На правах рукописи

БОРИСОВ ИВАН НИКОЛАЕВИЧ

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ОБЖИГЕ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

05 17 11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Белгород – 2008

Работа выполнена на кафедре технологии цемента и композиционных материалов Белгородского государственного технологического университета им. В Г Шухова (БГТУ им. В Г Шухова)

Научный консультант. доктор технических наук, профессор
Классен Виктор Корнеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Сулименко Лев Михайлович,
Российский химико-технологический университет им Д И Менделеева

доктор технических наук, профессор
Шубин Владимир Иванович
ООО «БазэлЦемент»

доктор технических наук, профессор
Беседин Павел Васильевич
Белгородский государственный технологический университет им. В Г. Шухова

Ведущая организация ОАО «ГИПРОЦЕМЕНТ», г С -Петербург

Защита диссертации состоится 3 октября 2008 г на заседании диссертационного совета Д 212 014 05 в Белгородском государственном технологическом университете в 10^{00} часов
по адресу 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГТУ им В.Г Шухова

Автореферат разослан «14» августа 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Огрель Л Ю

Общая характеристика работы

Актуальность. Обжиг клинкера является энерго- и материалоёмкой стадией технологического процесса производства цемента Особенно высокий расход топлива и материалов наблюдается при мокром способе, преимущественно распространенном в России. Так, технологический КПД вращающихся печей составляет всего 25–27%, а на 1 тонну клинкера расходуется более 5 тонн таких, жизненно необходимых, материалов как природное сырье, топливо, вода и воздух. В связи с этим работа, направленная на решение проблемы энерго- и ресурсосбережения в технологии цемента является важной народно-хозяйственной задачей, которую представляется возможным осуществить путём интенсификации процессов обжига цементного клинкера и использования техногенных материалов.

В настоящее время в отвалах находятся миллионы тонн углеотходов, различных металлургических и медеплавильных шлаков Комплексное использование этих материалов на цементных предприятиях обеспечит экономию топливных и материальных ресурсов При этом одновременно решаются важные экологические проблемы по уменьшению отвальных площадей, загрязнения почвы, воды и атмосферы Следовательно, научные исследования, направленные на комплексное решение данной проблемы, несомненно, актуальны.

Работа выполнялась в соответствии с целевой комплексной программой "Топливо" МПСМ и АО «Концерн Цемент» на 1986–1996 гг , гранта 97гр-98 "Экономия топлива и электроэнергии" на 1998–1999 гг.; НТП Минвуза РФ по ВО "Архитектура и строительство" на 2000–2004 гг ; с тематическим планом НИР, финансируемых в 1996–2006 гг. из средств госбюджета, а также прямыми хозяйственными договорами с цементными предприятиями России и стран СНГ

Цель работы Развитие научно обоснованных принципов интенсификации обжига цементного клинкера во вращающейся печи, направленных

на энерго- и ресурсосбережение и улучшение экологии окружающей среды, путем оптимизации технологических процессов и комплексного использования различных техногенных материалов

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи с исследованием

– процессов тепломассообмена в цепных завесах и разработка алгоритма проектирования и совершенствования комплекса теплообменных устройств во вращающейся печи с учетом изменения при нагревании физических свойств сырьевого шлама и установленных газодинамических зависимостей движения и распределения газового потока в сечении печи и новых конструктивных элементов теплообменников;

– особенностей физико-химических и технологических процессов синтеза клинкера при использовании техногенных материалов с разработкой принципов управления процессом высокотемпературной агломерации и способов повышения качества клинкера;

– влияния дисперсности твердой составляющей, количества и свойств жидкой фазы на процесс формирования клинкерных гранул с уточнением механизма клинкерного пыления во вращающихся печах на основе высокотемпературных взаимодействий жидкофазного спекания,

– условий формирования и разрушения защитной обмазки на футеровке, выявление причин и механизма образования колец с разработкой способов создания устойчивой обмазки и предотвращения кольцеобразования,

– влияния технологических параметров работы печи и холодильника на особенности условий горения топлива в пламенном пространстве печи при вводе выгорающей добавки в шлам

Научная новизна Разработаны научные принципы и методология энергосбережения при обжиге цементного клинкера применительно к вращающимся печам мокрого способа производства в условиях использо-

вания техногенных материалов с одновременной экономией природного сырья, повышением качества продукции и улучшением экологии окружающей среды путем интенсификации технологических процессов на основе установленных при комплексном исследовании печной системы зависимостей между физико-химическими, тепломассообменными, газодинамическими и факельными процессами

Основу комплексного подхода составили специально разработанные установки, моделирующие технологические процессы, протекающие в промышленных печах, которые позволили установить массообменные и газодинамические закономерности, протекающие в цепных завесах с учётом физических свойств сырья, механизма формирования клинкерных гранул и обмазки в зоне спекания и разрушения огнеупора при термическом ударе.

Предложены и реализованы принципы создания и совершенствования комплекса теплообменных устройств во вращающейся печи, заключающиеся в конструировании схемы и элементов цепной завесы с учетом изменения в процессе нагревания физических свойств материала, определяемых на специально разработанной модельной установке Разработан алгоритм проектирования комплекса теплообменных устройств, включающий теоретически и экспериментально обоснованные расчеты плотности отдельных участков, длины цепи, схемы навески, учитывающий интенсивность перехода материала в процессе сушки на цепи и схода с них и позволяющий в результате комплексного рассмотрения десятка взаимосвязанных факторов оптимизировать параметры цепной завесы в целом как тепломассообменной системы.

Выявлен механизм процессов пылеуноса из печи и грануляции материала в цепной завесе, обусловленный адгезионными и когезионными взаимодействиями в системе металл – сырьевой шлам и газодинамикой

цепной завесы, позволившие классифицировать зоны пылеосаждения и пылеобразования

Конкретным примером реализации указанных принципов служит теоретическое обоснование и экспериментальное доказательство возможности подачи в печь выгорающих техногенных материалов При этом теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность подачи выгорающих техногенных материалов в сырьевой шлам при мокром способе производства цемента, обеспечивающая экономию до 25% форсуночного топлива Установлена зависимость максимально возможной концентрации горючего вещества в шламе от его состава, теплового КПД холодильника и коэффициента избытка воздуха, которая определяется необходимостью поддержания заданного теплообмена и температурного напора в зоне спекания

Выявлены особенности физико-химических процессов обжига клинкера при использовании медеплавильных и доменных шлаков. В процессе расстекловывания железосодержащего медеплавильного шлака образуется авгит состава (Ca, Fe, Mg)·SiO_3, из которого при окислении двухвалентного железа выделяются гематит и кварц При расстекловывании доменного шлака кристаллизуется до 70% мелилита, который выше 1100°С приобретает нестехиометрический состав вследствие растворения в нем до 20% диопсида При этом на примере кальций-алюмо-ферромагнезиальной оксидной системы подтверждаются установленные ранее на аналогичной алюмо-цинко-силикатной системе явления образования непрерывного ряда твердых растворов меллилитового ряда с двойным гетеровалентным замещением $3Si^{4+} \leftrightarrow 4Al^{3+}$ и $Si^{4+} \leftrightarrow 2Mg^{2+}$ в двух независимых тетраэдрических позициях. Эти процессы в последующем в низкоосновном клинкере предопределяют состав и количество минералов плавней клинкера, формируя только алюмоферриты кальция и предотвращая образование C_3A Протекающие в техногенных материалах фазо-

вые превращения вследствие проявления эффекта Хедвалла, окислительные экзотермические реакции и возникающие низкотемпературные расплавы интенсифицируют процессы клинкерообразования.

Развиты представления о взаимозависимых физико-химических и теплообменных процессах, протекающих в зоне спекания вращающихся печей: уточнены механизмы образования и разрушения обмазки; агломерации материала в зависимости от количества жидкой фазы и дисперсности твердой составляющей; формирования колец, обусловленные возникновением избыточного количества низкоосновного силикатного расплава при ~1200°С вследствие неравновесного состояния клинкерной системы из-за высокой скорости нагрева смеси и последующей кристаллизации жидкой фазы при ее насыщении оксидом кальция

Практическая значимость работы Разработан комплекс технологических и конструкторских решений, направленных на интенсификацию обжига цементного клинкера во вращающихся печах, которые включают модернизацию холодильников, горелочных и теплообменных устройств и методы направленного регулирования процессов, обеспечивающих экономию топлива и высокую стойкость футеровки Результаты используются более чем на 70 печах заводов России, Киргизстана, Казахстана, Узбекистана, Грузии, Азербайджана и Армении Разработана конструкция, изготовлены и внедрены 56 диффузионных вихревых горелок ДВГ (патент № 2187043, сертификат соответствия № 7546092) на вращающихся печах 30 заводов Выполнен и реализован проект комплекса теплообменных устройств для вращающихся печей ряда цементных предприятий.

При этом достигнуты следующие технико-экономические показатели: повышение теплового КПД холодильника до 0,9, увеличение стойкости футеровки на 60–200 суток; снижение удельного расхода условного топлива на 5–20 кг/т клинкера и пылевыноса из печи в 1,5–2 раза, увеличение

производительности печей на 10–15%, устранение кольцеобразования в цепной завесе

От внедрения комплекса работ на цементных предприятиях России и стран СНГ получен годовой экономический эффект, подтвержденный актами предприятий, на сумму более 500 млн руб

Результаты работы используются в курсах лекций и методических указаниях по дисциплинам "Тепломассообмен", "Оптимизация производства вяжущих материалов", "Технология вяжущих веществ", читаемых студентам специальности 240304 и на ежегодных семинарах повышения квалификации специалистов цементной промышленности

Апробация работы Результаты работы представлены на Международных конференциях в Москве (1986, 1991, 1998, 2005), Харькове (1986), Белгороде (1987, 1989, 1991, 1993, 1995, 1997, 2001, 2003, 2005, 2007), Черкесске (1988), Самаре (2006), Старом Осколе (2006). Под руководством автора защищены две кандидатские диссертации.

Публикации. Основные положения работы изложены в 74 публикациях, в т. ч монографии, 12 рецензируемых журналах, учебном пособии, 8 авторских свидетельствах и патентах на изобретения

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 350 страницах в 6 главах, содержит 118 рисунков, 67 таблиц и приложения, список использованных источников включает 409 наименований.

Специально разработанные методы и установки, моделирующие технологические процессы в промышленных печах

Изменение физических свойств материала при нагревании и процессы агломерации материала и набора обмазки во вращающейся печи изучались на установке, приведенной на рис. 1.

