

**П. В. Беседин
П. А. Трубаев**

**ИССЛЕДОВАНИЕ
И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССОВ
В ТЕХНОЛОГИИ
ЦЕМЕНТНОГО
КЛИНКЕРА**

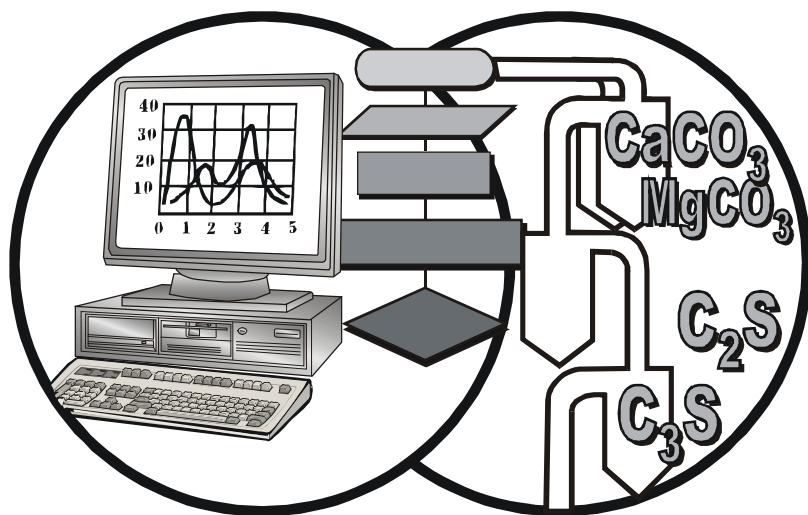


**Белгород
2004**

П. В. Беседин

П. А. Трубаев

**ИССЛЕДОВАНИЕ
И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ
ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**



Белгород 2004

УДК 666.9.01

ББК Б31

Б 53

Рецензенты:

Академик академии естествознания, заслуженный деятель науки и техники РФ, почетный работник высшего образования РФ, доктор технических наук, профессор кафедры технологии керамики, стекла и вяжущих веществ Южно-Российского государственного технического университета (Новочеркасского политехнического института) **А. П. Зубехин**

Член-корреспондент академии естествознания, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии цемента и композиционных материалов Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова **В. К. Классен**

Беседин П. В.

Б53 Исследование и оптимизация процессов в технологии цементного клинкера / П. В. Беседин, П. А. Трубаев; Под общ. ред. П. В. Беседина. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, БИЭИ, 2004. – 420 с.

В монографии на основе обобщения известных работ и собственных исследований авторов рассмотрены некоторые проблемы повышения эффективности технологии цементного производства.

Предложены физико-химические основы регулирования реологических и седиментационных свойств шламовых суспензий, приводятся результаты исследования характера движения материала и процесса пылеобразования в цементных печах, рассмотрены вопросы расчета и оптимизации многокомпонентных сырьевых смесей и клинкера. Показаны методы интенсификации технологических процессов, снижения энергозатрат и повышения качества выпускаемой продукции в промышленном производстве цемента.

Монография рассчитана на научных и инженерно-технических работников промышленности строительных материалов, а также на студентов строительного-технологического вузов.

УДК 666.9.01

ББК Б31

© Беседин П. В., Трубаев П. А., 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
----------------	---

ЧАСТЬ I. АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

1. Системный анализ как современная научно-методическая основа интенсификации процессов химической технологии	11
1.1. Основы системного анализа процессов химической технологии ...	11
1.2. Качественный анализ структуры физико-химической системы	13
1.3. Концепция построения математического описания физико-химической системы	14
1.4. Некоторые аспекты математического описания процессов химической технологии.....	17
2. Основные особенности процессов технологии клинкера	19
2.1. Особенности процессов, протекающих в технологии получения цементного клинкера	19
2.2. Схема технологии обжига клинкера	21
2.3. Некоторые факторы, определяющие технологический процесс обжига	24
3. Физико-химические основы регулирования реологических и седиментационных свойств шламовых суспензий	26
3.1. Проблемы снижения влажности шлама	26
3.2. Реологические свойства шламовых суспензий, закономерности вязкопластичных сред	28
3.3. Физико-химические основы регулирования свойств цементных шламов	29
3.4. Методы исследования реологических свойств шлама технологии цемента	36
3.5. Исследование действия пластификаторов на реологические свойства суспензий в технологии цемента	44
3.6. Регулирование реологических свойств суспензий методами физико-механического воздействия	49
3.7. Регулирование реологических свойств суспензий методами механохимического воздействия	54
4. Анализ фазовых превращений в процессе спекания клинкера	56
4.1. Моделирование и анализ фазовых превращений в процессе спекания клинкера	56
4.2. Методика исследования кинетики клинкерообразования	62
4.3. Исследование кинетики процесса клинкерообразования в условиях раздельного нагрева сырьевых компонентов	67
4.4. Анализ кинетики клинкерообразования в промышленных печах ...	73
4.5. Условия течения реакций при обжиге клинкера и моделирование кинетики реакций клинкерообразования	77

4.6. Моделирование и математическое описание процесса декарбонизации сырьевой смеси	83
4.7. Моделирование процесса декарбонизации сырьевых гранул при наличии градиента температур между материалом и теплоносителем ...	93
4.8. Алгоритм расчета декарбонизации и анализ влияния параметров процесса обжига на степень превращения сырьевых гранул	98
5. Исследование движения материала и пылеобразования в промышленных вращающихся печах	104
5.1. Влияние режима обжига на физико-химические процессы и пылеобразование в цементной вращающейся печи	104
5.2. Моделирование и математическое описание процессов движения материала и пылеобразования в печах цементного производства	107
5.3. Исследование характера движения и моделирование структуры потока обжигаемого материала в печах цементного производства	112
5.4. Влияние параметров процесса на закономерность движения материала в печи	123
5.5. Исследование характера и интенсивности пылеобразования в печах цементного производства	131
5.6. Влияние параметров процесса обжига на пылеобразование в печи	140

ЧАСТЬ II. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЦЕМЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

6. Теплопроводность строительных материалов и методы ее измерения	149
6.1. Влияние теплопроводности обрабатываемого материала на эффективность процесса получения цементного клинкера	149
6.2. Коэффициенты теплопроводности материалов цементной технологии	151
6.3. Коэффициенты теплопроводности стекла и огнеупоров	152
6.4. Методы экспериментального исследования теплопроводности ...	157
7. Модель процесса теплопроводности в многокомпонентных материалах	159
7.1. Процесс теплопроводности в многокомпонентных материалах ...	159
7.2. Оценка коэффициентов модели для огнеупорных материалов	169
7.3. Экспериментальное исследование и оценка коэффициентов модели для цементных сырьевых смесей	173
7.4. Влияние на теплопроводность влажности и пористости	177
7.5. Метод расчета коэффициента теплопроводности цементных сырьевых смесей и клинкера	181
7.6. Изменение теплопроводности материала при его термообработке в печи	184
7.7. Модульные характеристики теплофизических свойств	186

8. Экспериментальное определение теплопроводности клинкерных гранул методом решения обратной задачи	193
8.1. Модель процесса нестационарной теплопроводности	193
8.2. Материалы для исследования и методика проведения эксперимента	209
8.3. Результаты исследования процессов нагрева и охлаждения гранул	212
9. Экспериментальное определение теплопроводности материала в процессе обжига	217
9.1. Исследование материалов в установке цилиндрического слоя	217
9.2. Измерение теплопроводности цементного клинкера в установке плоского слоя	222
9.3. Оценка теплопроводности материала в процессе обжига	225

ЧАСТЬ III. МЕТОДЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ И СИСТЕМ

10. Характеристики цементных сырьевых смесей и клинкера	231
10.1. Химический состав	231
10.2. Модульные характеристики	233
10.3. Минералогический состав	238
10.4. Оптимальный состав сырьевой смеси и клинкера	244
10.5. Влияние состава на качество цемента	247
10.6. Влияние состава на процесс обжига	248
10.7. Планирование эксперимента при исследовании сырьевых смесей и разработка новых характеристик	253
10.8. Выбор рационального состава сырьевой смеси	255
11. Особенности расчета и оптимизации состава цементных сырьевых смесей и клинкера	258
11.1. Цели расчета сырьевых смесей	258
11.2. Характеристики для расчета и корректирования сырьевой смеси	261
11.3. Уравнения расчета и корректирования сырьевой смеси	264
11.4. Оптимизация состава сырьевых смесей и клинкера	274
11.5. Применение в расчетах сырьевых смесей стандартных программных средств	278
11.6. Актуальные задачи в технологии сырьевых смесей	287
12. Формализация расчета многокомпонентных цементных сырьевых смесей	288
12.1. Обозначение состава материалов	288
12.2. Преобразование характеристик	289
12.3. Формализованное уравнение расчета при отсутствии присадки золы топлива	290
12.4. Формализованное уравнение расчета при наличии присадок к клинкеру	292
12.5. Формализованное уравнение корректирования сырьевых смесей	294

13. Оптимизация многокомпонентных смесей и систем в симплексной системе координат при наличии ограничений и снижении степени свободы системы	298
13.1. Постановка задачи оптимизации.....	298
13.2. Преобразования характеристик смесей и систем	302
13.3. Учет компонентов с известным расходом	303
13.4. Численный метод оптимизации	305
13.5. Исследование параметров метода	307
13.6. Преобразование ограничений в задачах оптимизации	308
14. Математическое описание локальной области многокомпонентной системы	315
14.1. Особенности планирования эксперимента при исследовании многокомпонентных смесей и систем силикатной технологии	315
14.2. Определение координат сечения локальной области диаграммы состояния многокомпонентных систем цементной технологии	322
14.3. Построение решетчатых планов на факторном пространстве многокомпонентных систем при наличии ограничений	336
15. Программные средства расчета сырьевых смесей в производстве строительных материалов	344
15.1. Программа расчета цементных сырьевых смесей	344
15.2. Программно-вычислительный комплекс расчета цементной сырьевой смеси двухтитровой технологии	347
15.3. Методическое и программное обеспечение расчета магнезиальных высокожелезистых сырьевых смесей	354
15.4. Информационные средства расчета стекольной сырьевой шихты	360
16. Программа расчета и оптимизации цементных сырьевых смесей	369
16.1. Актуальность создания программы оптимизации сырьевых смесей.....	369
16.2. Структура программы	370
16.3. Возможности программы	374
16.4. Сырьевые материалы, используемые в расчетах	376
16.5. Характеристики сырьевых смесей и клинкера	376
16.6. Расчет и оптимизация сырьевых смесей	378
16.7. Результаты расчета	381
17. Оптимизация состава сырьевых смесей с целью снижения энергозатрат на обжиг клинкера	388
17.1. Энергоемкость сырьевых смесей	388
17.2. Методика выбора сырьевых компонентов	390
17.3. Определение расхода техногенного продукта	394
17.4. Снижение энергоемкости сырьевой смеси	396
Библиографический список	401

ВВЕДЕНИЕ

Промышленность строительных материалов и производство цемента являются крупными потребителями сырьевых и энергетических ресурсов. Цементная промышленность России в сложившихся рыночных отношениях не отвечает требованиям международной конкуренции, так как технология производства, оборудование и уровень автоматизации морально устарели, а удельные энергозатраты при получении продукции очень высоки. Существующие промышленные технологии не отвечают современным требованиям экологической безопасности человека и окружающей среды.

