной камере пылегазовая смесь из вихревого кальцинатора встречается с горячими газами, отходящими из вращающейся печи.

Оба потока быстро перемешиваются, происходит дальнейший интенсивный теплообмен между газами и сырьевой мукой, которые через газоход I ступени выносятся в циклоны I ступени, где сырьевая мука отделяется от газового потока. Далее мука с температурой примерно 850–1000 °С по течкам поступает во вращающуюся печь 1. В декарбонизаторе происходит термическая диссоциация карбоната кальция на 85–90 %, а карбоната магния практически полностью.

Во вращающейся печи, установленной под уклоном 4° к горизонту, сырьевая смесь подвергается дальнейшей тепловой обработке дымовыми газами, двигающимися навстречу. За счет гравитационных сил и вращения корпуса печи происходит продвижение материала от загрузочного к ее разгрузочному концу.

В печи, в отличие от обжига по мокрому способу, практически сразу начинаются твердофазовые реакции, приводящие к образованию C_2S , C_4AF , C_3A , $C_{12}A_7$ и др. За счет экзотермии реакций твердофазового взаимодействия температура поднимается до 1300 °С. При этой температуре обжигаемый материал начинает плавиться, и далее процесс клинкерообразования протекает в системе Т–Ж. Алит формируется в зоне спекания в интервале температур 1300–1450 °С в течение 10–25 мин.

В зоне охлаждения, начиная с 1300 до 1100 °С, происходит кристаллизация алита и других клинкерных минералов. Окончательное охлаждение клинкера осуществляется в колосниковом холодильнике 8, представляющем собой камеру, футерованную огнеупорным кирпичом. Клинкер попадает на конвейер переталкивающего типа. Через слой клинкера вентиляторами 16 просасывается холодный воздух, отчего его температура на выходе из холодильника снижается до 80–90 °С. Для интенсификации процесса охлаждения клинкер после колосниковой решетки 11 дробится в молотковой дробилке 12, работа которой организована таким образом, что крупные куски клинкера отбрасываются назад на решетку.

После охлаждения клинкер из холодильника по течкам поступает на пластинчатый конвейер 13, а затем в шатровый склад.

Воздух, нагретый в холодильнике до ~600 °С, поступает по газоходу 9 в декарбонизатор на горение топлива. Воздух, прошедший через вторую камеру холодильника, имеет температуру более низкую и может быть использован в качестве теплоносителя в сушильном отделении. После очистки от пыли в электрофилт্রে 14 он выбрасывается в атмосферу. Уловленная в электрофилт্রে 14 пыль собирается и конвейером 15 подается на склад.

2.2.6. Помол цемента

Эта технологическая операция является весьма ответственной, т.к. тонкое измельчение клинкера, гипса и минеральных добавок во многом определяет качество цемента. Дисперсность цемента влияет на скорость процессов гидратации и твердения. Чем больше в цементе частиц размером 0...5 мкм, тем выше его начальная прочность. Цементы высокого качества должны содержать частицы размером 3...30 мкм не менее 70 %.

Механическое измельчение материала приводит к разрыву химических связей с образованием на поверхности структурных группировок с некомпенсированными зарядами, что обуславливает повышение реакционной способности тонкодисперсного порошка.

При измельчении клинкера происходит преодоление сил взаимного сцепления частиц материала. Куски клинкера при измельчении сначала испытывают объемную деформацию, а затем разрушаются по ослабленным участкам (макро- и микротрещинам) с образованием новых поверхностей, обладающих несколько иными свойствами по сравнению со старыми.