Для изучения ***массообмена*** в барабан с навешенными цепями заливался шлам, и в процессе сушки определялись влажность материала и отношение массы материала $m_м$ к массе цепи $m_ц$ (рис 1, а)

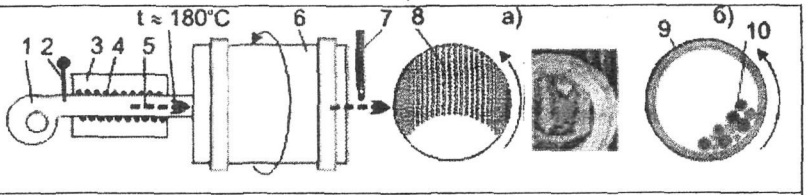

Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения изменения физических свойств шлама (а) и образования гранул и обмазки (б)
1 – вентилятор; 2 – шибер; 3 – муфельный шкаф; 4 – нагреватель; 5 – горячий воздух; 6 – вращающийся барабан; 7 – термометр; 8 – цепи; 9 – обмазка; 10 – гранулы

Исследование процесса ***образования гранул и обмазки*** во вращающемся агрегате проводилось на полом барабане (рис. 1, б). Особенность метода заключается в замене высокотемпературного клинкерного расплава на компонент, который плавился при низкой температуре, имел сопоставимую с клинкерным расплавом вязкость и не вступал во взаимодействие с твердой фазой. Этим требованиям соответствует парафин. Данный способом моделирования защищен авторским свидетельством (а. с. 1742720).

Припекание клинкера к огнеупору и обмазке определялось непосредственно при высоких температурах по удельной силе сцепления **f** на установке (рис. 2) следующим образом.

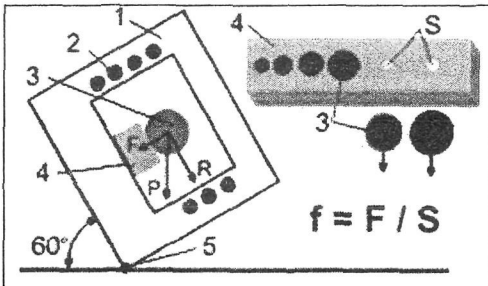

Рис. 2. Установка для определения удельной силы сцепления **f** клинкера с огнеупором и обмазкой при высоких температурах:
1 –печь, 2 – нагреватель, 3 – гранула, 4 –огнеупор (обмазка), 5 – шарнир, S – площадь припекания

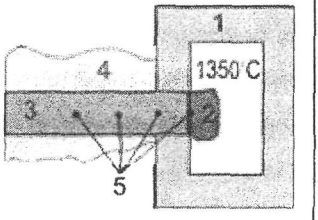

Рис. 3. Установка для определения термического напряжения в огнеупоре при обрушении обмазки: 1 – печь, 2 – обмазка, 3 – огнеупор, 4 – теплоизоляция, 5 – термопары

При горизонтальном расположении печи на огнеупор или обмазку устанавливались гранулы различных размеров После нагрева образцов и выдержки при заданной температуре печь поворачивалась на 60°, крупные гранулы скатывались с огнеупора, а мелкие оставались После охлаждения отрывалась самая крупная гранула и по массе P и площади припекания S рассчитывалась удельная сила сцепления f

Термические напряжения в огнеупоре исследовались при резкой смене температуры после скола предварительно припечённой к нему обмазки (рис 3) Величина напряжения рассчитывалась, исходя из скорости изменения температуры в различных участках огнеупора и коэффициента термического расширения.

Технологические испытания промышленных печей. Применялись известные методики и разработанные кафедрой с участием соискателя специальные методы Для оптимизации режима обжига использовались новые технологические зависимости, позволяющие по температуре корпуса печи в зоне спекания и составу отходящих газов целенаправленно регулировать расход топлива и воздуха, разрежение за обрезом печи, энтальпию вторичного воздуха, наклон и положение топливной форсунки, толщину и протяженность обмазки и другие параметры, характеризующие режим обжига Для исследования скорости движения материала в цепной завесе использовали радиоактивный индикатор La^{140} Усовершенствована методика определения скорости газового потока по участкам цепной завесы в зависимости от количества цепей в сечении

Физико-химические методы исследований. Рентгенофазовый анализ выполнялся на дифрактометре ДРОН-3, комплексный термический – на дериватографе фирмы МОМ, спектральный – на СТЭ-1, химический – на рентгеновском спектрометре СРМ, петрографический – на микроскопе NU-2 фирмы "Karl Zeiss Jena"

Используемые материалы. Сырьевые материалы и шламы на основе мела и известняка, доменных (ДШ) и железосодержащего медеплавильного шлаков (ЖМШ), углеотходов (УО), лигнина; материалы, отобранные по длине печей, огнеупоры и клинкеры различных заводов.

Массообмен и газодинамика в цепных завесах

Значительные затраты топлива на обжиг клинкера вызваны потерями на испарение воды и с отходящими газами на участке цепных теплообменников. Поэтому особое внимание при оптимизации работы печей следует уделять интенсификации процессов именно в этой зоне, которое достигается совершенствованием комплекса теплообменных устройств. Существующие методики расчета и проектирования цепных завес не учитывают изменяющиеся при нагревании физические свойства материала и распределение газового потока по поперечному сечению печи Восполнить этот пробел призван данный раздел работы.

Влияние свойств шлама и добавок на массообмен в цепной завесе. Исследованы шламы различных заводов на основе мела с исходной влажностью $W_{исх}$ = 39–44% и известняка с $W_{исх}$ = 32–42% (табл 1)

Таблица 1

Изменение свойств шлама при сушке и пылеунос (ПУ) из печи

Заводы	$W_{исх}$, %	$m_м$ / $m_ц$, кг/кг	$W_{кр}$, %	$W_{исх} - W_{кр}$, %	$W_{кр} - W_{сб}$, %	ПУ, %
на основе мела						
Осколцемент	39	0,40	33	6	20	20–25
Белгородский	42	0,33	27	15	7	2–5
Мальцовский	44	0,52	36	8	25	15–17
Себряковский	40	0,60	23	17	9	1–3
Кричевский	42	0,32	28	14	16	8–10
на основе известняка						
Искитимский	37	0,40	32	5	21	12–15
Коркинский	38	0,52	27	11	18	8–12
Сухоложский	38	0,40	33	5	21	12–15
Новотроицкий	36	0,32	30	6	16	10–12
Углегорский	34	0,36	26	8	14	12–14
Мордовский	42	0,45	23	19	11	8–10
Ангарский	32	0,50	27	5	10	15–20

Изменение свойств шлама в процессе сушки оценивалось по изменению отношения массы материала на цепи $m_м$ к массе цепи $m_ц$. Зависимость $m_м/m_ц$ от влажности материала носит экстремальный характер (рис. 4).

Влажность, при которой на цепь переходит максимальное количество материала, является критической $W_{кр}$. Как на меловом, так и на известняковом шламе наблюдается различный пылеунос. Так, поведение сырьевых шламов «Осколцемента» («ОЦ») и «Белгородский цемент» («БЦ») при идентичном сырье значительно отличается при нагревании. Для шлама «ОЦ» $W_{кр}$ = 33% и интервал от $W_{исх}$ до $W_{кр}$ равен 6%, тогда как для «БЦ» $W_{кр}$= 27% и $W_{исх}$– $W_{кр}$= 15%, т.е. в 2,5 раза больше. Шлам «ОЦ» при высушивании быстро переходит на цепи, а после $W_{кр}$ происходит постепенное отслаивание мелких частиц с поверхности материала, которые подхватываются газовым потоком и увеличивают пылевынос до 20–25%. Это свидетельствует о том, что данное сырье обладает слабыми когезионными свойствами и повышенной адгезией к цепи. Шлам «БЦ» вследствие повышенного содержания водорастворимых солей, увеличивающих его когезионные свойства, более длительно переходит на цепи и резко сходит с них в виде укрупненных агломератов, которые окатываются в гранулы и снижают пылевынос из печи до 2–5%.

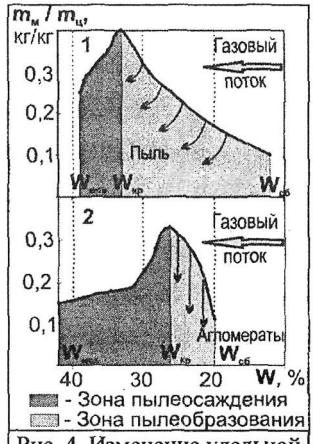

Рис. 4. Изменение удельной массы материала на цепях $m_м$ / $m_ц$ при высушивании старооскольского (1) и белгородского (2) шламов

Процесс сушки шлама можно разделить на два этапа. Первый участок от $W_{исх}$ до $W_{кр}$, на котором цепи покрыты шламом, способен улавливать пыль, и поэтому является ***зоной пылеосаждения*** (на рис. 4 выделен темным цветом). Второй участок после $W_{кр}$, на котором шлам ссыпается с цепей и подхватывается газовым потоком, – ***зоной пылеобразова-***

ния. При малой зоне пылеосаждения и большой зоне пылеобразования (старооскольский, мальцовский, искитимский, сухоложский, ангарский заводы) наблюдается высокий пылевынос из печей (12–25%) При большой зоне пылеосаждения и малой зоне пылеобразования (белгородский, себряковский) пылевынос может быть снижен до 2–5%. Если обе зоны имеют близкую протяженность (кричевский, коркинский), то пылевынос равен промежуточной величине – 8–12%

Введение в шлам шлака и ПАВ увеличивает зону пылеосаждения и уменьшает зону пылеобразования, что приведет к уменьшению пылеуноса Выгорающие добавки (лигнин и углеотходы) увеличивает зону пылеобразования и, следовательно, пылевынос из печи

Таким образом, промышленные результаты о пылевыносе из печи подтверждают достоверность выводов, полученных на модельной установке. Полученные зависимости позволяют научно обосновано проектировать цепные теплообменники с учетом свойств сырья При использовании сырья, склонного к пылеобразованию, предпочтение следует отдавать свободновисящей цепной завесе, а для сырья с хорошей способностью к гранулообразованию – гирляндной завесе.

Газодинамика цепных завес в зависимости от свойств шлама и схемы навески. Цепные завесы по виду теплообмена следует разделить на два участка. На первом участке, где цепи покрыты текучим или вязким материалом, происходит конвективная теплопередача от газового потока к материалу. На втором участке сыпучего материала осуществляется регенеративный теплообмен от газа к цепям – конвекцией, от цепи к материалу – теплопроводностью, Так как на всех участках присутствует конвективный теплообмен, зависящий от критерия Nu и числа Re, то необходимо определить скоростные потоки газов в цепной завесе

Распределение газового потока по вертикальному сечению определялось на промышленной печи 4,5/5×170 м во время стоянки На рис 5 при-

ведены эпюры скоростей в зависимости от плотности навески K_F. Установлено, что скорость газа в подцепном пространстве в 2–3 раза превышает скорость в цепях, причем, чем выше K_F и длина цепи, тем больше эта разница.