Техническое перевооружение и развитие цементной промышленности в России требуют поиска оптимальных вариантов реконструкции, модернизации и совершенствования морально устаревших предприятий и создания принципиально новых технологий и производств на их основе.

Большинство процессов цементного производства и технологии клинкера имеют высокую сложность, которая обусловлена многофазностью протекающих физико-химических, тепломассообменных и химических процессов. Аппараты, в которых получают клинкер, рассчитаны на многотоннажное производство, характеризуются конструктивной сложностью с большим числом составных частей и элементов.

Решение проблем повышения эффективности действующего оборудования и разработка новых высокоэффективных экологически чистых производств требуют создания научно-методической базы информационных технологий расчета и оптимизации процессов получения клинкера и на этой основе – оптимизации и интенсификации процессов цементной технологии.

В монографии применена методология системного анализа основных процессов технологии клинкера, на базе которой в результате обобщения известных работ и собственных исследований авторов изучены некоторые проблемы повышения эффективности технологии цементного производства. Рассмотрены следующие вопросы:

– регулирование реологических свойств шламовых суспензий с целью снижения влажности шлама методами физико-

механического и механохимического воздействия и путем ввода пластификаторов;

– исследование движения материала и пылеобразования в промышленных печах и зависимость этих процессов от режима обжига;

– определение теплопроводности цементных сырьевых смесей и клинкера с учетом их многокомпонентного состава;

– расчет и оптимизация многокомпонентных сырьевых смесей и систем, информационные средства расчета и оптимизации цементных сырьевых смесей, разработанные на основе предложенных методов.

Главы 1–5 написаны П. В. Бесединым, главы 6–17 П. А. Трубаевым.

Авторы выражают благодарность заведующему кафедры кибернетики РХТУ им. Д. И. Менделеева доктору технических наук, профессору Л. С. Гордееву, заведующему кафедрой технологии цемента и композитных материалов БелГТАСМ доктору технических наук, профессору В. К. Классену за большую помощь, поддержку и содействие в создании данной монографии.

Часть I

АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА



1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК СОВРЕМЕННАЯ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

1.1. ОСНОВЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Системный анализ процессов химической технологии стал современной методологической основой исследования математического описания, расчета, проектирования, оптимизации сложных химико-технологических процессов. Основные принципы и понятия, научно-методологическая концепция системного анализа изложены в фундаментальных работах кафедры кибернетики Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева [1–17].

Центральным понятием системного анализа является представление системы как объекта, обладающего сложным внутренним строением с большим числом составных частей и элементов и взаимодействующего с окружающей средой. Элемент системы – это самостоятельная условно неделимая единица. Между элементами системы и внешней средой происходят взаимодействия, включающие материальные, энергетические и информационные связи. Сложность системы определяется ее структурой, количеством элементов и связей, числом уровней иерархии, объемом информации, циркулирующей в системе.

Как современная методология научного исследования системный анализ предполагает развитие теоретических основ математического моделирования, идентификации и оптимизации химико-технологических процессов.

В настоящее время накоплен достаточный опыт практического применения методологии системного анализа для решения задач расчета, проектирования, управления и на этой основе – интенсификации процессов в масштабе больших химико-технологических систем и сложных химико-технологических процессов. В частности, принципы анализа сложных химико-технологических процессов и систем широко использовались в

химической, нефтехимической [5, 13], биохимической [3, 4], металлургической [18–20] и других отраслях промышленности.

Технология получения клинкера является наиболее сложным и энергоемким процессом цементного производства. С позиций системного анализа технологический процесс его получения представляет собой комплекс сложных химико-технологических систем, включающих стадии приготовления многокомпонентных сырьевых смесей из добываемых в карьерах сырьевых материалов и корректирующих добавок. Средний завод производительностью 2 млн т цемента в год перерабатывает до 4 млн т сырьевых материалов и затрачивает на это 300...400 тыс. т топлива и 220...230 млн кВт·ч электроэнергии. Основные процессы, протекающие в технологии получения клинкера, следующие:

- дробление, измельчение и смешение сырьевых материалов по мокрому и сухому способу;
- приготовление многокомпонентных сырьевых смесей;
- транспортирование и хранение огромного количества вязкопластических шламовых суспензий;
- сушка сырьевых материалов и корректирующих компонентов сырьевой шихты и цемента;
- обжиг сырьевой смеси и получение клинкера.

Все это представляет собой комплекс последовательно-параллельных процессов, протекающих в агрегатах большой единичной мощности в условиях нестационарности, неоднородности и распределенных сред.

Сказанное относит технологические процессы получения клинкера к разряду сложнейших кибернетических систем. Вместе с тем в промышленности строительных материалов, являющейся одним из наиболее крупных потребителей сырьевых и энергетических ресурсов, методы системного анализа еще не нашли широкого применения. Это обусловлено в основном недостаточной разработанностью этих методов в технологии строительных материалов и промышленной технологии цемента.

Учитывая низкую эффективность цементного производства и неконкурентоспособность получаемой продукции на международном рынке, разработка методологии системного анализа в технологических процессах весьма актуальна. Это, в свою оче-

редь, требует создания научно-методической базы информационных технологий расчета, проектирования, оптимизации и на основе этого интенсификации процессов получения клинкера с учетом особенностей технологии в производстве цемента.

1.2. КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Стратегия системного подхода на первом этапе исследования и моделирования химико-технологического процесса предполагает проводить качественный анализ структуры физико-химической системы (ФХС), при этом выделяется два аспекта – смысловой и математический. Смысловой – это предварительный анализ априорной информации о физико-химических особенностях процесса. Математический аспект состоит в качественном анализе структуры математических зависимостей, которые могут быть положены в основу описания ФХС.

В соответствии с принципами, изложенными в работе [1], промышленное предприятие как система большого масштаба состоит из взаимосвязанных подсистем, которые можно представить в виде иерархической структуры с тремя основными ступенями. Первая ступень – это типовые процессы химической технологии, протекающие в определенных аппаратах, например механические, тепловые, химические. В первую ступень анализа структуры ФХС включаются и локальные системы управления этими процессами. Вторую ступень иерархии представляют производственные цехи и системы автоматизированного управления ими. Третья ступень иерархической структуры в системном анализе – это система оперативного управления совокупностью цехов, организацией производства, планированием запасов сырья и реализацией готовых продуктов, в которой решаются задачи оптимального управления всем предприятием.

В свою очередь, каждый типовой процесс формализуется как ФХС, которая может быть представлена как сплошная многофазная многокомпонентная среда, распределенная в пространстве и переменная во времени, при этом в каждой точке пространства и на границе раздела фаз происходит перенос вещества, энергии и импульса.

В этой связи для решения задач оптимизации и эффективного управления на всех ступенях иерархической структуры организации производства необходима максимальная формализация технологических процессов.

1.3. КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Концепция построения математического описания физико-химической системы представлена в работах [1, 15]. В соответствии с ней всякая ФХС может быть представлена в виде набора элементов и связей, а совокупность физико-химических эффектов и явлений предлагается делить на пять ступеней иерархии.

Первый уровень иерархии эффектов ФХС характеризуется физико-химическими эффектами взаимодействия между атомами, свободными радикалами, молекулами, ионами, комплексами различного состава и строения. Быстрота химического превращения определяется вероятностью взаимодействия частиц, которые обладают энергией, достаточной для преодоления потенциального барьера, и энтропией активации.

Второй уровень иерархии ФХС представляет собой совокупность физико-химических эффектов, протекающих на уровне молекулярных глобул, или агрегатов. Каждая глобула (агрегат) ведет себя как элементарная ФХС, где наблюдается весь комплекс химических тепловых и диффузионных явлений. Примером могут служить отдельные частицы полидисперсной фазы минерального сырья, которые подвергаются технологической обработке (сушке, обжигу, измельчению и т.п.). Это могут быть и кристаллические структуры минералов, которые разрушаются или образуются в технологическом процессе. На этом уровне рассматриваются процессы и явления, протекающие внутри агрегатов, или глобул.

Третий уровень иерархии эффектов ФХС характеризует перенос массы, энергии и импульса в гетерогенной среде через границу раздела фаз. При этом причины возникновения межфазных потоков могут быть обусловлены или вызваны неравновесностью концентраций физико-химического состава реагентов, неоднородностью температурных полей и несовпадением скоростей на границе раздела фаз.

Потоки массы и энергии вызывают изменение термодинамических характеристик сплошной и дисперсных фаз.

В технологии получения клинкера третий уровень иерархии может быть представлен процессами, проходящими в отдельной частице полидисперсной фазы, при этом частица движется в температурном поле газовой среды. В процессе движения частиц происходят процессы тепло- и массообмена с окружающей средой. Аналогично этому можно рассмотреть и условия движения отдельной частицы в потоке полидисперсной среды обжигаемого материала в технологических зонах цементной печи.