Технология помола цементного клинкера с добавками по замкнутому циклу

Ранее в цементной промышленности преобладал открытый цикл помола, при котором материал проходит через мельницу однократно. В последнее время в связи с повышением требований к тонкости помола цемента, снижением его температуры, уменьшением расхода мелющих тел, регулированием гранулометрического состава целевого продукта и, наконец, увеличением удельной производительности мельницы на заводах стал широко применяться замкнутый цикл. Использование замкнутого цикла целесообразно еще и потому, что измельчаемый материал, как правило, состоит из компонентов различной размолоспособности, которая характеризуется коэффициентом размалываемости K , т.е. отношением времени, необходимого для размолва кварца $\tau_{кв}$ ко времени, затрачиваемому на размол клинкера $\tau_{кл}$, до той же степени дисперсности:

$$K = \frac{\tau_{кв}}{\tau_{кл}} = 0,67 - 1,41.$$

При средней размалываемости клинкера $K = 1$. Пониженная размалываемость характеризуется коэффициентом $K = 0,8 \dots 0,9$, а повышенная – в пределах 1,1.

Размалываемость цементного клинкера зависит также от его минералогического состава, т.к. отдельные клинкерные минералы имеют различную микротвердость и хрупкость (табл. 2.2).

Т а б л и ц а 2 . 2

Физические свойства клинкерных минералов

Минерал	Микротвердость, МПа/см ²	Хрупкость, мкм
C ₃ S	7670	38,4
C ₂ S	10300	28,4
C ₃ A	8750	31,4
C ₄ AF	10500	19,00

При открытом цикле помола легкоразмалываемые компоненты переизмельчаются, а в замкнутом они размалываются до одинаковой тонкости. Своевременное удаление из мельницы годного по дисперсности продукта предотвращает его переизмельчение, на которое затрачивается большое количество энергии.

Технологические схемы помола по замкнутому циклу комплектуются воздушно-проходными или циркуляционными сепараторами. В первом случае транспортирование измельченного материала осуществляется пневматически – струей воздуха, во втором – с помощью элеватора.

Цементные мельницы для помола клинкера оснащаются только циркуляционными сепараторами.

На рис. 2.12 представлена технологическая схема помола цементного клинкера как по замкнутому, так и по открытому циклу. В первом случае обычно выпускают бездобавочный цемент (клинкер + гипс), а во втором – цемент с минеральными добавками (доменный гранулированный шлак, известняк, доломит, кварцевый песок и др.).

По замкнутому циклу помола клинкер с максимальным размером кусков 60 мм и гипсовый щебень с объединенного склада грейферным краном подаются в расходные бункера 3, 4, под которыми установлены весовые тарельчатые дозаторы 6. Предварительно высушенный в сушильном барабане 2 доменный гранулированный шлак из приемного бункера 1 подается в расходный бункер 5. Отдозированные компоненты подаются на помол в двухкамерную трубную мельницу 7 размером 3×14 м. Применяют для этих целей мельницы и других размеров: 3,2×15, 4×13,5 и т.д. Производительность мельниц находится в следующих пределах: 25, 45, 75 т/ч по цементу.

В настоящее время увеличение размеров мельниц стабилизировалось, поскольку крупногабаритные помольные агрегаты характеризуются низкой надежностью, сложностью изготовления и транспортировки.