Для разработки принципов проектирования теплообменных устройств необходима характеристика газопроницаемости цепного и подцепного пространства в вертикальном сечении печи, для чего были введены новые взаимосвязанные коэффициенты K_c и K_f (рис. 6).

Рис. 5. Распределение газового потока по вертикальному сечению цепной завесы

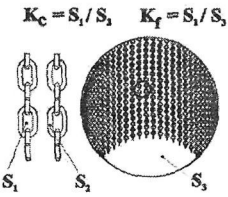

Рис. 6. Схема расчета коэффициентов K_c, K_f

K_c определяется как отношение площади проекции межцепного пространства S_1 к площади проекции цепей S_2 и характеризует газопроницаемость цепной завесы. При увеличении количества материала на цепях K_c уменьшается и повышается сопротивление завесы. Снизить сопротивление цепей можно увеличением шага навески и для сохранения массы цепей в этом случае рекомендуется на один крепеж навешивать две цепи. K_f – это отношение площади проекции межцепного S_1 к площади проекции подцепного пространства S_3 и определяет отношение скоростей газового потока в цепях и подцепном пространстве. При увеличении материала на цепях уменьшается S_1 и K_f и, следовательно, увеличивается разность скоростей газового потока в подцепном и межцепном пространстве.

Согласно уравнения $Q_{кон} = \alpha_{кон} \cdot K_F \cdot F_{фут} \cdot \Delta t$, с увеличением поверхностной плотности цепей K_F конвективный теплообмен $Q_{кон}$ должен увели-

читься, но в связи с тем, что в это же время уменьшаются скорость и количество газа, проходящего через цепи, то снижается коэффициент $\alpha_{кон}$, что приводит к уменьшению $Q_{кон}$ На участке пластичного материала при высоких K_F и $m_м$ / $m_ц$ может произойти полное перекрытие цепного сечения и практически прекратится теплообмен

Таким образом, разработан новый принцип проектирования комплекса теплообменных устройств, учитывающий плотность навески, длины цепи отдельных участков и интенсивность перехода материала в процессе сушки на цепи и схода с них В горячей части цепной завесы повышение слоя материала в подцепном пространстве приводит к увеличению регенеративного теплообмена, но наряду с этим увеличивается и пылевынос за счет возрастания скорости газа Поэтому в горячей части цепной зоны нельзя допускать чрезмерного повышения слоя материала, необходимо перераспределение скорости в цепях и подцепном пространстве за счет регулирования плотности навески.

Физико-химические превращения сырьевой смеси в процессе термообработки при использовании техногенных материалов

Влияние доменного шлака на процессы минералообразования при синтезе низкоосновного клинкера. Применение доменного шлака (ДШ) в качестве сырьевого компонента для синтеза низкоосновного клинкера (НОК) позволит значительно снизить расход топлива на обжиг клинкера, так как при этом уменьшаются содержание карбоната кальция в сырьевой смеси и температура обжига клинкера Низкоосновный клинкер предполагается использовать в смеси с рядовым клинкером для получения высококачественного смешанного цемента

Исследовались 2 пробы шлака Челябинского металлургического комбината, значительно отличающиеся химическим составом (табл 2) В шлаке № 1 – высокое содержание оксидов железа (9,87%) и MgO (17,03%), в шлаке № 2 несколько больше SiO_2 (35,6%) и CaO (34,7%) и

всего 0,74% Fe_2O_3 Силикатный и глиноземистый модули шлака № 1 ~1, а у шлака № 2 n = 2,77, а p = 16,4

Таблица 2

Характеристика шлака

Шлак	Содержание, %							Модули		
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	R_2O	n	p	Mo
№1	20,68	10,07	9 87	27,35	17 03	1,99	2,0	1,04	1,02	1,44
№2	35,6	12,12	0,74	34,70	10,3	2,0	0,6	2,77	16,4	0,94

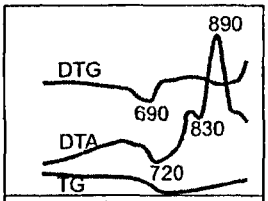

Рис 7 КТА шлака №1

При нагревании шлака № 1 (рис. 7) в интервале 800–1000°С происходит его расстекловывание с выделением тепла и наложением эндоэффекта плавления щелочесодержащих фаз при 830°С. Окисление FeO с выделением тепла начинается только в процессе кристаллизации шлака. Увеличение массы образца на 0,98% при окислении FeO соответствует Fe_2O_3 = 9,74%, следовательно, железо в шлаке №1 находится в Fe^{2+}

При расстекловывании шлаков кристаллизуется мелилит (2,46, 2,86, 3,08, 3,70, 4,23 Å): твердый раствор геленита C_2AS и окерманита C_2MS_2, в шлаке № 1 дополнительно образуется анортит CAS_2 (3,17, 3,26, 3,40, 3,48, 3,90, 4,05 Å), C_2F (2,61, 2,68, 2,714, 2,79 Å) и Fe_2O_3 (2,53, 2,68 Å) (рис 8) Следует подчеркнуть особенности переходных фазовых процессов, протекающих при нагревании шлака № 2 в интервале 840–1200°С (табл 3)

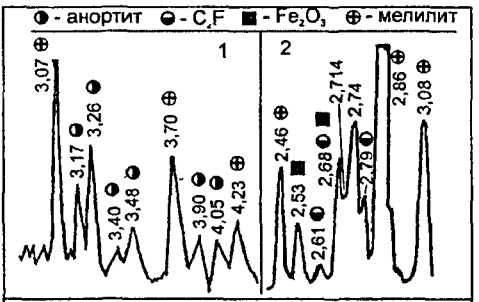

Рис 8. Фрагменты рентгенограмм шлака № 1, охлажденного от 950 и 1200°С

Сначала при 840–1000°С формируется мелилит (71,6%), состоящий из 32,5% геленита и 39,1% окерманита Выше 1000°С выкристаллизовывается диопсид CMS_2 (~20%), который в интервале 1100–1200°С внедряется в

мелилит, образуя твердый раствор нестехиометрического состава

Таблица 3

Расчетный состав шлака № 2 и распределение оксидов по фазам

Минералы			Оксидный состав, %			
наименование	состав	содержание, %	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
температура 840–1100°C						
Геленит	C_2AS	32,5	7,1	12,1	13,3	0
Окерманит	C_2MS_2	39,1	17,2	0	16,1	5,8
Мелилит	тв раствор	*71,6*	*24,3*	*12,1*	*29,4*	*5,8*
Диопсид	CMS_2	20,4	11,3	0	5,3	3,8
температура 1200–1300°C						
Мелилит	тв раствор	*92,0*	*35,6*	*12,1*	*34,7*	*9,6*

Прочие оксиды MgO = 0,7%, Fe_2O_3 = 0,7%, SO_3 = 0,7%, R_2O = 0,6%

На рентгенограмме закристаллизованного при 1200°C шлака № 2 проявляются дифракционные отражения только одной фазы – мелилита (рис 9), расчетное содержание которого составляет 92% При этом оставшиеся оксиды MgO, Fe_2O_3, SO_3, R_2O и др , концентрация которых менее 3%, могут также внедряться в кристаллическую решетку мелилита. Последующий нагрев шлаков приводит к их плавлению при 1240°C

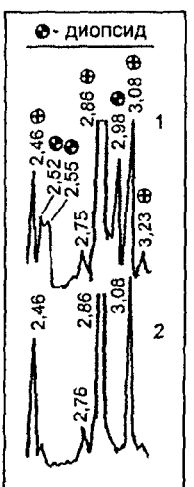

Рис 9 Фрагменты РФА шлака № 2, охлажденного от 1100 (1) и 1200°C (2)

Естественно, что установленные значительные фазовые превращения кристаллизация и окисление вещества с выделением тепла, перестройки кристаллических решеток, плавление материала будут интенсифицировать физико-химические процессы клинкерообразования в шлакосодержащих смесях (ШСС) вследствие проявления эффекта Хедвалла и присутствия жидкой фазы

Для исследования процессов клинкерообразования было приготовлено 11 смесей на основе рядовых шламов с **КН** = 0,92, **n** = 2,07, **p** = 1,12 с введением 5–30% шлака № 1 и 0–20% шлака № 2 Максимальное содержание ДШ в смесях ограничивалось **КН** = 0,67 При введении шлака

№ 1 понижается n с 1,96 до 1,55, и увеличивается расчетное содержание C_4AF с 13,9 до 18,9%, а при использовании шлака № 2 возрастают p с 1,03 до 1,57 и количество C_3A – с 5,4 до 10,6% Одновременно с увеличением доли шлака в смесях увеличивается расчетная сумма минералов плавней в клинкерах на 2,5–5,8%. Экспериментально это подтверждается большей величиной эффектов плавления при 1240 и 1270°С и кристаллизации расплава – при 1230°С на кривых ДТА смеси с КН=0,67 (рис 10).

Особенности физико-химических процессов клинкерообразования в ШСС выявлялись в сравнении с минералообразованием в рядовых смесях с **КН** = 0,90 характерными для шихты с крупнокристаллическим карбонатным компонентом с двумя экзоэффектами при 1160 и 1240°С, обусловленными образованием геленита и белита Выше 1250°С алюминаты кальция, согласно РФА, представлены C_3A в соответствии с расчетным количеством Полное усвоение извести происходит при 1450°С

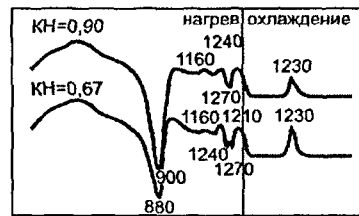

Рис 10 ДТА сырьевых смесей

При обжиге ШСС с **КН** = 0,8, полученной на основе ДШ № 1 с высоким содержанием MgO и Fe_2O_3, в области 900–1200°С формируются C_2S, мелилит, C_6AF_2 и возможно C_2F Алюминаты кальция до 1250°С в основном представлены $C_{12}A_7$. При 1300°С на рентгенограммах отсутствуют пики алюминатов кальция и C_2F, увеличиваются пики C_6A_2F, что свидетельствует о протекании реакции $2C_{12}A_7 + 7C_2F + 4CaO = 7C_6A_2F$ С увеличением температуры обжига до 1350°С наблюдается полное усвоение CaO, а минералы плавни представлены алюмоферритом кальция состава C_6A_2F. На рентгенограммах отсутствуют отражения алюминатов кальция, несмотря на расчётное содержание C_3A = 8,5%. В смесях, полученных при использовании шлака № 2 с содержанием Fe_2O_3 < 1%, физико-химические процессы в значительной степени протекают идентично. К 1200°С в ШСС

с КН = 0,67 кроме C_2S (2,7; 2,76 Å), $C_{12}A_7$ (2,67 Å), C_6AF_2 (2,65 Å), C_4AF (2,64 Å) образуется исключительно большое количество мелилита (пик 2,85 Å, рис. 11), который и определяет дополнительный эндоэффект плавления шлака при 1240°С на кривых ДТА (рис. 10) Полное усвоение CaO в ШСС с КН = 0,67 происходит уже при 1300°С, и образуется C_6A_2F по реакции $C_{12}A_7 + 2CaO + 7C_4AF \rightarrow 7C_6A_2F$ При расчетном значении C_3A=10,6% его отражения на рентгенограмме не обнаруживаются.