Четвертый уровень иерархии ФХС рассматривает явления, которые описывают гидродинамическую обстановку в локальном объеме аппарата. В этом случае локальный объем в силу малых объемов аппарата считается элементарным. Основными количественными характеристиками ФХС данного уровня иерархии являются нормальные и касательные напряжения потоков, значения деформаций и скоростей деформации, коэффициенты вязкости, диффузии, теплопроводности, скорости химических реакций и фазовых превращений. На этом этапе рассматриваются такие явления, как турбулизация сплошной среды, турбулентное движение и турбулентные пульсации элемента дисперсной фазы. Изучается также коалиценция элементов дисперсной фазы в процессе их столкновения; перераспределение полей концентраций, температур и давлений внутри элементарного объема сплошной среды или дисперсной фазы.

Эффекты первого, второго, третьего и четвертого уровней структуры ФХС находятся в тесной взаимосвязи и образуют совокупность микрогидродинамических факторов, влияющих на переносы субстанций в гетерофазной многокомпонентной системе.

Пятый уровень структуры эффектов ФХС составляет совокупность явлений, которые определяют гидродинамическую обстановку в аппарате на макроуровне. В этом случае рассматривают совокупность явлений, характеризующих гидродинамическую структуру потоков в аппарате в целом.

На этом этапе анализа ФХС рассматриваются конструктивные особенности аппарата, тип перемешивающих и теплообменных устройств, перегородок, расположение входных и выходных уст-

ройств; анализируются возмущения, вносимые входными потоками, а также влияние факторов механического перемешивания, распределение дисперсных фаз по траекториям, по времени пребывания, по размерам.

Каждый уровень иерархической структуры ФХС характеризуется соответствующей формой математического описания. Так, основу первого уровня составляют методы химической кинетики и химической термодинамики, определения механизмов сложных химических реакций, стехиометрического анализа уравнений, расчет кинетических констант.

На втором уровне анализа ФХС информация первого уровня обогащается данными о степени сегрегации, коагуляции и коаллиценции системы и структуры надмолекулярных образований. Математические модели на этом уровне описывают соответствующие процессы образования молекулярных агрегатов, фибрилл и других структурных форм.

Основу описания эффектов третьего уровня составляют методы механики мелкомасштабных течений около элементов дисперсной фазы. Моделируется термодинамика поверхностных явлений, разрабатываются методы описания равновесия многокомпонентных систем; рассматриваются различные теории межфазного переноса.

Для описания явлений четвертого уровня могут быть использованы методы статистической теории механики взвешенных дисперсных систем, а также гидродинамические модели.

Рассматриваемые эффекты первых четырех уровней взаимосвязаны друг с другом и входят в математическое описание пятого уровня. Подобное разбиение на уровни не охватывает всего многообразия явлений, протекающих в сложных химико-технологических системах, однако такой подход позволяет рассматривать и детализировать явления каждого уровня. Объединяя и обобщая последовательность этапов в единое математическое описание, можно оценивать значимость каждого этапа, каждой стадии или явления для эффективности течения процессов, проходящих в аппаратах химической технологии.

1.4. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Одним из приемов системного анализа процессов химической технологии является структурное топологическое представление объекта исследования. Теоретическое обоснование топологического метода описания физико-химических систем, техника построения диаграмм связи для широкого класса объектов химической технологии приводятся в работе [2]. Основой топологического анализа является принцип декомпозиции сложной системы на ряд взаимосвязанных подсистем, блоков, элементов. Правила объединения отдельных блоков и элементов в единую связанную топологическую структуру системы, приемы и методы описания эффектов различной физико-химической природы составляют единую методологию построения математического описания химико-технологического процесса.

В качестве примера на рис. 1.1 представлена топологическая структура построения математического описания физико-химических систем.

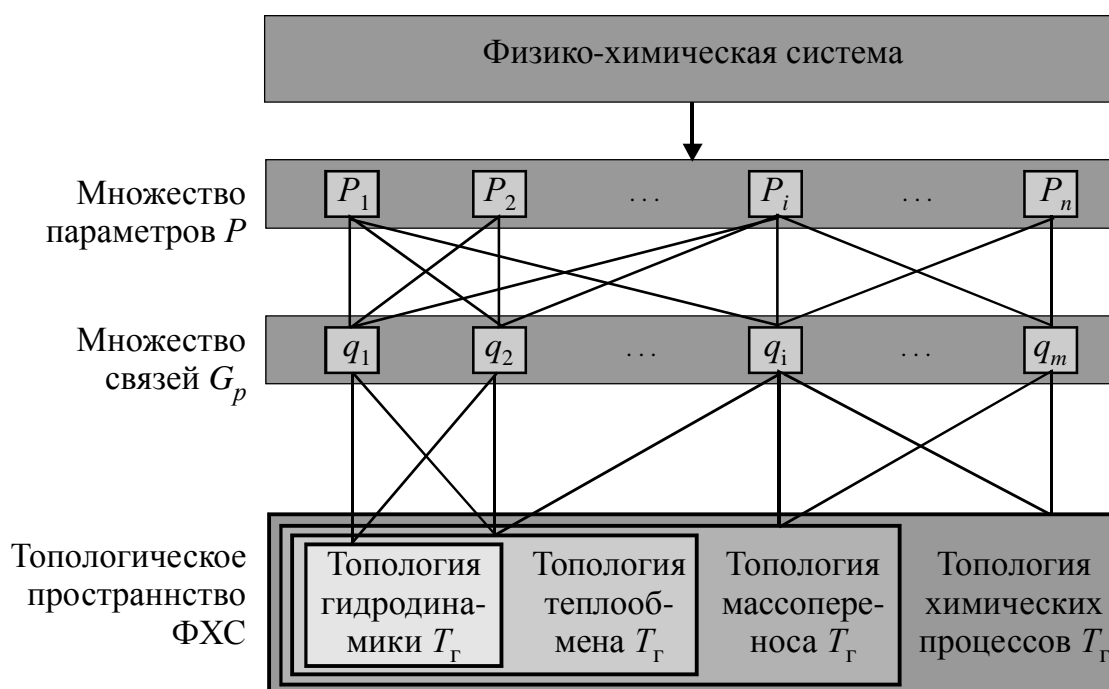


Рис. 1.1. Топологическая структура математических моделей ФХС

Согласно приведенной на рис. 1.1 структуре математической модели, любая моделируемая ФХС может быть представлена как топологическое пространство физико-химических процессов $T = f(P_i, G_j)$. На вход ФХС поступают потоки, характеризующиеся вектором u входных переменных, который под действием технологического оператора T преобразуется в вектор выходных переменных $y = T(u)$. Причем T соответствует реальному технологическому процессу и подставляется в виде совокупности простейших элементарных технологических операторов $T = \{T_1, \dots, T_n\}$.

Реальному технологическому оператору соответствует его математическая модель $y = \Phi(u)$, таким образом, с математической точки зрения каждую математическую ФХС можно представить как топологическое пространство физико-химических процессов $T_x = (G_p, P_g)$, где G_p – множество связей, P_g – множество параметров, характеризующих топологическое пространство T_x химических процессов [21].

2. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОЛОГИИ КЛИНКЕРА

2.1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Клинкер является промежуточным продуктом в технологии получения цементов. Получают клинкер в процессе обжига и спекания сырьевой смеси заданного состава. В результате обжига и спекания в клинкере обеспечивается необходимое содержание основных клинкерных минералов: трехкальциевого силиката ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_3S), двухкальциевого силиката ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S), а также образование алюминатов ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, C_3A) и алюмоферрита ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, C_4AF) кальция [22–28].

Исходными компонентами для получения клинкера являются природные сырьевые материалы и продукты промышленных отходов. Они должны содержать главные составляющие клинкера: оксид кальция CaO , кремнезем SiO_2 , глинозем Al_2O_3 и оксид железа Fe_2O_3 .

Классификация сырьевых материалов в зависимости от количественного соотношения карбонатного и глинистого компонентов представлена в табл. 2.1. В табл. 2.2 приводится химический состав карбонатных пород, в табл. 2.3 – глин, а в табл. 2.4 – корректирующих добавок, применяющихся в производстве цемента.

Таблица 2.1

Классификация карбонато-глинистых пород [26], мас. %

Порода	Содержание, мас. %	
	CaCO_3	CaO
Известняк	95 ... 100	53,2 ... 56,0
Известняк мергелистый	90 ... 95	50,4 ... 53,2
Мергель известковый	75 ... 90	42,0 ... 50,4
Мергель	40 ... 75	22,4 ... 42,0
Мергель глинистый	20 ... 40	11,2 ... 22,4
Глина мергелистая	5 ... 20	2,8 ... 11,2
Глина	0 ... 5	0,0 ... 2,8

Таблица 2.2

Химический состав карбонатных пород [26], мас. %

Компонент	Известняк	Мел	Мергель
SiO ₂	0,27 ... 10,89	0,85 ... 4,53	7,53 ... 18,14
Al ₂ O ₃	0,20 ... 3,20	0,25 ... 1,12	1,61 ... 5,46
Fe ₂ O ₃	0,19 ... 2,08	0,21 ... 0,73	0,90 ... 3,90
CaO	45,22 ... 55,10	53,39 ... 55,16	37,86 ... 50,61
MgO	0,26 ... 3,28	0,22 ... 0,91	0,34 ... 3,27
SO ₃	0,06 ... 0,93	до 0,47	0,16 ... 0,59
ППП	36,3 ... 43,35	41,24 ... 43,07	32,04 ... 38,4

Таблица 2.3

Химический состав глин [28], мас. %

Компонент	Глины			
	Мергелистая	Каолинистая	Красно-бурая	Суглинок
SiO ₂	47,95	48,77	66,74	71,50
Al ₂ O ₃	10,87	30,94	12,37	5,87
Fe ₂ O ₃	4,29	3,74	6,58	1,55
CaO	15,87	2,62	3,38	8,10
MgO	0,15	0,62	1,55	1,33
R ₂ O	2,68	–	–	–
SO ₃	0,16	0,25	–	0,20
ППП	18,03	13,06	11,26	9,00