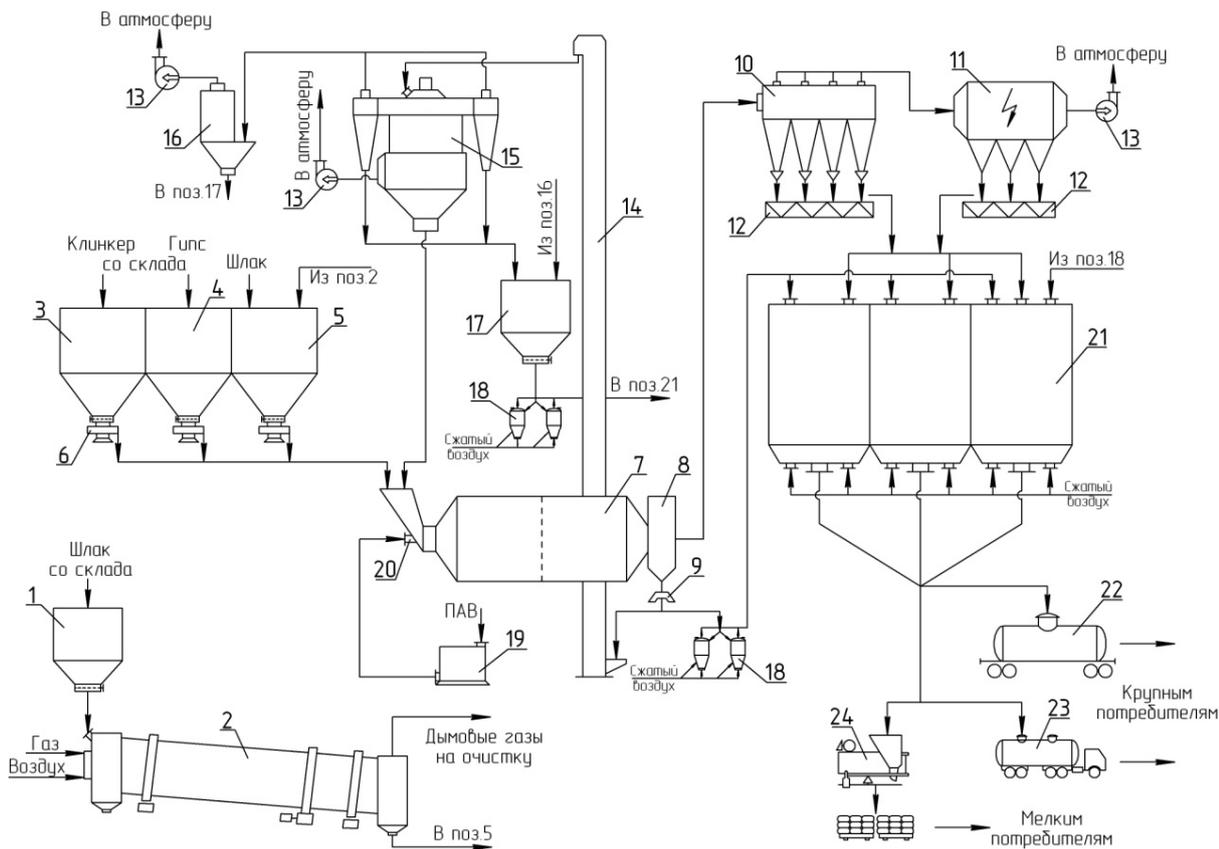


Рис. 2.12. Технологическая схема помола цемента

В мельницу для интенсификации помола через специальное устройство 20 впрыскивается в первую камеру ПАВ, подаваемое центробежным насосом 25 из бака 19 в количестве 0,02...0,04 %. Чаще всего используют триэтаноламин и сульфитно-дрожжевую бражку, которые покрывают вновь образующиеся поверхности, что предотвращает их агрегирование. Кроме того, ПАВ проникает в микротрещины материала, понижает его сопротивляемость размолу. Благодаря такому совместному действию ПАВ размалываемый цемент приобретает большую текучесть, что положительно сказывается на скорости его перемещения. В результате производительность мельницы увеличивается на 20...30 % с соответствующим снижением удельного расхода электроэнергии. Измельчение материалов в первой камере трубной мельницы производится ударами свободно падающих мелющих тел (шаров) размером 60...110 мм и массой 5...6 кг каждый. Вторая камера загружена цельпесом длиной 20...40 мм и диаметром 16...25 мм. Коэффициент заполнения шарами 2,74, а цельпесом – 2,292. Тонкий помол во второй камере осуществляется за счет истирания.

Важное значение имеет конфигурация рабочей поверхности бронеплит, которыми футерована мельница. В случае использования конусной классифицирующей футеровки или каблучковых бронеплит

вместо гладких можно повесить на 20 % производительность мельницы и примерно на столько же снизить удельный расход электроэнергии.

В зависимости от частоты вращения различают каскадный (при малой частоте вращения) и водопадный (при большой частоте вращения) барабаны мельницы. В первом случае мелющие тела перекатываются и материал измельчается за счет раздавливающих и истирающих усилий. При водопадном режиме мелющие тела поднимаются по корпусу мельницы на определенную высоту, а затем под действием гравитационных сил отрываются от корпуса и падают, совершая ударное усилие.