Низкоосновные клинкера отличаются мелкокристаллической структурой. При среднем размере алита в рядовом клинкере 30–40 мкм и белита 25–40 мкм в НОК размер алита и белита значительно меньше и составляет соответственно 5–10 мкм и 10–15 мкм. Это обусловлено, прежде всего, низкой температурой синтеза. НОК отличаются зональным расположением кристаллов алита и белита в поле аншлифа, промежуточное вещество представлено алюмоферритной фазой.

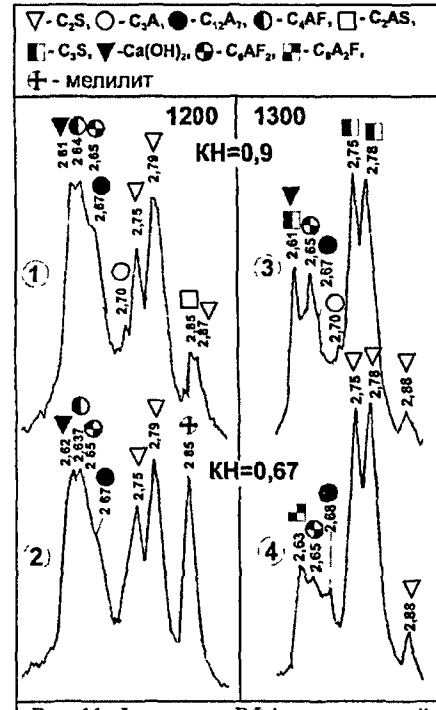

Рис 11 Фрагменты РФА спеков смесей с КН = 0,9 (1, 3) и КН = 0,67 (2, 4)

На основе промышленного клинкера с активностью 54,7 МПа и НОК были приготовлены смешанные двухкомпонентные цементы. Установлено, что введение 20% НОК с $R_{сж}$ = 37,4 – 30,4 МПа не снизило его гидравлической прочности (табл 4) Даже при добавлении 30% НОК прочность смешанных цементов выше 50 МПа. Высокая прочность смешанных цементов обусловлена высокой скоростью гидратации мелкокри-

сталлического алита НОК и последующего каталитического воздействия продуктов гидратации на диспергацию частиц цемента, увеличивая тем самым количество центров кристаллизации гидратных фаз, что и обеспечивает высокую прочность цемента

Таблица 4

Прочность НОК и смешанных двухклинкерных цементов, МПа, в 28 суток

Содержание НОК, %	КН низкоосновного клинкера		
	0,8	**0,76**	**0,72**
100	37,4	30,4	28,9
20	55,4	54,2	50,4
30	53,9	50,9	–

Теоретическое обоснование возможности подачи углеотходов в сырьевой шлам. В настоящее время в стране в отвалах находятся миллионы тонн углеотходов (УО), которые могут быть использованы как заменитель технологического высококалорийного топлива. Одним из эффективных способов его использования при обжиге клинкера является подача углеотходов в сырьевой шлам Однако широкого распространения данный способ пока не получил, что в значительной степени связано с отсутствием теоретического обоснования и научной базы о процессах выгорания горючей добавки из материала во вращающейся печи.

Для обоснования этого способа были выполнены расчеты и исследования с решением следующих задач обеспечение полного выгорания введенной в шлам горючей добавки; поддержание необходимой температуры и теплообмена в факельном пространстве при вынужденном значительном избытке воздуха, определение предельно возможной концентрации выгорающей добавки в шламе в зависимости от технологических параметров работы вращающейся печи.

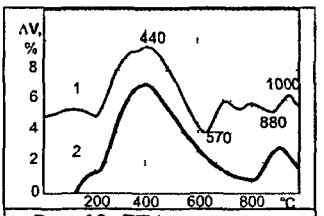

Рис. 12 ДТА углеотхода (1) и выход летучих из угля при нагревании (2)

Термический анализ и литературные данные свидетельствуют, что выход летучих из бурых углей практически начинается от 100°С и наиболее интенсивно выделяются в интер-

вале 250–600°С (рис. 12). При этих же температурах наблюдается окисление топлива. Однако, необходимая скорость горения достигается только выше 700°С.

Во вращающихся печах мокрого способа температура газа в зоне подогрева, по крайней мере, на 750°С выше температуры материала и, следовательно, возгоняемые при 100–400°С летучие попадают в среду с температурой 850–1150°С, где при наличии кислорода происходит их быстрое выгорание. В связи с этим возникает необходимость сжигания топлива в зоне спекания с большим избытком воздуха – α.

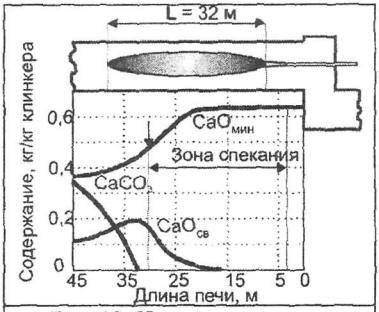

Рис. 13. Изменение состава материала в факельном пространстве печи: $CaO_{мин}$ – CaO в клинкерных минералах

Расчетные и экспериментальные данные для печи 4,5/5×170 м, с учетом состояния материала (рис. 13), свидетельствуют, что максимальная теплопередача от газа к материалу в пламенном пространстве должна составлять 1100 кДж/кг клинкера и снижаться пропорционально теплоте сгорания введенной добавки. При неизменной производительности 56 т/ч удельную теплопередачу в зоне спекания необходимо поддерживать на уровне $Q_м$= 100 кВт/м^2.

Теплообмен определяется температурой факела и длиной зоны спекания, которые в свою очередь зависят от концентрации введенной в шлам горючей составляющей, КПД холодильника и α. Взаимосвязи указанных параметров приведены на рис. 14 и свидетельствуют, что когда теплопотери с клинкером $q_{кл}$ составляют 200 кДж/кг, предельно допустимая концентрация выгорающей добавки в шламе должна быть не более 3,8%, а температура факела – не ниже 1680°С при α = 1,5 (точка А). В случае ухудшения работы холодильника, например, при увеличении $q_{кл}$ с 200 до 600 кДж/кг необходимый $Q_м$ = 100 кВт/м^2 можно обеспечить при $\alpha \leq 1{,}28$

и ввести лишь 2% выгорающей добавки (точка В). Снижение КПД холодильника ниже 0,6 практически исключает возможность введения выгорающей добавки в шлам при неизменной производительности печи.

Если при уменьшении КПД холодильника оставить постоянными абсолютный расход тепла и тепловую мощность печи и, следовательно, пропорционально снизить производительность печи и $Q_м$, то возможность введения добавки определится наклонной прямой – $Q'_м$. В этих условиях, даже при $q_{кл}$ = 800 кДж/кг (КПД = 0,5), сохраняется возможность введения до 1% добавки (точка С), и требуемый теплообмен достигается при $t_ф$ = 1640°С. Так как $q_{кл}$ на печах с колосниковыми холодильниками обычно составляет не более 300 кДж/ кг клинкера, то можно с уверенностью вводить до 3,5 % выгорающей добавки с углеотходами, что позволит сэкономить до 25% форсуночного топлива на обжиг клинкера.

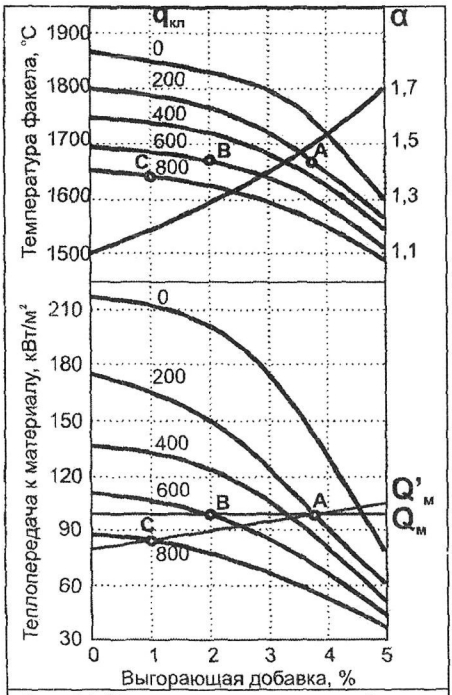

Рис. 14. Изменение температуры факела и теплообмена в зоне спекания $Q_м$ в зависимости от концентрации выгорающей добавки в шламе, теплопотерь с клинкером $q_{кл}$ и коэффициента избытка воздуха α

Влияние углеотходов и медеплавильного шлака на процессы минералообразования. Особенности физико-химических превращений исследовались на сырьевой смеси ОАО "Уралцемент", с различными отходами (табл. 5). Изучению подвергались известняк, кондиционная (№ 1) и отвальная высококремнеземистая (№ 2) глины, огарки, 15 проб углеотходов

(УО) Коркинского комбината с содержанием 20–25% горючих веществ

Таблица 5

Химический состав сырьевых компонентов, %

Компоненты	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	R_2O	ппп	прочие
Известняк	1,4	0,4	0,7	52,8	1,5	0,2	0,1	42,3	0,5
Глина №1	58,3	14,3	8,9	2,6	1,4	0,2	2,2	10,7	1,4
Глина №2	81,0	7,4	2,1	1,4	0,1	0,2	1,7	4,9	1,0
Огарки	14,7	3,4	70,3	2,8	3,8	2,1	0,7	0,6	1,3
УО	44,9	16,2	6,7	3,5	1,3	1,2	2,2	22,9	0,9
ЖМШ	28,6	6,1	44,8	8,9	4,7	1,8	1,3	0	3,5

Минеральная часть УО представлена кварцем, монтмориллонитом, каолинитом, в небольшом количестве $CaCO_3$, $FeCO_3$, K_2SO_4 и микроэлементами Ti, Ni, Cu, Zn, Mn, Cr и др Известняк содержит до 94% $CaCO_3$ Глины представлены кварцем, каолинитом, полевым шпатом, а глина № 2 – дополнительно гидрослюдой и K_2SO_4. Результаты расчетов 24 смесей свидетельствуют, что оптимальная шихта с КН = 0,92–0,93, n = 1,9–2,1, p = 1,3–1,5 и содержанием УО от 11,4 до 18,8% (или 2,3–3,8% горючей массы) обеспечивается при использовании кондиционной и высококремнеземистой глин в отношении 3 1 Учитывая, что в отвал вывозилось около 25% глины № 2, то с применением УО она может полностью использоваться Состав смесей с содержанием УО 3,3 и 11,4% приведен в табл 6.