Таблица 2.4

Химический состав корректирующих добавок, мас. %

Химический состав	Бокситы	Колчеданные огарки	Железная руда	Колошниковая пыль	Зола-унос	Диатомит	Песок
SiO ₂	16...22	6,6...25	20...25	11...22	26...36	77,0	99,2
Al ₂ O ₃	44...58	2...16	3...9	5...14	6,5...9,5	9,6	–
Fe ₂ O ₃	10...16	62...87	45...60	54...69	5...8	–	0,5
CaO	0,2...1,0	0,7...0,9	0,5...2,5	1...9	42...50	0,3	–
MgO	–	0,2...2	1,5...7	0,5...2,5	3...4	0,9	–
SO ₃	–	0,8...8	0,3...0,6	0,2...2,5	2,5...3	–	–
Na ₂ O	–	–	–	–	0,8...3,5	–	–
ППП	15...20	–	5...12	5...15	0,2...4,0	6,2	0,2

Корректирующие добавки вводят, когда карбонатный и глинистый компоненты не могут обеспечить получения сырьевой смеси необходимого состава. Для компенсации недостатка Fe_2O_3 обычно применяются огарки или железная руда, для Al_2O_3 – боксит, для SiO_2 – песок. Обычно используют одну или две корректирующие добавки, сырьевая смесь, таким образом, становится трех- или четырехкомпонентной. Но состав некоторых глинистых компонентов и мергелей обеспечивает необходимое соотношение оксидов, и возможно получение клинкера из двухкомпонентной смеси без использования корректирующих добавок.

В последнее время при приготовлении сырьевых смесей используются техногенные продукты, которые позволяют снизить расход топлива на обжиг. Например, доменные шлаки (табл. 2.5) содержат несвязанный в карбонат CaO , что снижает расход тепла на декарбонизацию.

Таблица 2.5

Химический состав доменных шлаков [29]

Шлак	Содержание, мас. %									КН	Модули	
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	R_2O	ППП	Прочие		<i>n</i>	<i>p</i>
№ 1	20,68	10,07	9,87	27,35	17,03	1,99	2,0	1,14	9,87	0,12	1,04	1,02
№ 2	35,6	12,12	0,74	34,7	10,3	2,0	0,6	0,94	3,2	0,14	2,77	16,36

Используются и различные выгорающие добавки, например отходы угледобычи, заменяющие в печи часть топлива.

2.2. СХЕМА ТЕХНОЛОГИИ ОБЖИГА КЛИНКЕРА

Цементная печь по мокрому способу производства представляет собой трубчатый реактор непрерывного действия с открытой системой, в котором по мере продвижения материала протекают различные физико-химические процессы. Изменение состава находящихся в реакторе ингредиентов происходит за счет теплообмена между газом и потоком обжигаемого материала. Приведение в соприкосновение твердой и газообразной фаз осуществля-

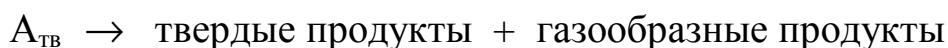
ется по принципу противотока. Основные процессы, протекающие в цементных печах, представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Основные процессы и химические реакции, протекающие в цементной печи

Но- мер зоны	Зона	Темпера- тура материала, °С	Длина зо- ны		Масса мате- риала	Основные физико- химические про- цессы
			%	м (1...185)		
I	Сушки (испарения)	20...200	25	45	2,5...1,5	Испарение воды
II	Подогрева	200...700	25	45	1,5	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \uparrow$ 0,2 кг/кг
III	Декарбонизации	700...1100	32	60	1,5...1	Декарбонизация $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
IV	Экзотермических реакций	1100...1300	3	5	1	Экзотермические реакции образова- ния минералов C_2S , C_3A , C_4AF
V	Спекания	1300...1450 1450...1300	12	25	1	Частичное плавле- ние, образование алита $\text{CaO} + \text{C}_2\text{S} = \text{C}_3\text{S}$
VI	Охлаждения	1300...1100	3	5	1	Охлаждение клин- кера, кристаллиза- ция

По характеру протекающих реакций вращающуюся печь можно отнести к реакторам химической технологии, в которых происходит некаталитический гетерогенный процесс в системе «газ – твердое тело» по схеме:



По способу организации процессов и своим характеристикам печь можно отнести к объектам химико-технологических производств. При этом процесс обжига необходимо рассматривать как автономную химико-технологическую систему (ХТС). Она включает собственно процесс, агрегат, в котором он реализуется, теплообменные устройства, устройства загрузки печи шламом, устройства горения топлива, тягодутьевые устройства, пылеулавливающие устройства отходящих газов, устройства охлаждения обожженного клинкера и рекуперации тепла, возвращаемого в печь, средства контроля и управления процессом, а также связи между ними.

Технологическая схема процесса обжига представлена на рис. 2.1. Эта схема характерна для печей размером 4,5×170 м, 5×185 м, 7×230 м, обладающих большой производительностью, соответственно 50, 72, 125 т клинкера в час. Наибольшее распространение в цементном производстве получили печи размером 5×185 м.

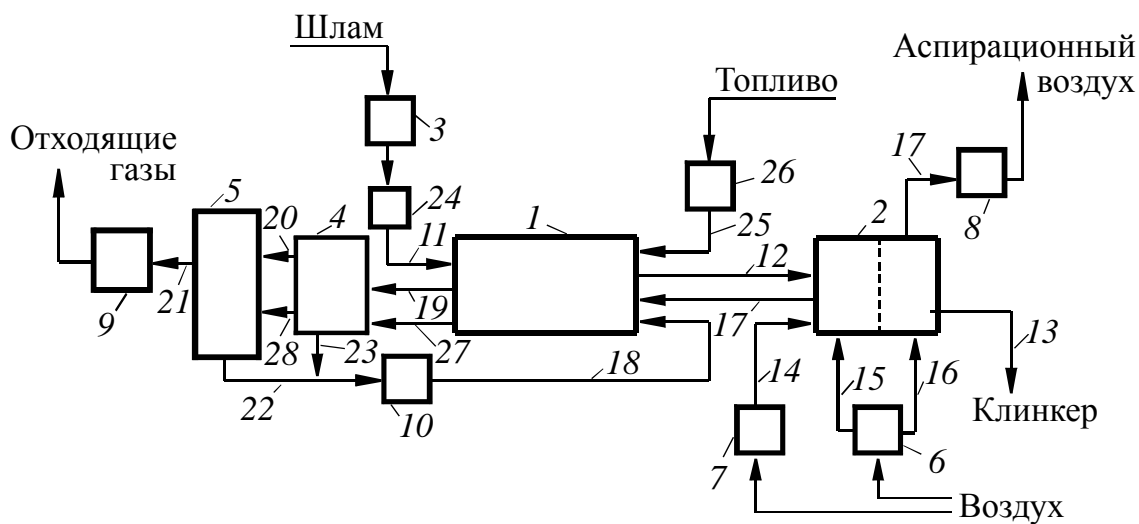


Рис. 2.1. Технологическая схема обжига клинкера:

1 – печь; 2 – холодильник; 3 – шлампитатель; 4 – пылесадительная камера; 5 – электрофильтры; 6, 7, 8 – вентиляторы общего, острого, аспирационного воздуха; 9 – дымосос; 10 – пневмовинтовой насос; 11 – поток шлама; 12, 13 – поток клинкера; 14, 15, 16, 17 – потоки общего, острого, аспирационного воздуха; 18, 22, 23 – потоки пыли, возвращаемой в печь; 19, 20, 21 – поток дымовых газов; 24 – регулятор подачи шлама; 25 – расход топлива; 26 – регулятор расхода топлива; 27, 28 – поток пыли, выбрасываемой из печи

Из изложенного выше видно, что цементная печь является химико-технологическим аппаратом, в котором одновременно протекают сложнейшие процессы: все виды теплообмена, горение топлива, синтез клинкерных минералов и получение клинкера, сушка, испарение, гранулообразование, формирование обмазки на поверхности огнеупорной футеровки, реакции разложения, твердофазное спекание и др. Каждый из названных процессов требует самостоятельного изучения, так как особенность их осуществления определяет специфические условия, которые отражаются на их интенсивности и эффективности.

2.3. НЕКОТОРЫЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ОБЖИГА

Условия обжига клинкера во вращающихся печах определяются способами производства, составом сырьевых смесей, размерами печей и вспомогательного оборудования. Процесс обжига клинкера в цементных печах имеет особенный специфический характер, причем работа крупных печей по целому ряду технологических параметров в значительной мере неудовлетворительна. Основными особенностями технологического процесса мощных печей является значительное увеличение их объема, в них наблюдается перемещение технологических зон, процесс клинкерообразования протекает при более высоких температурах, нередко образуется интенсивное пылеобразование как в подготовительных зонах печей, так и в основной зоне клинкерообразования. По данным, приведенным в работах [30–33], в мощных печах температура в зоне спекания выше, а пребывание материала на участке высоких температур более длительное, чем в печах меньших размеров [32].

В работах [30–32] установлено, что при обжиге клинкера в мощных печах и особенно работающих на повышенных оборотах происходит смещение технологических зон в сторону холодного конца печи. Это приводит к пересушке обжигаемого материала в подготовительных зонах и образованию большого количества быстротекущей по печи пыли.

Вследствие плохой грануляции клинкера и передержке его в зоне спекания довольно часто в мощных печах наблюдается ин-

тенсивное клинкерное пылеобразование, что создает трудности в управлении печью. В этих случаях из-за плохой воздухопроницаемости слоя пылевидного клинкера ухудшается процесс рекуперации тепла, снижается КПД холодильника, перегреваются и деформируются его решетки и как следствие происходят неоправданные потери тепла с выходящим из холодильника неохлажденным клинкером.