В реальных условиях имеют место оба режима, которые обеспечивают продвижение материала в мельнице в течение 20...30 мин со скоростью примерно 0,5 м/мин.

Молотый продукт из мельницы поступает сначала в аспирационную шахту 8, а затем в аэрожелоб (на схеме не показан), после чего элеватором 14 поднимается в сепаратор 15. Цемент попадает в сепараторе на вращающийся диск. Часть крупных частиц под действием силы тяжести падает вниз, остальные под действием центробежных сил сбрасываются во внутренний корпус. Циркуляционные сепараторы по сравнению с воздушно-проходными более компактны и экономичны.

Крупная фракция из сепаратора направляется в мельницу на долом, а мелкая (готовый продукт) из циклонов сепаратора подается в приемный бункер 17, откуда по мере наполнения с помощью спаренного пневмокамерного насоса 18 поступает в цементные силосы 21.

Аспирационный воздух после сепаратора вентилятором 13 выбрасывается в атмосферу, предварительно пройдя очистку в рукавном фильтре 16. Уловленная цементная пыль направляется в бункер 17.

Аспирация мельницы осуществляется под воздействием разрежения, создаваемого вентилятором 13. Запыленный воздух, пройдя аспирационную шахту 8, систему циклонов 10, электрофильтр 11, выбрасывается в атмосферу, а уловленный продукт направляется с помощью шнековых конвейеров 12 в цементные силосы.

В связи с тем что доменный шлак размалывается труднее, чем клинкер из-за большего содержания в нем оксида железа, придающего ему пластичность, помол шлакопортландцемента проводят по открытому циклу во избежание сегрегации размалываемых частиц клинкера и шлака. В этом случае с помощью двухходового переключателя 9 шлакопортландцемент направляется непосредственно в пневмокамерный насос 18 для подачи его в силосы 21, из которых он железнодорожным 22 или автотранспортом 23 отправляется потребителю.

Часть цемента затаривается в бумажные мешки на упаковочной машине 24 и отправляется мелким потребителям.

2.2.7. Свойства портландцемента и его применение

В результате перемешивания цемента с водой получают цементное тесто. При повышении расхода воды подвижность теста увеличивается. Цементное тесто представляет собой концентрированную водную суспензию, характеризующуюся коагуляционной структурой.

При механическом воздействии (например вибрации) происходит разрушение коагуляционных контактов между частицами цементного теста. В результате чего подвижность системы значительно возрастает. После прекращения механического воздействия контакты между частицами цемента восстанавливаются, и тесто становится менее подвижным. Это явление называют тиксотропией.

Нормальная густота цементного теста – водоцементное отношение цементного теста, при котором оно имеет стандартную текучесть. Для определения этой характеристики используется прибор Вика с пестиком диаметром 10 мм. Цементное тесто имеет нормальную густоту, если пестик, погружаясь в цементное тесто, не доходит до поверхности, на которой находится испытываемое тесто, на 5...7 мм. Измерение производят через 30 секунд после начала погружения пестика. Нормальная густота обычного портландцемента находится в пределах 24...28 %, а пуццоланового – до 35 %.

Нормальная густота портландцемента зависит от гранулометрического и минерального состава.

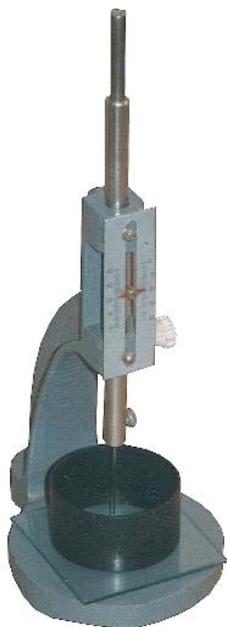


Рис. 2.13. Прибор Вика с кольцом

Схватывание цементного теста. В результате гидратации минералов цементного клинкера в тесте в дополнение к коагуляционным контактам возникают кристаллизационные контакты между частицами цемента, которые характеризуются большей прочностью в отличие от коагуляционных контактов, не способных к восстановлению после разрушения. Увеличение числа этих контактов приводит к потере пластичности теста и переходу его из псевдожидкого в твердое камнеподобное состояние. Данный процесс называют схватыванием. Сроки начала и конца этого процесса, имеющего большое практическое значение в технологии бетона, определяют с помощью прибора Вика с иглой диаметром 1,1 мм (рис. 2.13).