Таблица 6

Влияние компонентного состава смесей на активность клинкера

Смеси	Содержание в сырье, %				Предел прочности на сжатие, МПа	
	УО	Глина №1:№3	ЖМШ	Огарки	3 суток	28 суток
1	0	1 0	0	0,9	24,3	52,2
2	3,3	1 0	0	0,9	–	–
3	11,4	3 1	0	0,9	26,2	52,1
4	0	1 0	1,5	0	28,8	55,4
5	11,4	3 1	1,5	0	30,2	58,6

В виду дефицита пиритных огарков исследовалась возможность использования железосодержащих шлаков Карабашского медеплавильного комбината (ЖМШ). Ранее НИИЦементом были успешно проведены промышленные испытания по применению шлаков на Коркинском заводе.

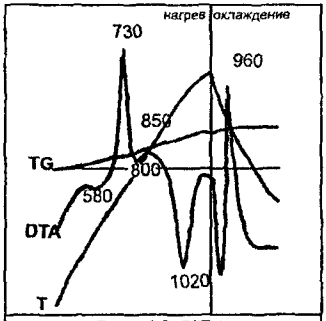

Рис 15 КТА медеплавильного шлака

Однако с совершенствованием технологии производства на комбинате изменился химический и фазовый составы шлаков, поэтому необходимо было провести дополнительные исследования Медеплавильный шлак содержит 44,8% оксидов железа и представлен стекловидной фазой На ДТА экзоэффект при 730°С обусловлен кристаллизацией стекла с последующим плавлением при 1020°С (рис. 15) Начиная с 400°С, происходит постепенное увеличение массы образца, обусловленное окисление двухвалентной железистой фазы шлака При расстекловывании шлака кристаллизуется авгит состава (Ca, Fe, Mg)Si_2O_3, который при дальнейшем нагревании в результате окисления Fe^{2+} разлагается с выделением SiO_2 и Fe_2O_3 В ЖМШ содержится более 3% каталитических элементов (Zn, Cu, Pb) Для исследований были приготовлены 2 смеси с ЖМШ (№ 4) и совместно с 11,4% УО (№5).

На основе комплекса физико-химических исследований установлены следующие особенности процессов клинкерообразования. Горючая составляющая УО интенсивно окисляется с выделением тепла в интервале 400–600°С, что подтверждается значительным экзоэффектом на кривой ДТА сырьевой смеси № 3 (рис. 16) Диссоциация $CaCO_3$ при этом протекает при пониженной температуре – 870°С, и более четко проявляются экзоэффекты образования промежуточных фаз и C_2S при 1170 и 1200°С, что является характерным для смесей на основе крупнокристаллического известняка и малопластичных алюмосиликатов Повышенная реакционная способность смесей № 2 и № 3 с УО подтверждается высокой скоростью усвоения

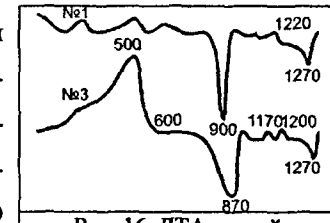

Рис 16. ДТА смесей №1-контрольной и №3-с УО

CaO при 1250 и 1350°С (рис 17) Так, при 1350°С количество $CaO_{св}$ в смеси № 3 в 2,4 раза меньше, чем в контрольной № 1 и равно соответственно 3,1 и 7,48% Дополнительная интенсификация процессов выше 1100°С происходит при совместном введении в шихту УО и ЖМШ (кривая 5) Медеплавильный шлак улучшает реакционную способность смеси не только из-за наличия каталитических примесей, раннего появления расплава и снижения вязкости жидкой фазы, но и в результате фазовых превращений (кристаллизации стекла, окисления FeO и присутствия 8,9% некарбонатной извести)

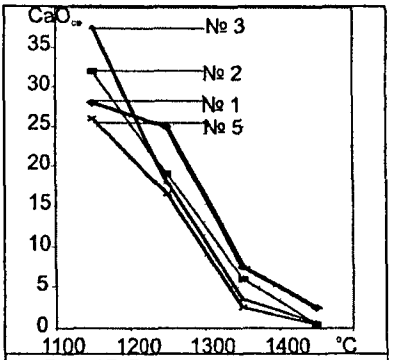

Рис 17 Влияние техногенных материалов на усвоение CaO при обжиге смесей № 1–5

С использованием УО и ЖМШ в клинкере увеличивается с 5,8 до 7,6% расчетное содержание C_3A, увеличивается интенсивность дифракционных отражений C_3S. Петрографический анализ свидетельствует об уменьшении средних размеров кристаллов алита с 60 до 40 мкм и повышении пористости клинкера. Данные фазовые и структурные изменения привели к увеличению прочности цемента № 5 на сжатие в возрасте 3-х суток с 24,3 до 30,2 МПа, а в 28 суток – с 52,2 до 58,6 МПа (табл. 6)

Таким образом, при совместном применении УО, ЖМШ и отвальных глин обеспечивается ресурсосбережение и экологический эффект.

Процессы агломерации материала и образования обмазки и колец во вращающейся печи

Одной из проблем эксплуатации современных вращающихся печей является плохое агрегирование материала в зоне спекания, так называемое клинкерное пыление. Поэтому изучение этого процесса имеет большое значение. Исследования процесса ***формирования гранул*** на разработанной установке (рис. 1, б) проводились на материале с $S_{уд}$ от 100 до 400

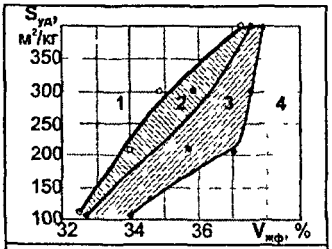

Рис 18 Области негранулируемости (1), образования гранул размером 1–10 (2), 10–18 (3) и более 20 мм (4)

м²/кг, близкой к поверхности кристаллов C_3S и C_2S в клинкерах и, следовательно, модулирующие процессы агломерации в зоне спекания вращающейся печи. Проведенные эксперименты позволили получить следующие зависимости (рис 18). Гранулируемость материала определяется двумя параметрами: количеством расплава и дисперсностью твердой фазы – с увеличением дисперсности твердой составляющей $S_{уд}$ возрастает требуемое количество жидкой фазы $V_{жф}$. Так, при $S_{уд}$ = 100 м²/кг гранулы, размером 10–12 мм, формируются при $V_{жф}$ = 32,5%, при $S_{уд}$= 300 м²/кг только при $V_{жф}$ = 36%, а при $S_{уд}$= 400 м²/кг требуется уже 39% жидкой фазы Полученные зависимости представлены на графике· в области 1 гранулы не образуются, области 2 и 3 характеризуются устойчивым образованием гранул 1–18 мм, а в области 4 гранул формируются размером более 20 мм. Диапазон изменения количества жидкой фазы для получения гранул размером от 1 до 20 мм наибольший в интервале удельной поверхности от 200 до 300 м²/кг. Причём, обеспечение оптимальной гранулометрии возможно при содержании количества жидкой фазы более 30 объемных процентов.

Эти результаты позволяют объяснить ***механизм клинкерного пыления***. Известно, что клинкерное пыление возникает при удалении зоны спекания от горячего обреза печи. Рассмотрим процесс агрегирования клинкера при удалённой и приближённой зоне спекания Клинкерная гранула, попадая в холодильник, испытывает значительные термические

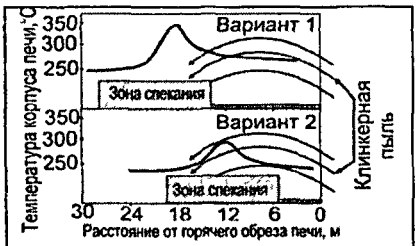

Рис 19 Область присадки клинкерной пыли

напряжения, достигая своего максимума в поверхностном слое. В результате этого происходит отслаивание множества мелких частиц, которые подхватываются потоком воздуха и вносятся в печь. При удалённой зоне спекания (рис 19, вариант 1), пыль из холодильника присаживается к материалу после завершения процесса минералообразования, следовательно, количество жидкой фазы будет соответствовать равновесному состоянию и составлять ~ 20–24 %. При этом, как установлено на модельной установке, материал не гранулируется, и содержание циркулирующих мелких частиц между печью и холодильником будет возрастать. При близком расположении зоны спекания (вариант 2) пыль из холодильника присаживается к материалу до завершения процесса минералообразования, и количество жидкой фазы, согласно данным В Н Юнга, может превышать равновесное в 1,5–2 раза и, следовательно, составлять более 30% Поэтому пыль будет участвовать в процессе агрегирования, и развитие клинкерного пыления прекратится

Таким образом, с использованием модельной установки уточнен механизм клинкерного пыления Для устранения клинкерного пыления необходимо приближать зоны спекания, обеспечивая положение максимальной температуры корпуса печи на 9–12 м от горячего обреза

Важнейшим эксплуатационным показателем является ***стойкость футеровки в зоне спекания***, которая в значительной степени определяется условиями ***создания устойчивой обмазки*** на огнеупоре в печи Эксперименты, проведенные с использованием модельной установки (рис 1, б), позволили исследовать ***процесс формирования обмазки*** на

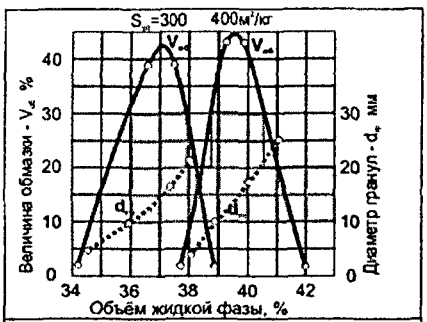

Рис 20 Взаимосвязь между способностью материала к образованию обмазки $V_{об}$ и размерами гранул $d_{гр}$

корпусе вращающегося барабана и установить важнейшую взаимосвязь с ***процессом образования гранул*** Набор обмазки носит экстремальный характер и зависит от количества жидкой фазы и удельной поверхности твердой составляющей (рис 20) При $S_{уд}$ = 300 м^2/кг максимальная обмазка создаётся при $V_{жф}$= 36–38%, а при $S_{уд}$ = 400 м^2/кг – при $V_{жф}$= 38,8–40,5%. Причём, независимо от условий формирования обмазки проявляется определённая закономерность: максимальная обмазка образуется при условиях, когда размер гранул находится в пределах 10-20 мм (на рис. 20 выделено серым цветом). Дальнейшее увеличение объёма жидкой фазы приводит к увеличению размера гранул и уменьшению толщины обмазки. Таким образом, размер гранул является объективным показателем состояния обмазки в печи, для ее сохранения необходимо корректировать температуру в зоне спекания, обеспечивая размер гранул в пределах 10–20 мм

Стойкость футеровки в зоне спекания в значительной степени определяется условиями набирания обмазки в процессе розжига печи При этом большое значение имеет образование первичного контакта между огнеупором и клинкером Одной из характеристик, определяющих способность к образованию обмазки, является припекание, которое оценивается по силе сцепления F контактирующих материалов (рис 2).