На некоторых заводах мощные вращающиеся печи имеют низкую стойкость футеровки, что в значительной степени объясняется плохим качеством образующейся обмазки в зоне спекания. Принято считать, что клинкерное пылеобразование и плохое качество обмазки зависят от недостатка жидкой фазы или ее высокой вязкости. Для нормализации этого явления в цементную сырьевую смесь обычно вводят плавни или минерализаторы, снижающие вязкость жидкой фазы, а также уменьшают значение силикатного модуля. Однако по данным, приведенным в работах [31, 32, 34, 35], в мощных печах это приводит к обратным результатам: клинкерное пылеобразование усиливается, обмазка ухудшается, учащаются прожоги футеровки.

3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ И СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ШЛАМОВЫХ СУСПЕНЗИЙ

3.1. ПРОБЛЕМЫ СНИЖЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ШЛАМА

Одним из способов интенсификации в технологии обжига клинкера и снижения расхода топлива является снижение влажности сырьевого шлама. Влажность шламов на цементных заводах обычно колеблется от 30 до 50%. В производственных условиях текучесть шлама, соответствующая технологическому режиму, устанавливается для каждого завода и зависит от физико-химических свойств сырья, его структуры и тонкости помола. Известно, что снижение влажности сырьевого шлама на 1% позволяет повысить производительность вращающейся печи на 1-1,5% и примерно на столько же снизить расход топлива [36].

Проблеме снижения вязкости шламов посвящено достаточно много работ, однако отсутствуют критерии, позволяющие выбрать наиболее оптимальный метод снижения влажности. Недостаточны знания о механизме действия разжижающих веществ. Многие цементные заводы используют пластификаторы, но тип разжижителя и его дозировка в большинстве случаев не обоснованы [37], и разжижители подбираются эмпирически для каждого конкретного случая [38, 39]. В результате этого десятки заводов России и стран СНГ вынуждены использовать шлам с высокой влажностью. Утверждается [37], что из-за высокой влажности шлама в печь подается от 8 до 10 т/ч лишней воды, что требует дополнительно 5...7% топлива на обжиг клинкера.

Обобщение данных показывает [40], что удельный расход тепла q_m на обжиг клинкера в печах мокрого способа прямо пропорционален влажности шлама, вычислить его можно с погрешностью не более 5...10% из соотношения

$$q_m = 170 \times K_w, \quad (3.1)$$

где K_w – влажность шлама, %.

Соотношение (3.1) показывает, что уменьшение влажности шлама на 1% снижает удельный расход тепла на 170 кДж на 1 кг клинкера, что равно экономии примерно 5,8 тыс. т условного топлива на 1 млн т клинкера.

Введение триполифосфата натрия в качестве разжижителя шлама на одном из цементных заводов США позволило снизить влажность шлама с 38 до 33,5%. При этом была установлена оптимальная величина пластификатора, которая равнялась 0,12%. Вводимый пластификатор состоял из трех частей триполифосфата натрия (по весу) и двух частей соды [41].

Исследования [42] показали, что добавка к меловому шламу глинистого компонента, представленного в основной массе (до 60%) монтмориллонитом, позволяет снизить вязкость шлама при одновременном снижении влажности. Добавка каолинита, как правило, улучшает реологические свойства шлама.

Анализ технической литературы, посвященной влиянию пластификаторов на реологические свойства шламов, позволяет сделать следующие выводы [43]:

1. В технологии получения клинкера используется достаточно широкий спектр техногенных сырьевых компонентов, которые, в свою очередь, оказывают воздействие на реологические свойства шламов.

2. Недостаточно изучено влияние минералогического состава глинистого и карбонатного компонентов на формирование реологических свойств сырьевых суспензий.

3. Отсутствуют методы и принципы выбора химических реагентов для улучшения реологических свойств конкретных сырьевых материалов.

4. Имеются резервы улучшения реологических свойств и снижения влажности шлама на целом ряде заводов и как следствие – повышение эффективности их работы.

5. Необходима разработка способов и методов оптимального регулирования реологических свойств сырьевых суспензий цементной промышленности, в том числе шламов, включающих техногенные продукты черной металлургии.

3.2. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ШЛАМОВЫХ СУСПЕНЗИЙ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ СРЕД

Цементные сырьевые шламы относятся к классу так называемых неньютоновских структурно-вязкопластичных жидкостей, вязкость которых зависит от режима течения. Свойства неньютоновских жидкостей изучает реология – наука о деформациях и текучести вещества, которая рассматривает процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением разнообразных вязких и пластичных материалов и дисперсных систем.

В табл. 3.1 представлены уравнения, описывающие реологические свойства вязкопластичных сред [44–46].

Таблица 3.1

**Уравнения, описывающие реологические свойства
вязкопластичных сред**

Свойства вязкопластичных сред	Уравнения	Обозначения, принятые в уравнении
1	2	3
Закон вязкого течения жидкостей, эмпирически установлен Исааком Ньютоном	$P = \eta \frac{du}{dx}$	η – коэффициент вязкости; $\frac{du}{dx}$ – градиент скорости сдвига
Деформация идеально упругих тел (законы Гука)	$P = E\varepsilon$	P – приложенное напряжение (отношение действующей силы к площади); E – модуль упругости
Уравнения В. Освальда и де Валле для вязкости растворов	$P = k \left(\frac{du}{dx} \right)^n$	k – коэффициент консистенции растворов; n – показатель, характеризующий поведение жидкости; $n > 1$ – жидкости обладают псевдопластическими свойствами; $n < 1$ – неньютоновские жидкости, вязкость возрастает с увеличением напряжения

1	2	3
Уравнение вязкоупругого тела Кельвина	$P = E\varepsilon + \eta \frac{du}{dx}$	По Кельвину, при снятии нагрузки деформация исчезает не мгновенно, а с некоторым запаздыванием
Уравнение Ф.Н.Шведова	$\eta_a = E\lambda + \frac{P}{V}$	η_a – аномальная вязкость; λ – период релаксации; E – модуль упругости; P – предельное напряжение сдвига; V – скорость деформации
Уравнение Е. Бенгама, описывает реологические свойства ряда суспензий	$\eta \frac{du}{dx} = P - P_0$	P_0 – предельное динамическое напряжение сдвига
Уравнение Шведова – Бенгама для описания реологических свойств вязкопластичных тел	$P = P_0 + \eta \frac{du}{dx}$	–
Уравнение Кэссона	$\sqrt{P} = K_1 + K_2 \sqrt{\dot{u}}$	k_1, k_2 – константы; P – напряжение одноосного сдвига; \dot{u} – градиент скорости сдвига
Уравнение Балкли и Гершеля	$P = P_0 + m \dot{u}^n$	P_0 – предел текучести; \dot{u} – градиент скорости сдвига; m – показатель консистенции; n – константа
Уравнение З.П.Шульмана (обобщенное уравнение)	$\sqrt[n]{P} = \sqrt[n]{P_0} + \sqrt[m]{\eta \dot{u}}$	P_0, n – константы, имеют размерности напряжения и вязкости

Представленные уравнения являются основной для описания и экспериментального исследования свойств шламовых суспензий.

3.3. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ ШЛАМОВ

Цементные сырьевые шламы представляют собой полидисперсные и полиминеральные суспензии, в которых твердая фаза представлена частичками известняка, кварца, глины и других минералов, а жидкая фаза – водой. Размер частиц колеблется от сотен ангстрем до 100 мкм и более. Крупные фракции представле-

ны обычно кварцем, известняком, полевым шпатом, а мелкие – глинистыми минералами, гидратами двуоксида кремния, оксида алюминия и железа. Вместе с тем сырьевые шламы рассматриваются и как полукolloидные системы, в которых частицы коллоидно-дисперсной фазы (мицеллы-ассоциаты) образованы скоплением молекул или ионов растворенного в дисперсной фазе вещества и находятся в равновесии с окружающим раствором [47–49].

Влажность шламов цементного производства колеблется в широких пределах, что обусловлено текучестью суспензий. В сырьевых шламах цементного производства различают четыре формы связанной воды. Их можно классифицировать в порядке убывания энергии связи [48, 50]: это химически связанная вода в виде гидроксильных ионов в гидратах и вода кристаллогидратов; абсорбционно связанная вода; свободная вода, механически захваченная дисперсной структурой.

Между указанными группами воды нельзя провести четкой границы. Так, адсорбционная вода, непосредственно прилегающая к поверхностному слою частичек, мало отличается от химически связанной воды. Свободная вода, находясь в большинстве случаев в пространстве между мицеллами, при высокой дисперсности частиц также вытесняется с большим трудом.

Считается, что в цементном сырьевом шламе каждая частица карбонатных пород или кварца окружена глинистой коллоидной пленкой. Размеры пленки колеблются в диапазоне от нескольких молекулярных слоев до одного микрометра. Глинистый компонент определяет способность к катионному обмену, что обуславливает разжижаемость шламов [51, 52]. При таком обмене разрушается коагуляционная структура, происходит уменьшение внутреннего трения, текучесть сырьевого шлама увеличивается.

Отмечается [49, 53], что минералогический состав и физико-химические свойства глинистого компонента оказывают решающее влияние на реологические свойства шламов, однако количественной оценки этих зависимостей не установлено. В этой связи одной из задач является определение влияния свойств пород на реологию сырьевых шламов.

В табл. 3.2–3.5 представлены основные свойства цементных сырьевых шламов, их классификация, пределы изменения, методы определения и описывающие свойства уравнения.