Началом схватывания теста считается время, прошедшее от начала приготовления цементного теста до того момента, когда игла прибора Вика погружается в цементное тесто на 2...4 мм. Конец схватывания – время, прошедшее от начала

затворения до того момента, когда игла прибора Вика погружается в цементное тесто на 1...2 мм. Сроки схватывания выражаются в часах и минутах. Начало схватывания по ГОСТ 10187–87 должно наступить не ранее чем через 45 мин, а конец схватывания – не позднее 10 ч. По ГОСТ 31108–2003 начало схватывания зависит от класса цемента по прочности и находится в интервале от 40 до 60 мин.

Активность портландцемента – это прочность при сжатии цементно-песчаного раствора стандартной консистенции через 28 суток твердения. Для приготовления раствора используется песок с нормируемыми характеристиками. В зависимости от полученной прочности назначают марку цемента, при этом учитывают прочность через 2, 3 или 7 суток (в зависимости от используемого стандарта и класса цемента), а по ГОСТ 10178–85 нормируется также прочность при изгибе. На активность цемента влияют следующие факторы: тонкость измельчения, минералогический состав, содержание активных минеральных добавок.

Равномерность изменения объема – важное свойство цемента. Изменение объема цементного камня приводит к сбросам прочности, а иногда и к его разрушению. Это негативное явление может быть вызвано содержанием в цементном клинкере:

- свободного оксида кальция более 1,5 %;
- свободного оксида магния, в связи с чем его количество в цементном клинкере ограничивается 5 %.

При высокой температуре обжига клинкера эти оксиды образуют медленно гасящиеся формы, которые продолжают взаимодействовать с водой после потери цементным тестом пластических свойств, что приводит к снижению прочности цементного камня или образованию в нем трещин.

Иногда снижение прочности наблюдается в цементах с повышенным содержанием C_3A или при избыточном введении гипса. В таких цементах при гидратации образуется повышенное количество высокосульфатной формы гидросульфата алюмината кальция.

Для определения равномерности изменения объема в ГОСТ [15] предусмотрена методика, основанная на кипячении цементных образцов в форме лепешек диаметром 7...8 см и толщиной в середине около 1 см. После изготовления эти образцы твердеют в течение одних суток во влажных условиях и затем подвергаются кипячению в течение 3 часов. Если в образцах после проведения испытания не наблюдается искривлений или образований трещин, то считается, что цемент не имеет неравномерного изменения объема.

Цементы с повышенным содержанием оксида магния испытывают на равномерность изменения объема аналогичным образом, однако об-

разцы не кипятят, а запаривают в автоклаве при давлении насыщенного пара 2 МПа.

Применение портландцемента. Портландцемент и его разновидности являются главным вяжущим материалом в современном строительстве, который используется для производства конструктивных строительных бетонов, для сооружения дорожного полотна, при строительстве гидротехнических сооружений, для изготовления кладочных, штукатурных и других видов строительных растворов и различных видов отделочных материалов (шпаклевки и т.д.).

Портландцемент в основном используется для производства бетонных и железобетонных конструкций. Существуют две разновидности этих конструкций: сборные и монолитные.

Сборные конструкции изготавливаются на заводах и полигонах. Для интенсификации технологии бетон после формования подвергают тепловлажностной обработке при температуре около 80 °С. В результате уже менее чем через сутки можно получить изделие, готовое к монтажу. Технология строительства из сборных железобетонных конструкций позволяет вести строительство независимо от погодных условий, так как твердение цемента происходит в оптимальных условиях в заводских цехах.