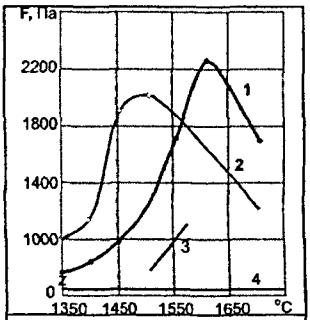

Рис 21 Изменение силы сцепления при нагревании клинкеров БЦЗ (1) и ЧИЦЗ (2) к огнеупору, к обмазке (3) и шамоту (4)

Сила сцепления клинкера с огнеупором, определенная непосредственно при высоких температурах, свидетельствуют, что при образовании первичного слоя обмазки зависимость F от температуры носит экстремальный характер (рис. 21) Максимальное значение F для белгородского клинкера 1 (БЦЗ) наблюдается в температурном интервале 1580–1680°С, а для

чечено-ингушского – 2 (ЧИЦЗ) максимум F приходится на 1450–1550°С. Для клинкера 1 характерен плавный подъем силы сцепления, при этом достигается более высокая величина F ~ 2300 Па. Припекание клинкера 2 происходит значительно быстрее и с меньшей F ~ 2000 Па. Это обусловлено составом сырья. В шламе БЦЗ содержание MgO = 0,66%, SO_3 = 0,6%, R_2O= 0,6%, а в шламе ЧИЦЗ их концентрация увеличена и составляет – 2,4%; 0,6%, 1,1% соответственно Отличие в характере силы сцепления позволяет объяснить особенности набора обмазки На БЦЗ набор обмазки после розжига происходит в течение 2–3 суток, на ЧИЦЗ хорошую обмазку можно набрать в течение смены Для БЦЗ характерный размер гранул клинкера 5–15 мм, тогда как на ЧИЦЗ при незначительном повышении температуры возможно образование агломератов до 40–100 мм с одновременным сходом обмазки Полученные экспериментальные данные на модельной установке позволили реализовать теоретически обоснованный режим обжига клинкер на печах этих заводов, способствующий высокой стойкости футеровки На сырье БЦЗ следует осуществлять спекание при повышенных температурах, не допуская недожога клинкер, тогда как на ЧИЦЗ, напротив, следует придерживаться умеренной температуры спекания, не допуская перегрева клинкера.

Припекание клинкера к обмазке характеризуется меньшей величиной силы сцепления, а к шамотному огнеупору практически отсутствует (рис 21; 3, 4). Следовательно, в процессе розжига ни в коем случае нельзя допускать покрытия магнезиальной футеровки шамотсодержащим расплавом, который может возникнуть из оставшегося в печи шамотного огнеупора. Аналогичное отрицательное воздействие на контактное взаимодействие клинкера с огнеупором оказывает попадание пиритных огарок Припекание клинкера к огнеупору происходит лишь после того, как огнеупор очистится от попадания легкоплавких материалов.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет целенаправленно

управлять формированием и сохранением устойчивой обмазки в зоне спекания и выдать рекомендации по оптимизации этого процесса в зависимости от свойств сырья, в результате чего значительно увеличилась стойкость футеровки на печах многих заводов

Хорошо сформированная обмазка обеспечивает сохранность огнеупорной футеровки в процессе работы печи. При обрушении обмазки, в огнеупоре возникают ***термические напряжения***, которые могут привести к его разрушению Величина этих напряжений с использованием созданной установки (рис. 3) определялись на образце из огнеупора марки ПХЦ с заранее припеченной обмазкой, толщиной 25 мм, и установленными термопарами на глубине 5, 57,5, 115 мм от горячей поверхности (рис. 22). Образец нагревался до стабилизации температур, которые были на поверхности обмазки 1360°С и в точках 2 – 550°С, 3 – 350°С, 4 – 250°С Затем производился скол обмазки, в результате которого происходил интенсивный разогрев огнеупора, достигавший 100°С/мин в точке 2. Расчёты показали, что в этих условиях наибольшие напряжения возникают на глубине 2–3 см от поверхности образца, которые могут приводить к сколу этой части кирпича Действительно, анализ работы промышленных печей подтвердил возможность таких явлений, которые являются одной из причин снижения стойкости футеровки Поэтому необходимо стремиться к созданию устойчивой обмазки и стабилизации режима обжига, предотвращающего ее обрушение.

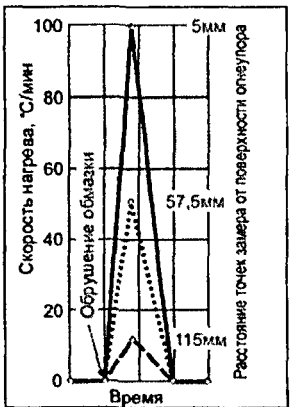

Рис 22 Интенсивность термического удара при обрушении обмазки

Отрицательным воздействием на устойчивость обмазки являлась смена вида топлива с газообразного на жидкое и наоборот. Такие переходы приводили к перестройке зоны сжигания топлива и зачастую к обруше-

нию обмазки Для предотвращения отрицательных воздействий, связанных с переходом с одного вида топлива на другой, была предложено и разработано комбинированное топливоподающее устройство, позволяющее совместно сжигать газообразное и жидкое топливо (а с 1132109 и 1195137).

Термические напряжения при разогреве футеровки возникают в огнеупорной кладке Для уменьшения негативного воздействия термических напряжений в настоящее время используются металлические пластины, которые в свою очередь ввиду высокой температуры плавления не оказывают достаточной компенсации термических нагрузок в кладке Для снижения отрицательного воздействия термических напряжений разработан неметаллический термокомпенсатор, который позволяет при удержании холодной части огнеупора расширятся в горячей части огнеупора с меньшими термическими нагрузками (а с 1645249)

Образование и устойчивость обмазки зависят от химического состава сырья, вида огнеупора и топлива, распределения температуры в зоне спекания и подготовительных зонах В связи с ограниченной возможностью по изменению химического состава используемых материалов основное внимание было уделено изучению ***влияния технологических факторов на процесс формирования обмазки*** Важнейшее значение при этом имеет форма факела Интенсивный теплообмен в факельном пространстве согласно уравнению Стефана-Больцмана $Q = k \cdot \varepsilon \cdot T^4$ можно обеспечить повышением температуры (T) и степени черноты (ε) факела. Однако на практике рациональней формировать факел с умеренной T и повышенной ε, так как при коротком высокотемпературном факеле происходит местный перегрев и прожог футеровки на коротком участке. Оптимальное сжигание топлива достигается регулированием скорости вылета потока из форсунки, коэффициентом избытка воздуха, температурой вторичного воздуха, положением горелки и завихряющих лопаток в ней

Контроль за процессом горения топлива следует осуществлять по температуре корпуса печи в зоне спекания, составу отходящих газов и температуре вторичного воздуха Внедрение способа оптимального сжигания топлива с использованием вышеприведённых методов регулирования, а также путём модернизации горелок (пат. 2145946), холодильников (пат. 2187043) и рационального способа возврата пыли в печь были обеспечены устойчивая обмазка на огнеупоре, высокая стойкость футеровки и экономия топлива на печах многих заводов России и стран СНГ.

Материально-клинкерные кольца, возникающие в начале зоны спекания, отрицательно влияют на работу печи, так как увеличивают газодинамическое сопротивление, приводят к изменению слоя материала в зоне спекания, обрушению обмазки, сколу кирпича и выпуску брака Поэтому необходимо изучить механизм их образования и способы предотвращения Химический анализ и РФА свидетельствуют, что процессы клинкерообразования в кольце не завершены, так как содержат до 10% свободной $CaO_{св}$ и кроме белита (2,78, 2,73; 2,61; 2,44 Å) значительное количество C_2AS (2,86; 1,76 Å), CA (2,99; 2,95; 2,53 Å) и $CaO_{св}$ (2,40 Å) (рис. 23) В то же время кольцо имеет высокую прочность, иногда выше, чем основная обмазка в зоне спекания, что свидетельствует о большом количестве расплава при его формировании Это обусловлено тем, что при высокой скорости движения материала тепловые процессы опережают химические реакции, и компоненты шихты, быстро нагреваясь до 1200°С, могут состоять из значительного количества низкоосновных минералов, образующих по данным В Н. Юнга до 50% низкотемпературного расплава. Так, например, в системе $CaAl_2Si_2O_8 – SiO_2 – \alpha\text{-}CaSiO_3$ эвтектический расплав возникает при температуре 1170°С В последующем, насыщаясь оксидом кальция, по схеме $CaAl_2Si_2O_8 – SiO_2 – \alpha\text{-}CaSiO_3 + CaO \rightarrow C_2S – C_3A – C_3S$, повышается основность расплава с увеличением эвтектической точкой до 1338°С для системы $C_3S – C_2S – C_3A – C_4AF$

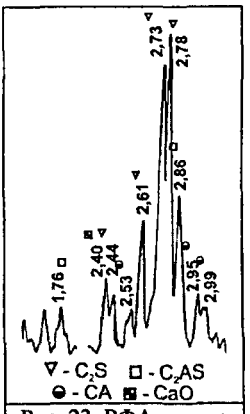

Рис 23 РФА кольца

Следовательно, после насыщения промежуточных фаз известью система переходит в высокотемпературную область, что приводит к кристаллизации минералов и отвердеванию кольца. Возникнув на начальной стадии, кольцо интенсивно саморазвивается, т к увеличивается разность температур поверхности кольца и материала за ним Поэтому для предотвращения кольца следует не допускать высокой скорости нагрева неподготовленного материала в начале зоны спекания, что достигается совершенствованием теплообменных устройств и рациональным сжиганием топлива с удлинённым факелом. Данный режим с положительным результатом внедрен на многих печах стран СНГ

Внедрение результатов исследований в производство

Разработка и внедрение комплекса теплообменных устройств. Анализ комплекса теплообменных устройств печей многих заводов показал, что схемы навески были разработаны без учета особенностей поведения шлама при его высушивании в цепном теплообменнике Достаточно часто зона критической влажности с максимальным количеством материала на цепях приходилась на участок с высоким коэффициентом плотности, что приводило к снижению скорости продвижения материала, увеличению газодинамического сопротивлению, снижению теплообмена и даже переливу шлама в пыльную камеру. В зоне сыпучего материала низкая плотность навески уменьшало регенеративного теплообмена, а высокая – вызывала увеличение пылеуноса В связи с этим совершенствование существующих и проектирование новых теплообменных устройств проводилось нами с учётом физических свойств шламов, полученных на модельной установке (рис. 1, а) За 20 лет постоянного сотрудничества с цементной промышленностью стран СНГ произведено совершенствование

цепных завес на 30 печах различных заводов В качестве примера ниже приводятся конкретные проекты, реализованные на двух заводах печах 4,5/5×170 м Искитимского и 2,7×47,5 м Углегорского.