Технологические свойства шламов

Свойства шламов и их определение	Единица измерения	Уравнения, описывающие свойства	Пределы изменения свойства	Методы определения
Влажность шламов – отношение жидкой фазы шлама В к общей массе твердой Т и жидкой фаз В шлама	%	$w = \frac{В}{В+Т} \times 100\%$	30...50	Расчетная
Водопотребность шлама ВП – процентное отношение массы воды к массе твердой фазы в шламе	%	$ВП = \frac{В}{Т}$	45...100	Характеризуется по текучестемперу МХТИ
Текучесть шлама – способность растекаться под действием собственного веса	Мм	–	48...50	Определяют на текучестемпере МХТИ «ТМ–2» по распливу стандартного конуса
Электрокинетический потенциал (дзета-потенциал, или ξ -потенциал) определяется как разность потенциалов между границей прочно удерживаемого водного слоя и границей диффузионного слоя; r – ширина двойного электрического слоя; n_i – электрические явления обусловлены существованием на границе фаз избыточных зарядов, располагающихся в виде двух противоположно заряженных слоев, называемых двойным электрическим слоем	В	$r = \frac{k}{\sqrt{\sum n_i z_i^2}}$	$1,5 \cdot 10^{-5} \dots 7 \cdot 10^{-5}$	Измеряется на границе адсорбционного и диффузионного слоев. Ионоселективный метод, измеряется электродами ЭМ – Са – 01

Структурно-механические свойства шламов

Свойства шламов и их определение	Единица измерения	Уравнения, описывающие свойства	Пределы изменения свойства	Методы определения
1	2	3	4	5
Пластическая прочность P_m – численно характеризуется предельным напряжением структурированной системы. Определяет деформативные свойства структуры	Н/м ²	–	0,08...0,6	Определяют на каноническом пластомере Ребиндера
Предельное статическое напряжение сдвига P_k – это усилие, отнесенное к единице поверхности, которое надо приложить к суспензии, чтобы нарушить структурные связи и привести ее в движение. Оно соответствует течению при очень мало разрушенной структуре. Ниже предельного напряжения сдвига наблюдается течение с постоянной вязкостью, а выше – течение с переменной вязкостью	Н/м ²	–	8...160	Определяют на капиллярном вискозиметре системы Воларовича РВ – 8, который наиболее полно моделирует движение суспензии по шламопроводу
Предельное динамическое напряжение сдвига P_{k2} – напряжение, которое разрушает структуру системы. Оно постоянно и зависит от скорости наложения нагрузки: P_{m1} – граница области предельного разрушения структуры – предел текучести	Н/м ²	–	35...400	То же
Вязкость шлама η – условно-постоянная вязкость	Н·с/м ²	–	10...20	» »

1	2	3	4	5
Структурообразующая способность сырьевых шламов $K_{стр}$, где η_0 – вязкость практически не разрушенной структуры; η_m – вязкость предельно разрушенной структуры		$K_{стр} = \frac{\eta_0}{\eta_m}$	0,1...0,2	Рассчитывается
Текучесть шлама. K_T – величина, обратная вязкости	м ² /Н·с	$K_T = \frac{1}{\eta}$	0,05...0,1	»
Период релаксации θ_1 – это время, в течение которого упругое напряжение спадает до нуля, E – модуль упругости	с	$\Theta_1 = \frac{\eta_1}{E}$	150...500	»
Статическая пластичность по Воларовичу Π_c	с ⁻¹	$\Pi_c = \frac{P_{k1}}{\eta_1}$	$4 \cdot 10^{-6} \dots$ $\dots 20 \cdot 10^{-6}$	»
Динамическая пластичность по Воларовичу Π_d	с ⁻¹	$\Pi_d = \frac{P_{k2}}{\eta_T}$	10...120	»

Таблица 3.4

Упругопластические свойства шламов

Свойства шламов и их определение	Уравнения, описывающие свойства	Методы определения
1	2	3
Динамика деформации ε – изменение формы, где η_1 – наименьшая пластическая вязкость; P – постоянная нагрузка при испытании, Н/м ² ; E_1 – модуль упругости сдвига; P_{k1} – условный статический предел текучности, Н/м ²	$\varepsilon' = \frac{P}{E_1} + \frac{P - P_{k1}}{\eta_1} +$ $+ \frac{P}{E_2} \left(1 - e^{\frac{-\tau E_2}{\eta_2}} \right);$ $\eta_1 = \frac{P - P_{k1}}{d\varepsilon/d\tau}, \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$	Измеряют методом тангенциального смещения рифленной пластинки на приборе Вейлера – Ребиндера

1	2	3
<p>Суммарная деформация, развивающаяся за время τ включает три вида деформации</p> <p>Быстрая эластическая деформация ϵ_0 характеризует упругие свойства коагуляционной структуры</p> <p>Медленная эластическая деформация ϵ_2 – результат скольжения частиц дисперсной среды относительно друг друга без разрыва молекулярных связей</p> <p>Пластическая деформация ϵ_τ, характеризуется необратимостью, ее развитие определяется переходом через условный статический предел текучести. При снятии нагрузки $P = 0$ система не возвращается в исходное состояние. Конечное состояние отличается от начального на величину остаточной пластической деформации ϵ</p>	$\epsilon_0 = \frac{P_a}{E}$ $\epsilon_2 = \frac{P}{E_2}$ $\epsilon_\tau = \frac{P - P_k}{\eta_1}$	Рассчитывается

Таблица 3.5

**Влияние различных факторов на подвижность
и структурно-механические свойства шламов**

Факторы, влияющие на подвижность шламов	Единица измерения	Значение	Результаты воздействия	Библиографические источники
1	2	3	4	5
Термообработка (нагрев суспензий)	°С	20...70	Повышение текучести, подвижности и структурированности шлама. Изменение вязкопластических свойств неодинаково для различных сырьевых смесей и заводов. Эффективный способ управления реологическими свойствами шлама	[43, 45, 48]

Окончание табл. 3.5

1	2	3	4	5
Предварительная термообработка глин	°С	300...600	Удаление химически связанной воды; снижение коллоидальных свойств и способности к набуханию; повышение текучести шламов в отдельных случаях до 124%; снижение влажности шламов на 4...6%	[49, 54, 55]
Гидротермальная обработка	МПа с °С	70...120 60...3600 200...460	Снижение вязкости шламов	[55]
Механическое перемешивание	–	–	Разрушение структуры и увеличение текучести	[55, 56]
Виброобработка шлама (частота колебаний, амплитуда)	Гц мм Гц	33...83 2...0,5 96...166	Снижение влажности шлама на 5...9%, в потоке на 1,5...6,0%, в неподвижном слое на 9...13%	[37, 40, 55]
Ультразвуковая обработка частота ультразвука	кГц	30...1000	Интенсификация физико-химических процессов; разжижение шламов; разрушение агрегативных образований	[55, 56]
Обработка в магнитном поле	–	–	Увеличение подвижности	[41, 42, 55]
Влияние химических реагентов	–	–	Развитие пластичных деформаций; изменение быстрозластических деформаций; повышение текучести; снижение структурной устойчивости; снижение энергии связи между частицами шлама	[48, 49, 55, 57, 58]

Таким образом, в таблицах 3.2–3.4 приведены основные технологические, структурно-механические и упругопластические свойства шламов. В таблице 3.5 показано влияние различных факторов на подвижность и структурно-механические свойства шламов.

3.4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШЛАМА ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТА

Для исследования физико-химических, коллоидно-химических и структурно-химических свойств сырьевых шламов, а также их исходных компонентов были использованы химический, петрографический, рентгеноструктурный, дифференциально-термический методы анализа, использована ядерная γ -резонансная спектметрия. Дифференциальная количественная оценка структурно-механических свойств дискретных систем производилась на реометрах – ротационном вискозиметре ВСН–3 и текучестемере МХТИ «ТН–2».

Сырьевые материалы и продукты обжига подверглись рентгенофазовому анализу на дифрактометре ДРОН–3 в интервале двойных углов $6...64^\circ$ по методу порошковых дифрактограмм [59, 60]. Измерение дифрактограмм производилось линейкой – шаблоном по таблицам межплоскостных расстояний, а расшифровка – по справочнику [61]. Структура получаемых при обжиге клинкеров определялась методом полированных аншлифов в отраженном свете [62].

Исследование процессов, протекающих при нагревании и охлаждении образцов, осуществляли на дериватографе $Q-1500D$ фирмы «МОН» (ВНР). Получение всех кривых ДТА проводили с образцом одинаковой массы 310 мг в одном и том же платиновом тигле при одинаковом режиме работы аппарата. Скорость подъема температуры до 1450°C составляла 15 градусов в минуту.

Седиментационные свойства шламов оценивались по изменению осветленного объема шлама [54, 63], залитого в одинаковые цилиндры емкостью $5 \cdot 10^{-4}$ м. При этом через 0,25; 0,5; 1 и 2 суток отбирались пробы шлама на разных уровнях цилиндров для определения влажности, плотности и содержания частиц размером более $2 \cdot 10^{-4}$ и $8 \cdot 10^{-5}$ м (остатки на ситах № 02 и 008). Измерялись также статические напряжения сдвига в этих пробах. Концентрация ионов кальция и водорода определялась иономером ЭВ–74.

Для изучения воздействия вибрации на реологические свойства шламов были разработаны вибраторные установки (рис. 3.1, 3.2).