Вторая разновидность технологии строительства зданий из железобетона – монолитная, при которой конструкции возводятся непосредственно в проектом положении путем укладки и уплотнения бетона в опалубке. Существенным недостатком этой технологии с точки зрения твердения цемента является необходимость обеспечения нормального температурно-влажностного режима при различных погодных условиях, включая отрицательные температуры в осенне-зимний период. В связи с этим при монолитном строительстве набор прочности бетона до распалубочной может продолжаться несколько недель.

При возведении массивных бетонных конструкций – платин, массивных фундаментов – выделение тепла при гидратации портландцемента может приводить к опасному нагреву и растрескиванию бетона. В этих случаях применяют цементы с пониженным тепловыделением – цементы с минеральными добавками.

При эксплуатации бетона в условиях действия сульфатных вод необходимо использовать сульфатостойкий цемент бездобавочный или шлакопортландцемент.

Долговечность цементного камня зависит от его состава и структуры, а также условий эксплуатации. При воздействии на цементный камень минерализованных вод в нем могут происходить коррозионные

процессы, которые разрушают структуру материала и приводят к потере его работоспособности.

Москвин В.М. предложил классифицировать коррозию портландцементного камня в водной среде следующим образом:

– коррозия I вида связана с вымыванием из цементного камня растворимых продуктов гидратации цемента (в основном $\text{Ca}(\text{OH})_2$);

– коррозия II вида развивается в результате взаимодействия растворов солей или кислот с продуктами гидратации цемента, в результате чего образуются малопрочные или легкорастворимые соединения, которые вымываются;

– коррозия III вида возникает в цементном камне в результате реакций образования в поровом пространстве кристаллических продуктов, которые оказывают давление на стенки пор, что приводит к снижению прочности и разрушению цементного камня.

Кинд В.В. рассматривал несколько видов химической коррозии:

– коррозия выщелачивания, связанная с растворением и вымыванием из цементного камня гидролизной извести (аналогично коррозии I вида по В.М. Москвину);

– кислотная коррозия, возникающая при рН водной среды менее 7;

– углекислая коррозия, протекающая при воздействии на цементный камень углекислоты;

– сульфатная коррозия, которая подразделяется на сульфоалюминатную (при концентрации ионов SO_4^{2-} от 250 до 1000 мг/л), сульфоалюминатно-гипсовую (при концентрации ионов SO_4^{2-} более 1000 мг/л) и гипсовую, которая возникает при воздействии растворов с большим содержанием сульфата натрия или калия;

– магниальная коррозия, которая подразделяется на магниальную, обусловленную взаимодействием цементного камня с катионами магния при отсутствии в воде сульфатных ионов, и сульфатно-магниальную, которая развивается при совместном действии на цементный камень Mg^{2+} и SO_4^{2-} .

Контрольные вопросы

1. Что является сырьем для производства портландцемента?
2. Какие виды портландцемента Вам известны?
3. В чем отличие класса цемента от его марки?
4. Почему содержание MgO в сырьевой шихте для производства портландцемента не должно превышать 5 %?
5. Какую роль играет гипсовый камень, который вводят в цемент при его помоле?