Исследование ***искитимского шлама*** на модельной установке показало, что он характеризуется быстрым набором материала и постепенным сходом его с цепей, следовательно, материал не способен к грануляции. Поэтому необходимо было заменить гирляндную на свободновисящую завесу по 4-х заходному винту, имеющую более низкое газодинамическое сопротивление и возможность в широких пределах менять коэффициент плотности за счет изменения длины и вида используемых цепей, угла наклона винтовой линии и порядка навески На первом участке был установить мокрый фильтр с высокой плотностью, так как при исходной $W_{ис} = 37\%$ отношение $m_м/m_ц$ равно всего **0,06** кг/кг. В зоне критической влажности, $W_{ис} = 32\%$, $m_м/m_ц = 0,4$ кг/кг, поэтому на длине 12 м должна быть низкая плотность $K_F = 3,7$ м^2/м^2. Причем навеска осуществлялась круглозвенными утяжеленными цепями ЦКН, обладающими высокой очищающей способностью Для увеличения транспортирующей функции цепей был уменьшен угол наклона винтовой линии навески до 50°. Затем для интенсификации теплообмена плотность навески на длине 12 м увеличили до $K_F = 5,3$ м^2/м^2. После цепной завесы на длине 9,8 м установлен ковриковый теплообменник с плотностью 3,6 м^2/м^2 и для предохранения его от выгорания две шторки через 1,4 м из жаростойких цепей ЦОЖ Общая длина теплообменных устройств увеличена с 36 до 46,6 м, а масса цепей – с 130 до 145 т Внедрение нового комплекса теплообменных устройств позволило снизились температура отходящих газов с 250 до 190°С и пылевынос в два раза. Удельный расход условного топлива уменьшился на 20 кг/т клинкера. Экономический эффект составил 6,85 млн рублей в год

Для шлама Углегорского завода характерна короткая зона пылеулавливания, поэтому было рекомендовано установить мокрый фильтр минимальной длины, 0,5 м, максимальное количество материала на цепях составляет 0,36 кг/кг, поэтому на втором участке была выбрана плотность навески K_F = 4,5 м^2/м^2 и навешены также круглозвенные цепи ЦКН На третьем участке в связи с относительно длинной зоной пылеобразования принимался K_F=6,1 м^2/м^2 В горячей части цепного теплообменника для увеличения регенеративного теплообмена плотность навески цепей была повышена до K_F = 8,1 м^2/м^2. Внедрение цепного теплообменника и горелки ДВГ-М позволило снизить температуру отходящих газов с 270 до 215°С, удельный расход условного топлива на 5 кг/т клинкера и пылевынос на 18–20% Годовой экономический эффект составил 1,6 млн рублей

Эффективность использования техногенных материалов. Применение техногенных материалов в качестве сырьевых компонентов требует существенной перестройки процесса сжигания топлива во вращающихся печах При использовании углеотходов (УО) необходимо в пламенном пространстве иметь большой избыток воздуха и высокий КПД холодильника. В случае применения доменных шлаков (ДШ) повышается количество жидкой фазы в обжигаемом клинкере, что требует более прецизионной регулировки факела Для этого была усовершенствована газовая горелка ДВГ-М (патент 2187043), позволяющая обеспечить раннее воспламенение и полное сжигание газа при скорости вылета 180–220 м/с и высокую степень черноты факела, повышающую теплообмен в зоне спекания и предотвращающую перегрев футеровки на коротком участке Также модернизирован колосниковый холодильник (патент 2145946), что обеспечило повышение энтальпии вторичного воздуха с 800 до 1000 кДж/кг и теплового КПД от 0,7 до 0,9.

Использование углеотходов в составе сырьевой смеси в количестве 2,2% по горючей массе позволили повысить производительность сырье-

вой мельницы с 68 до 73 т/ч, снизить расхода электроэнергии с 23,6 до 21,4 кВт·ч/т сырья Испытания печи 4,5/5×170 м при обжиге контрольного и углесодержащего шламов в течении 48 и 53 часов подтвердили снижение удельного расхода форсуночного условного топлива с 204 до 172 кг/т клинкера. Неполноты сгорания топлива не наблюдалось. Клинкер отличался лучшей гранулометрией и размалываемостью, вследствие чего производительность цементной мельницы повысилась на 1,3 т/ч, расход электроэнергии снизился на 2 кВт·ч/т и был получен высококачественный клинкер с активностью 51,3 МПа

Использование медеплавильного шлака позволило на печи 4/3,6/4×150 м снизить удельный расход условного топлива с 217,9 до 209,4 кг/т клинкера и повысить производительность печи на 1,1 т/ч Присутствие каталитических элементов в шлаке обеспечило повышение активности клинкера с 52,4 до 54,3 МПа.

Промышленные испытания по использованию доменных шлаков для синтеза низкоосновного клинкера (НОК) и получению высококачественного смешанного цемента подтвердили результаты лабораторных исследований На одну из трех 150 м печей при питании их обычным шламом, работавших на один клинкерный транспортер, подавался ДШ Доля ДШ постепенно увеличивалась с 1,6, 3,1 до 5,5 т/ч Всего за 39 часов испытаний получено 2418 тонн рядового клинкера и 1367 тонн НОК, что составило 36%. КН НОК по мере увеличения доли шлака снижался от 0,93 до 0,73. Следует отметить неожиданный результат, при увеличении производительности печи на 1,6 т/ч общий расход топлива даже снизился с 6160 до 6140 $м^3$/ч. Затем при подаче 3,1 т/ч шлака – восстановился до 6160 $м^3$/ч, и только при подаче 5,5 т/ч и увеличении производительности печи с 31 до 36,5 т/ч – повысился до 6230 $м^3$/ч При этом расход уловного топлива спизился с 221 до 190 кг/т клинкера Опытный клинкер складировался отдельно, его средний КН составил 0,87 Выпуск промышленных партий

цемента производился с добавлением 20% ДШ в качестве минеральной добавки Выпущенные партии цемента в основном соответствовали цементу ПЦ Д20 марки 500. Промышленные испытания показали целесообразность введения до 15% немолотого ДШ в печь для синтеза НОК и получения на его основе высококачественного цемента при одновременном снижении на 10 кг удельного расхода топлива по всем печам.

Таким образом, в промышленных условиях доказано, что комплексное использование углеотходов, медеплавильных и доменных шлаков позволяет значительно снизить расход топлива, электроэнергии, природного сырья и улучшить экологию окружающей среды.

Основные выводы и результаты работы

1 На основе комплексного исследования взаимосвязанных физико-химических и теплотехнических процессов разработаны теоретически обоснованные и практически реализованные принципы и методология интенсификации обжига цементного клинкера, обеспечивающие экономию энергетических и сырьевых ресурсов, улучшение экологии окружающей среды и повышение качества продукции

2 Разработаны методики и установки, позволяющие в лабораторных условиях моделировать процессы, протекающие в промышленных печах. массообмен и газодинамику в цепных завесах, пылеунос и пылеулавливание, агломерацию материала и образования обмазки в зоне спекания, величину припекания клинкера к огнеупору и обмазке, термические напряжения в огнеупоре и разрушение кирпича (пат 2187043 и 2145946)

3. Разработана методология совершенствования и проектирования комплекса теплообменных устройств, которая учитывает изменение физических свойств шлама в процессе сушки и обусловленные этим особенности массообмена и газодинамики в цепных завесах. Для характеристики массообмена введен новый ***критерий*** – отношение массы материала на цепях к массе цепей – $m_м/m_ц$, а для наиболее полной характеристики газо-

проницаемости цепной завесы предложены новые взаимосвязанные коэффициенты K_c и K_f, отражающие отношения площади проекции межцепного сечения к площади проекции цепей (K_c) и к площади подцепного сечения (K_f). Коэффициент K_c определяет газопроницаемость цепей, а коэффициент K_f – отношение скоростей в межцепном и подцепном сечениях. Для интенсивного теплообмена необходимо оптимизировать эти коэффициенты, при высоких значениях $m_м/m_ц$ следует увеличивать K_c и K_f, а при низких – уменьшать K_c и по возможности оставить неизменным K_f В области вязкого материала максимальное значение $m_м/m_ц$ может изменяться от 0,32 до 0,6 кг/кг, поэтому на этом участке при $m_м/m_ц$ = 0,3–0,4 кг/кг рекомендуется высокая плотность цепной завесы – K_F = 6–8 м^2/м^2, а при $m_м/m_ц$= 0,4–0,6 кг/кг плотность должна быть снижена до K_F = 4–6 м^2/м^2

4 Характер изменения величины $m_м/m_ц$ позволяет определить способность шлама к грануляции и определить в цепной завесе протяжённость зоны пылеулавливания и пылеобразования, которые характеризуются набором и сходом материала с цепей. Полученные результаты позволяют прогнозировать пылевынос из промышленной печи и предложить рациональную цепную завесу, снижающую этот показатель

5. Газодинамические измерения промышленной цепной завесы показали, что под цепями скорость газа может быть 2–3 раз выше, чем в цепях, в результате чего снижается теплообмен и увеличивается пылевынос из печи. В связи с этим при проектировании комплекса теплообменных устройств следует стремиться к выравниванию скоростей этих потоков путем подбора длины цепей и плотности навески на различных участках

6. Экспериментально-теоретические исследования теплотехники вращающихся печей показали, что при мокром способе с целью экономии форсуночного топлива можно подавать в шлам выгорающую добавку. Допустимая концентрация добавки зависит от состава и свойств горючей

массы, коэффициента избытка воздуха и теплового КПД клинкерного холодильника. Предельная величина по горючему вещества составляет 3,8%, что обеспечит экономию до 25% технологического топлива

7. Медеплавильные шлаки могут быть успешно использованы в качестве железосодержащей добавки В результате протекающих в них при нагревании фазовых превращений, экзотермических реакций окисления двухвалентного железа, образования низкотемпературных расплавов пониженной вязкости интенсифицируются реакции минералообразования и снижается теплота клинкерообразования При совместном использовании медеплавильных шлаков и углеотходов вследствие минерализующего действия примесей, повышения содержания Al_2O_3 в клинкере, уменьшения форсуночного топлива и, следовательно, теплонапряжения в зоне спекания улучшаются состояние обмазки в печи и гранулометрия клинкера, возрастает его гидравлическая активность с 52,2 до 58,6 МПа