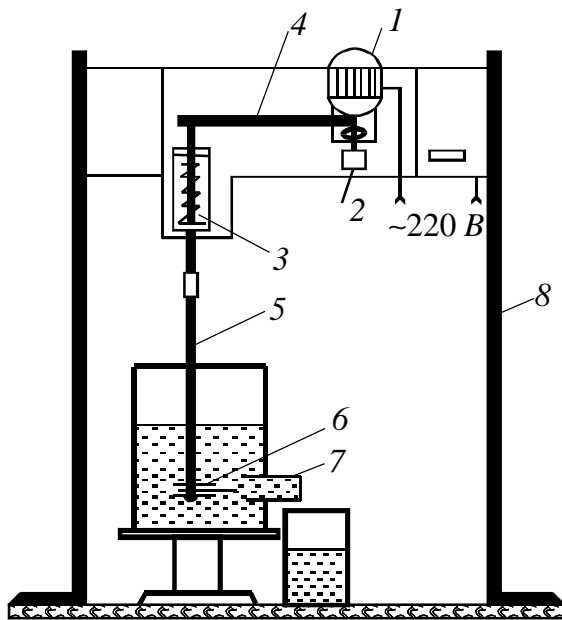


Рис. 3.1. Установка для изучения вязкопластичных свойств суспензий:

1 – электродвигатель; 2 – счетчик оборотов; 3 – возвратная пружина; 4 – качалка с роликом; 5 – шток; 6 – рабочий орган; 7 – капилляр; 8 – штатив

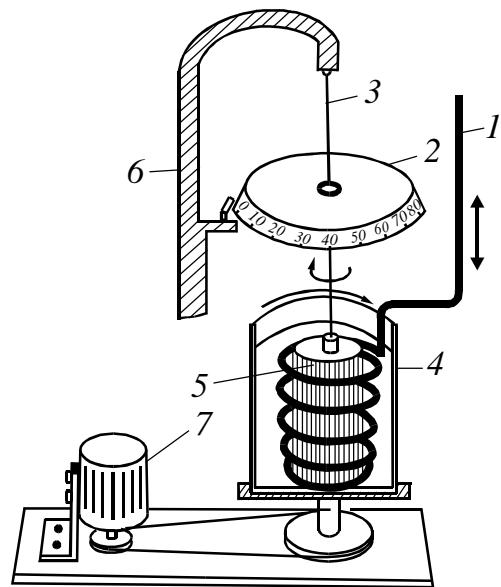


Рис. 3.2. Установка для изучения статического напряжения сдвига суспензий:

1 – шток; 2 – шкала измерения; 3 – нить цилиндра; 4 – емкость; 5 – цилиндр; 6 – штатив; 7 – электродвигатель

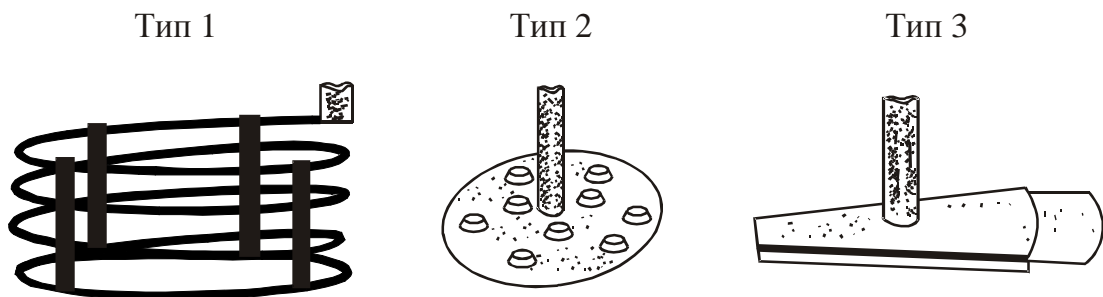


Рис. 3.3. Рабочие органы установки для изучения вязкопластичных свойств суспензий

На приборе (см. рис. 3.1) исследовались вязкопластические свойства шламовых суспензий, которые в последующем подвергались виброобработке. Вязкопластические свойства оценивались по скорости истечения суспензий через капилляры различного сечения. Устройство вибратора позволило производить замену

вибрирующих органов (рис. 3.3), характеризующихся различным насосным эффектом. Это позволило определить влияние конструктивных особенностей вибраторов на скорость истечения суспензий и, следовательно, на изменение их реологических свойств.

На установке (см. рис 3.3) изучалось влияние вибровоздействия на структурно-механические свойства шламовых суспензий. Критерием оценки этих свойств являлось изменение статического напряжения сдвига в результате воздействия виброорганов на шлам.

Реологические свойства шламовых суспензий можно также оценить по величине расплыва конуса. В этом случае реологические свойства шлама зависят от сил внутреннего трения частиц, сил когезии и взаимодействия жидкости с измерительным элементом. На рис. 3.4 представлена схема действия сил в случаях использования текучестемера МХТИ «ТМ-2».

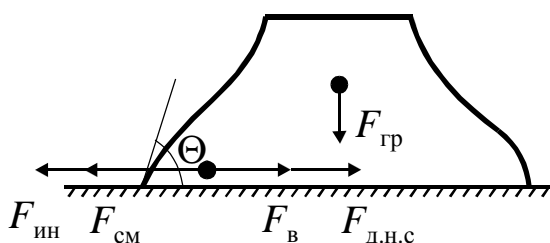


Рис. 3.4. Факторы, влияющие на величину расплыва конуса

Во время расплыва суспензии на поверхности стекла на исследуемую массу суспензии действуют силы гравитации $F_{гр}$, смачивания $F_{см}$ и инерции $F_{ин}$. Этим силам противодействуют силы, обусловленные пластической вязкостью $F_{в}$ и предельным динамическим напряжением сдвига $F_{д.н.с}$ суспензий. В случае уравновешивания этих сил можно записать

$$F_{гр} + F_{см} + F_{ин} = F_{в} + F_{д.н.с}. \quad (3.2)$$

Движение элементарного объема под действием сил тяжести $F_{гр}$ может быть описано системой уравнений [64]:

$$\rho \frac{D \omega_x}{dt} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 \omega_x + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} (\text{div } \omega); \quad (3.3)$$

$$\rho \frac{D \omega_y}{d\tau} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 \omega_y + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial y} (\operatorname{div} \omega); \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{D \omega_z}{d\tau} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 \omega_z + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial z} (\operatorname{div} \omega). \quad (3.5)$$

В левой части уравнений (3.3) – (3.5) производная $D\omega/d\tau$ представляет полную производную скорости во времени, по оси x она представлена уравнением

$$\frac{D \omega_x}{d\tau} = \frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \omega_x}{\partial z}, \quad (3.6)$$

аналогично по осям y и z .

Величины g_x, g_y, g_z – компоненты ускорения массы в направлении отдельных осей координат; μ – коэффициент вязкости; ∇^2 – оператор Лапласа.

Сжимаемость реальной суспензии учитывается последним слагаемым правых частей уравнений (3.3) – (3.5), где дивергенция вектора ω

$$\operatorname{div} \omega = \lim_{v \rightarrow 0} \frac{\int \omega ds}{v}, \quad (3.7)$$

где v – произвольный объем суспензии; ds – элементарная площадь потока суспензии сечения s_0 ; $\operatorname{div} \omega$ рассчитывают по формуле

$$\operatorname{div} \omega = \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z}. \quad (3.8)$$

Мерой смачивания $F_{\text{см}}$ служит краевой угол Θ между смачиваемой поверхностью и поверхностью растекающегося шлама (см. рис. 3.4) на периметре смачивания. Величиной угла Θ оцени-

вают лиофильность или лиофобность поверхностей по отношению к различным жидкостям. На лиофильной поверхности суспензия шлама растекается и имеет место, когда угол Θ находится в пределах $0^\circ < \Theta < 90^\circ$.

Численное значение сил смачивания $F_{см}$ зависит от поверхностного натяжения жидкой фазы суспензии, которое в значительной мере меняется при добавлении поверхностно-активных веществ (ПАВ), меняется при этом также и период релаксации суспензий, что, в свою очередь, сказывается на силах инерции $F_{ин}$, увеличивая растекаемость.

Вторая группа сил (см. рис. 3.4) обусловлена пластической вязкостью и предельным напряжением сдвига суспензий. Исследование структурно-механических свойств цементно-сырьевых шламов выполнено на ротационном вискозиметре ВСМ-3, предназначенном для измерения реологических характеристик вязкопластичных тел при градиентных скоростях сдвига 0,22; 220; 330; 440; 660 с^{-1} [58, 65].

На рис. 3.5 представлена типовая реограмма зависимости градиента скорости сдвига от напряжений сдвига, где p_0 – предельное динамическое напряжение сдвига. Углы α_1 и α_2 к касательным в точках А и В представляют коэффициенты вязкости μ_1 и μ_2 :

$$\mu_1 = \text{tg } \alpha_1;$$

$$\mu_2 = \text{tg } \alpha_2,$$

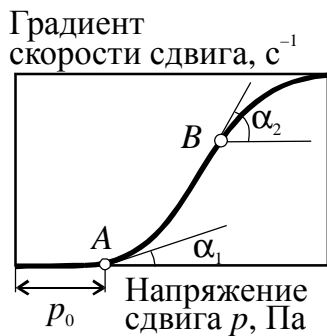


Рис. 3.5. Реограмма сырьевого шлама

Статическое напряжение сдвига определялось из уравнения Бакли – Гершеля [66, 67]:

$$p = p_0 + m \dot{\gamma}^n, \quad (3.9)$$

где p_0 – предел текучести (см. рис. 3.5); \dot{i} – градиент скорости одноосного сдвига, с^{-1} ; m – показатель консистенции; n – константа, характеризующая свойства суспензии.

Для определения пластической вязкости η с помощью ротационных вискозиметров ВСН–3 было выбрано уравнение

$$\eta = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2) (\dot{i}_v^m - \dot{i}_M^m)}{\Delta \dot{i} \dot{i}^m} A, \quad (3.10)$$

где

$$m = \frac{\lg \frac{\alpha_4 - \alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_0}}{\lg \frac{\dot{i}_4}{\dot{i}_1}};$$

\dot{i} – градиент скорости сдвига, с^{-1} ; $\dot{i}_v = \dot{i} + \Delta \dot{i}$, $\dot{i}_M = \dot{i} - \Delta \dot{i}$ – градиенты скорости сдвига в районе исследуемого отрезка кривой реограммы (рис. 3.5); $\Delta \dot{i}$ – размер участка реограммы; A – постоянная изгиба; α_0 , α_1 и α_4 – углы поворота измерительного элемента ротационного вискозиметра при фиксированных градиентах \dot{i}_0 , \dot{i}_1 и \dot{i}_4 .

Исследование реологических свойств сырьевых шламовых суспензий представлено на рис. 3.6–3.9. На рис. 3.6 показана зависимость изменения консистенции шламовых суспензий m от объемного содержания в ней твердой фазы; на рис. 3.7 – изменения пластической вязкости η от содержания твердой фазы γ в шламе; на рис. 3.8 – изменение статического напряжения сдвига $\Theta_{\text{ст}} = f(\gamma)$; на рис. 3.9 представлена зависимость эффективной вязкости $\mu_{\text{эф}} = f(\gamma)$ от массового содержания твердой фазы в шламовой суспензии. Все четыре характеристики – консистенция m , пластическая вязкость η , статическое напряжение сдвига $\Theta_{\text{ст}}$ и эффективная вязкость $\mu_{\text{эф}}$ – достаточно полно характеризуют шламовую суспензию сырьевой смеси.