6. Перечислите главные минералы цементного клинкера.
7. Напишите реакцию гидратации алита.
8. Напишите реакцию гидратации C_3A .
9. Какие вещества могут вызвать химическую коррозию цемента?
10. В чем причина высокой коррозионной стойкости шлакопортландцемента и пуццоланового портландцемента?
11. Какие требования предъявляются к минералогическому составу сульфатостойкого портландцемента?
12. Почему мягкая проточная вода может привести к разрушению цементного камня? Как называется этот вид коррозии?
13. Какие виды коррозии Вам известны?
14. За счет чего можно повысить стойкость цемента к коррозии выщелачивания?
15. Почему растворы $MgCl_2$ и $MgSO_4$ являются коррозионно-активными средами для цемента?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. ГОСТ 31108–2003. Цементы общестроительные. Технические условия. – М., 2003.
2. ГОСТ 30515–97. Цементы. Общие технические условия. – М., 1997.
3. ГОСТ 10178–85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. – М., 1985.
4. ГОСТ 125–79**. Вяжущие гипсовые. Технические условия. – М., 1979.
5. ГОСТ 30744–2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка – М.: ГУП ЦПП, 2001. – 30 с.
6. ГОСТ 4013–82. Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия. – М., 1982.
7. ГОСТ 25094–94. Добавки активные минеральные для цементов. Методы испытаний. – М., 1994.
8. ГОСТ 24211–2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – М., 2008.
9. ГОСТ 3476–74. Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов. – М., 1974.
10. EN 197–1:2000. Цементы. Часть 1: Состав, технические требования и критерии соответствия обычных цементов (Cement – Part 1: Composition, specifications and conforming criteria for common cements).
11. ГОСТ 9179–77*. Известь строительная. Технические условия.
12. ГОСТ 23789–79. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний.
13. ГОСТ 310.1–76. Цементы. Методы испытаний. Общие положения.
14. ГОСТ 310.2–76. Цементы. Методы определения тонкого помола.
15. ГОСТ 310.3–76. Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема.
16. ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения пределов прочности при изгибе и сжатии.
17. ГОСТ 3476–74. Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов. Технические условия.

18. ГОСТ 4013–82. Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия.
19. ГОСТ 22688–77. Известь строительная. Методы испытаний.
20. ГОСТ 23789–79. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний.
21. ГОСТ 24640–91. Добавки для цементов. Классификация.
22. ГОСТ 25095–82. Добавки активные минеральные. Методы испытаний.
23. ГОСТ 26871–86. Материалы вяжущие гипсовые. Правила приемки, упаковки, маркировки, транспортирования и хранения.
24. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников.– М.: Стройиздат, 1979.
25. Сулименко, Л.М. Основы технологии вяжущих материалов [Текст]: учеб. пособие / Л.М. Сулименко, В.Г. Савельев, И.Н. Тихомирова. – М.: РХТУ, 2001.– 167 с.

Дополнительная литература

1. Пашенко, А.А. Вяжущие материалы [Текст] / А.А. Пашенко, В.П. Сербин, Е.А. Старчевская. – Киев: Вища школа, 1975.
2. Stark, J., Mцser, B., Eckart, A. New approaches to cement hydration. Part 1, ZKG International, 54(1), 2001, pp. 52–60.
3. Stark, J., Mцser, B., Eckart, A. New approaches to cement hydration. Part 2, ZKG International, 54(2), 2001, pp. 114 – 119.
4. Лащенко, В.А. Ускоренные методы определения активности и алюминатности цемента [Текст] / В.А. Лащенко, Н.В. Лащенко // Бетон и железобетон. – 1980. – № 11. – С. 27–28.
5. А.с. 1406479 СССР, МКИ С 01 G 33/38. Способ определения активности цемента / Г.И. Бердов [и др.] (СССР); № 4074090/31–33; Заявл. 02.06.86; Опубл. 30.06.86, Бюл. № 24.
6. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих веществ [Текст] / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1989.
7. Ерошкина, Н.А. Минерально-щелочные вяжущие [Текст]: моногр. / Н.А. Ерошкина, В.И.Калашников, М.О. Коровкин. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 152 с.

8. Коровкин, М.О. Эффективность суперпластификаторов и методология ее оценки [Текст]: моногр. / М.О. Коровкин, В.И. Калашников, Н.А. Ерошкина. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 142 с.

9. Русина, В.В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов [Текст]: учеб. пособие. – Братск: БрГУ, 2007. – 224 с.

10. Глуховский, В.Д. Шлакощелочные вяжущие и бетоны [Текст] / В.Д. Глуховский. – Киев: Будивельник, 1978. – 280 с.