8. Установлены особенности физико-химических процессов клинкерообразования при введении в печь доменного шлака. В процессе расстекловывания шлаков при 800-1000°С кристаллизуются мелилит и около 20% диопсида CMS_2, который после 1100°С полностью растворяется в мелилите, образуя нестехиометрический твердый раствор. Вследствие фазовых превращений, образования расплава при 1240°С и пониженного КН = 0,77 процессы клинкерообразования завершаются при 1350°С Размеры кристаллов алита и белита составляют 5–15 мкм, минералы плавни представлены только алюмоферритами кальция, на рентгенограммах не обнаруживаются алюминаты кальция при расчетном содержании $C_3A \approx 10\%$

9. Уточнен механизм агломерации и разрушения гранул при жидкофазном спекании Количество жидкой фазы, необходимое для образования оптимального размера гранул, зависит от дисперсности твердой фазы и находится в пределах 32–40 объёмных %, которое превышает расчетные значения расплава в клинкере при равновесных условиях С увеличением

дисперсности увеличивается требуемое количество расплава. Разрушение гранул происходит в результате отслаивания поверхностного слоя при резком охлаждении клинкера

10. Развиты представления о механизме образования защитной обмазки во вращающихся печах, который обусловлен: количеством свойствами жидкой фазы; гранулометрией клинкера; температурным интервалом и величиной сил сцепления клинкера с огнеупором и обмазкой, скоростью высокотемпературных реакций с участием жидкой фазы. Установлена важная взаимосвязь между процессами образования клинкерных гранул и обмазки, имеющая большое практическое значение, размер гранул является показателем состояния обмазки в печи. Оптимальная обмазка создается при условии, когда размер гранул находится в пределах 10–20 мм Выявлено отрицательное воздействие в процессе розжига пиритных огарок и боя шамотного кирпича в зоне спекания на образование первичного контакта между огнеупором и клинкером

11. Установлен преимущественный механизм разрушения футеровки в зоне спекания, обусловленный термическими напряжениями в огнеупоре при обрушении обмазки вследствие резкого нагрева поверхностных слоев огнеупора с скоростью 100°С/минуту. Дополнительно в кладке возникают напряжения обусловленные расширением кладки, заключенной в стальной корпус. Для снятия этих напряжений разработан термокомпенсатор и способ упрочнения футеровки (а.с 1645249) Причиной обрушения обмазки является не стабильный режим обжига, который может возникнуть вследствие колебания состава или слоя материала в печи и формы факела, например, при смене газообразного и мазутного топлива Предложен способ рационального перехода с одного вида топлива на другой, а также разработаны горелочные устройства дли совместного сжигания газа и мазута (а с 1132109, 1195137), предотвращающие обрушение обмазки.

12. Уточнён механизм образование колец в начале зоны спекания, за-

ключающийся в возникновения при неравновесных условиях повышенного количества низкоосновного силикатного расплава в области 1200°С и его быстрой кристаллизации при температуре около 1340°С вследствие насыщении расплава оксидом кальция. Этот процесс возникает при недостаточной температуре материала в подготовительных зонах, в частности при нерациональной цепной завесе, и высокой скорости нагрева материала, опережающий химические реакции в системе

13. В промышленных условиях на ОАО "Уралцемент" доказана эффективность получения высококачественного двухклинкерного цемента с активностью 54 МПа путем помола одной части низкоосновного клинкера с КН = 0,77 и 2-х частей рядового – с КН = 0,92 и дополнительно 20% доменного шлака в качестве минеральной добавки С 1996 года в качестве железосодержащего компонента вместо дефицитных огарок используются медеплавильные шлаки Использование углеотходов позволило полностью исключить вывоз в отвал 25% запесоченной глины

13 На многих печах заводов России, Киргизстана, Казахстана, Узбекистана, Грузии, Азербайджана и Армении реализован комплекс технологических и конструкторских решений по использованию техногенных материалов, модернизации клинкерных холодильников, газовых горелок, комплекса теплообменных устройств, системы контроля и оптимизации режима работы вращающейся печи. В результате внедрения этих работ увеличена производительность печей на 10–15%, снижен удельный расход топлива на тонну клинкера на 5–20 кг, увеличена стойкость огнеупорной футеровки на 60–200 суток, повышено качество цемента на 3-5 МПа, значительно улучшена экология региона. Экономический эффект составил более 500 млн рублей в год.

Содержание диссертации изложено в 74 публикации, основные из них

1 *Борисов, И Н* Управление процессами агломерации материалов и формирования обмазки во вращающихся печах цементной промышленности / **И.Н. Борисов.** – Белгород: Белаудит, 2003 – 113 с – ISBN

2 *Классен, В К* Совершенствование методов испытаний и оптимизации режима работы вращающихся печей / В.К Классен, **И.Н. Борисов**, А Н. Классен // Тр НИИЦемента – 1985. – № 88 – С 97–118.

3. *Борисов, И.Н.* Изучение процесса образования обмазки и агломерации материала во вращающейся печи / **И.Н. Борисов**, В.К Классен, Ю.А Гуртовой // Цемент – 1993 – № 2. – С. 19–20

4 *Классен, В К* Энерго- и ресурсосбережение в производстве цемента / В К Классен, В И Беляева, **И.Н. Борисов** // Известия вузов Строительство. – 1996 – № 10 – С. 46–51

5 *Брыжик, А В* Исследование состава сырьевых шихт с учетом различных видов компонентов и изменений модульных характеристик / А В Брыжик, Е В. Текучева, **И.Н. Борисов** // Цемент и его применение – 1999. – № 3 – С.40–43.

6 *Классен, В К* Использование Карабашских медеплавильных шлаков и углеотходов в производстве цемента / В К Классен, А Н Классен, В.Е Мануйлов, **И.Н. Борисов** // Современные проблемы строительного материаловедения мат седьмых академ. чтений РААСН – Белгород, 2001.– Ч 1 – С 205–210

7. *Борисов, И Н* Некоторые особенности поведения шламов на цепях при высушивании / **И.Н. Борисов**, Л.С. Дурнева // Цемент и его применение. – 2002 – № 5 С 26–28

8. *Классен, В К* Изменение структуры и фазового состава доменного шлака при нагревании / В К Классен, А Н Классен, **И.Н. Борисов** // Известия вузов Строительство – 2002 – № 4 – С 56–60

9 *Борисов, И Н* Пути повышения эффективности работы цепных завес вращающихся печей / **И.Н. Борисов** // Цемент и его применение – 2003 – № 3 – С 17–20

10 *Классен, В К* Особенности процесса минералообразования в шлакосодержащих сырьевых смесях различной основности / В К Классен, **И.Н. Борисов**, А Н Классен // Известия вузов Строительство. – 2003. – № 7 – С. 55–57

11 *Борисов, И Н* Влияние техногенных продуктов на свойства шлама при высушивании / **И.Н. Борисов**, Л С Дурнева // Вестник БелГТАСМ – 2003. – № 5. – С 40–42

12. *Борисов, И Н* Изучение процессов агломерации и образования обмазки на низкотемпературной установке / **И.Н. Борисов**, Д А. Мишин // Вестник БелГТАСМ. – 2003. – № 5 – С. 42–46

13. *Борисов, И Н* Интенсификация обжига цементного клинкера путем совершенствования технологических процессов / **И.Н. Борисов** // Тр междунар. науч -практ. конф. / РХТУ им Д И Менделеева – Москва, 2003 – Т. IV. – С. 159–164.

14. *Борисов, И Н* Эффективность использования поверхностно-активных веществ в сырьевых шламах / **И.Н. Борисов**, Л С Дурнева // Вестник БелГТАСМ – 2005. – № 10 – С 36–39

15. *Борисов, И Н* Газодинамика цепных завес во вращающихся печах / **И.Н. Борисов** // Мат докл Академ чтений РААСН / БГТУ им В Г. Шухова – Белгород, 2005 – Ч I – С 101–115

16. *Классен, В К* Установка для моделирования газодинамики цепной завесы вращающейся печи / В К. Классен, **И.Н. Борисов**, Е И. Иванова // Композиционные строительные материалы Теория и практика· сб ст междунар науч -техн. конф / Пензен гос ун-т архитек и строит – Пенза, 2006. – С. 80–83

17. *Борисов, И Н* Использование закономерностей массообменных и аэродинамических процессов при проектировании цепных завес вращающихся печей / **Борисов И.Н.**, Дурнева Л С // Техника и технология силикатов – 2006 – № 5 – С 19–25

18. *Борисов, И Н* Хром в цементной промышленности / **И.Н. Борисов**, Е В. Индина // Цемент и его применение. – 2007 – № 1 – С 19–25.

19. *Борисов, И Н* Использование закономерностей движения материала во вращающейся печи для проектирования теплообменных устройств / **И.Н. Борисов** // Науч исследования, наносистемы и ресурсосберагющие технологии в стройиндустрии сб докл междунар науч - практич конф / Белгор гос. технол. ун-т – Белгород Изд-во БГТУ, 2007 – С 20-25

20 *Борисов, И Н* Теоретическое обоснование и эффективность использования углеотходов в качестве сырьевого компонента в технологии цемента / **И.Н. Борисов**, В К Классен, В.Е Мануйлов, Е И Ходыкин // Строительные материалы – 2007 – № 8 – С 20–21.

21 *Борисов, И Н* Особенности теплотехнологических процессов в подготовительной зоне вращающихся печей / **И.Н. Борисов** // Строительные материалы – 2007. – № 8 С 22–23

22 Пат 2145946 РФ, МПК[7] С 04 В 7/47 Способ охлаждения цементного клинкера / В К Классен, С А Перескок, Е В Текучева, **И.Н. Борисов**, И.М Попов, А С Михин, В А Чурюмов, В Е Мануйлов, заявитель и патентообладатель БелГТАСМ – № 97107803/03, заявл 23 04.97; опубл 27 02 2000, Бюл № 6 – 7 с

23. Пат. 2187043 РФ, МПК[7] F 23 D 14/20 Диффузионная газовая горелка / В К Классен, А Ф Матвеев, **И.Н. Борисов**, заявитель и патентообладатель БелГТАСМ – № 201122280/06, заявл 08 08 2001, опубл 10 08 2002, Бюл № 22

24 Пат 2285217 РФ, МПК[7] F 28 F 1/00. Цепь для цепной завесы вращающейся печи / **И.Н. Борисов**, Д А Мишин, заявитель и патентообладатель БГТУ им. В Г Шухова – № 2005131902/06, заявл 14 10 2005; опубл. 10 10 2005, Бюл № 28 – 7 с

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 27 06 08 Формат 60×84/16 Усл печ л 2.
Тираж 120 экз Заказ № 355

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете
им В Г Шухова
308012, г Белгород, ул Костюкова, 46