11. Глуховский, В.Д. Шлакощелочные цементы и бетоны [Текст] / В.Д. Глуховский, В.А. Пахомов. – Киев: Будивельник, 1978. – 184 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Характеристика суперпластификаторов

№ п/п	Наименование СП	Химическая основа	Производитель
1	С-3	Нафталинсульфокислота	ОАО «Оргсинтез», г. Новомосковск, Тульская область
2	Peramin SMF 20	Полимерный сульфоме- ламин	Perstorp Construction Chemi- cals Inc. Швеция
3	Peramin SMF 10		
4	Sika Viscocrete 105P	Эфир поликарбоксилата	Sika AG, Швейцария
5	Sika ViscoCrete 3 Neu	Раствор поликарбокси- лата	
6	Sika ViscoCrete 5 Neu		
7	Sika 20HE		
8	Dynamon SR1	Модифицированный ак- риловый полимер	Mapei, Италия
9	Dynamon SR3		
10	Цемактив СУ-2	Нет данных	ООО «Цемактив», Санкт- Петербург
11	Glenium 27	Поликарбоксилатный эфир	BASF, Германия
12	Romex M(FM)	Полимерный сульфоме- ламин	Romex AG
13	Melment F10	Полимерный сульфоме- ламин	SKV Polymers GmbH, Германия
14	Melflux PP 100 F	Модифицированный по- лиэтиленгликоль	
15	Melflux PP 200 F		
16	Melflux PP 1641 F	Полиэфиркарбоксилат	
17	Melflux PP 5581		
18	Хидетал ГП 9г с ус- коряющим действием	Поликарбоксилатный эфир	ООО «СКТ-Стандарт», г. Но- возыбков, Брянская область

Приложение Б

Химический состав шлаков

Шлак	Содержание оксидов, %										Σ, %	M _o	M _a	K _к
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ или (FeO)	CaO	MgO	SO ₃	MnO	TiO ₂	K ₂ O+Na ₂ O	п.п.п.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Череповецкий металлургический комбинат (ОАО «Северсталь»)	34,4...38,9	7,1...10,3	0,55...7,05	35,0...44,4	8,4...12,5	–	0,15...0,6 9	0,47...1,59	–	0,67...0,92		1	0,25	1,41
Новотульский металлургический завод (ОАО «Тулачермет»)	36,78	9,13	3,82	46,25	6,86	3,25	2,5	–	–	–		1,04	0,31	1,67
ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»	37,1	7,3	0,65	41,4	9,4	1,83	1,02		0,59+0,35	–		1,14		
ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»	36,63	13,49	0,19	38,24	7,31	1,09	0,16	1,05	0,76+1,04	–		0,9		
ОАО «Челябинский металлургический комбинат»	38,8	11,9	0,5	38,4	10,5	0,67	0,4	–	–	0,5				

Окончание прил. Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Нижнетагильский металлургический комбинат (ОАО «ЕВРАЗ НТМК»)	34,58	13,63	0,79	36,97	7,66	0,36	–	1,1		–				
Нижнетагильский металлургический комбинат (титанистый)	29,58	17,57	2,43	31,64	10,35	0,23	0,98	8,2		–	99,98	0,9	0,6	1,58
ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат»	36,2	11,2...15,9	0,6...2,6	38...42,2	4,8...9,9	0,4...1,2	0,2...1,1	1,1	0,13...0,17	0,1...1,5				
ОАО «Чусовской металлургический завод», Пермский край	31,5	15,1	1,04	31,5	0,3	0,63	–	7,1						
ОАО «Орско-Халиловский металлургический комбинат»	40,02	8,22	0,1	42,02	6,26	1,45	0,34	0,36				1,0		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ВОЗДУШНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА.....	6
1.1. Гипсовые и гипсоангидритовые вяжущие	6
1.2. Известь воздушная	31
1.3. Магнезиальные вяжущие.....	44
2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА.....	48
2.1. Гидравлическая известь и романцемент	48
2.2. Портландцемент	49
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	89
ПРИЛОЖЕНИЯ	92

Учебное издание

Калашников Владимир Иванович
Коровкин Марк Олимпиевич
Ерошкина Надежда Александровна

ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Учебное пособие

Редактор М.А. Сухова
Верстка Т.А. Лильп

Подписано в печать 23.04.15. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 5,58. Уч.-изд.л. 6,0. Тираж 80 экз.
Заказ № 142.



Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.