Графики на рис. 3.6 – 3.9 показывают, что эффективность действия показателя вязкости, в частности ЛСТ, зависит от содержания твердой фазы. Пластическая вязкость η и предел текучести (статическое напряжение сдвига $\Theta_{ст}$) наиболее эффективно снижаются при добавлении разжижителя в область высокой концентрации твердой фазы.

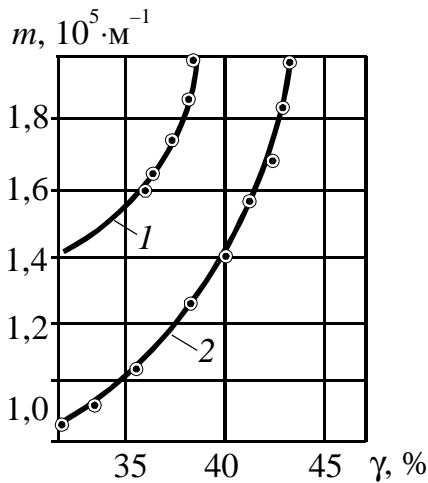


Рис. 3.6. Влияние содержания твердой фазы u и пластификатора ЛСТ на консистенцию шлама m : 1 – бездобавочный шлам; 2 – шлам с добавкой ЛСТ, 0,3 мас. %

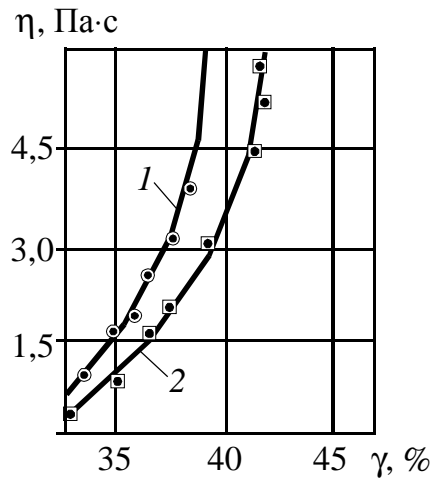


Рис. 3.7. Влияние содержания твердой фазы g и пластификатора ЛСТ на пластическую вязкость шлама h : 1 – бездобавочный шлам; 2 – шлам с добавкой ЛСТ, 0,3 мас. %

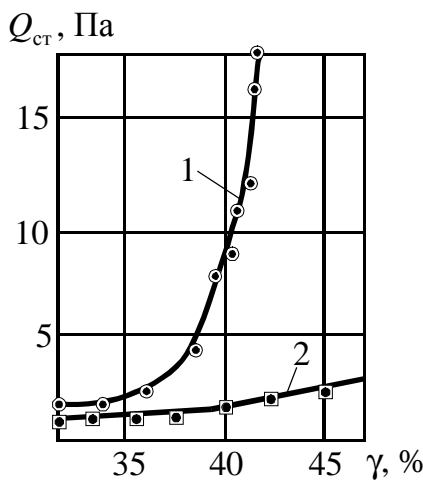


Рис. 3.8. Влияние содержания твердой фазы g и пластификатора ЛСТ на статическое напряжение сдвига шлама $\Theta_{ст}$: 1 – бездобавочный шлам; 2 – шлам с добавкой ЛСТ, 0,3 мас. %

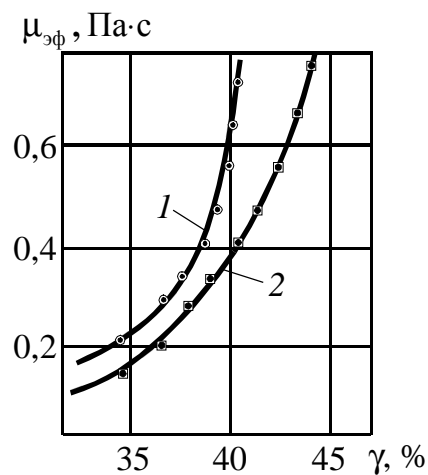


Рис. 3.9. Влияние содержания твердой фазы g и пластификатора ЛСТ на эффективную вязкость шлама $\mu_{эф}$: 1 – бездобавочный шлам; 2 – шлам с добавкой ЛСТ, 0,3 мас. %

На рис. 3.10 показана полученная зависимость пластической вязкости η и статического напряжения сдвига $\Theta_{ст}$ от величины концентрации m сырьевого шлама Белгородского цементного завода. На рис. 3.11 представлена зависимость $\Theta_{ст} = f(m)$ статического напряжения сдвига от консистенции шламовой суспензии сырьевой смеси.

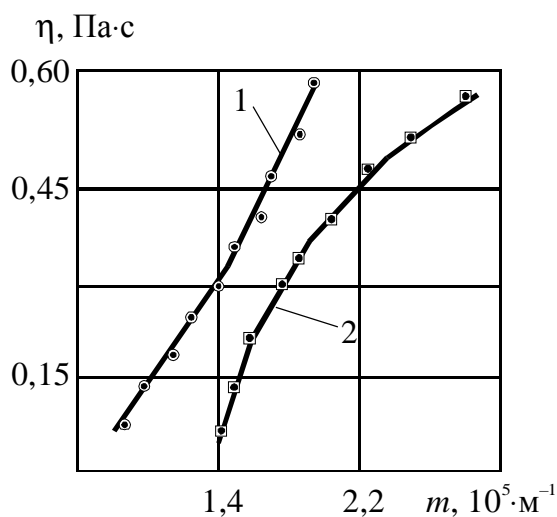


Рис. 3.10. Влияние консистенции m на пластическую вязкость шлама h : 1 – шлам; 2 – шлам с добавкой ЛСТ, 0,3 мас. %

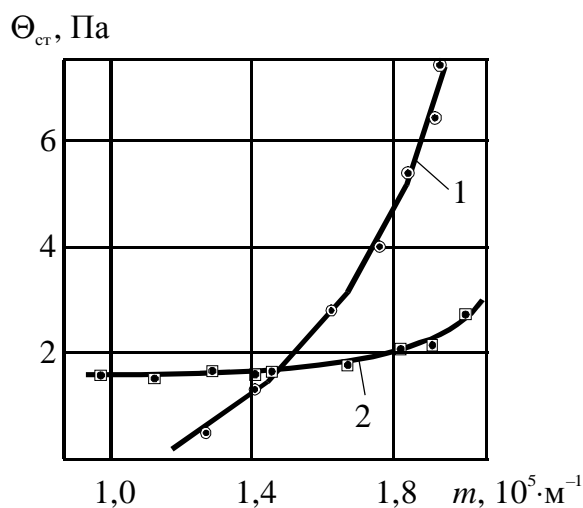


Рис. 3.11. Влияние консистенции m на статическое напряжение $q_{ст}$: 1 – шлам; 2 – шлам с добавкой ЛСТ, 0,3 мас. %

Анализ представленных зависимостей на рис. 3.6 – 3.11 позволяет сделать вывод, что силы смачивания и силы поверхностного натяжения жидкой фазы суспензии в значительной мере меняются при добавлении ПАВ в суспензии. При этом многократно меняется также и период релаксации суспензии, что, в свою очередь, доказывает большое влияние на силы инерции и увеличение растекаемости.

В этой связи при введении ПАВ в суспензию силы смачивания и инерции изменяются и меняют показания прибора, так что текучестемер показывает значительную эффективность ПАВ даже в концентрированных суспензиях. Это необходимо было учитывать при выборе реометров для исследования шламов и других суспензий с вводом пластификаторов ПАВ.

3.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ПЛАСТИФИКАТОРОВ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИЙ В ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТА

Реологические свойства цементных сырьевых шламов в значительной мере определяются глинистой составляющей, характеристики которой, в свою очередь, зависят от ее минералогического состава [57, 68]. Влияние карбонатного компонента на реологию шламов проявляется в меньшей степени [69] и определяется, главным образом, взаимодействием глинистого компонента с продуктами деструкции карбоната кальция, которые образуются в результате механохимических реакций при помоле. Факторы формирования реологических свойств шламов в процессе их приготовления исследованы недостаточно.

В этой связи изучалось влияние группы пластификаторов на реологические свойства цементных шламов различного минералогического состава в процессе их приготовления и хранения. Для исследования были выбраны модельные шламы, содержащие отдельные глинистые минералы, наиболее характерные виды для сырьевых материалов цементной технологии; это каолинит, монтмориллониты, гидрослюдистые глины, состоящие из продуктов деградации слюд гидромусковитового типа [45, 57, 58, 69, 70].

Характер разрушения исходных материалов определяется твердостью карбонатных компонентов, поэтому в состав сырьевых смесей включались мягкие и твердые карбонатные породы. В качестве мягкого компонента использовался мел Белгородского месторождения, а в качестве твердого – известняк Яшкинского цементного завода. Химический состав компонентов, из которых готовились шламы, представлен в табл. 3.6. После приготовления шламы имели $KH = 0,92$ и $p = 1,2$; их помол проводился в присутствии понизителей вязкости до остатков 6...8% на сите № 008 и 0,9...0,6% на сите № 09.

При этом определялась зависимость величин пластической вязкости, статического напряжения сдвига, активности ионов Ca^{2+} и OH^- и электродного потенциала от концентрации добавок электролитов и органических реагентов в отдельных сырьевых компонентах и в суспензиях сырьевого шлама.

Химический состав компонентов сырьевых шламов

№ п/п	Компоненты сырьевого шлама	Содержание оксидов, %						ППП, %
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	
1.	Мел белгородский	1,55	0,80	0,06	54,53	0,28	0,93	42,50
2.	Известняк яшкинский	1,71	0,81	0,46	52,80	1,02	0,19	42,20
3.	Монтмориллонит натрие- вый дашсахалинский	59,40	16,85	7,20	2,76	2,59	3,06	5,24
4.	Монтмориллонит каль- циевый черкасский	56,80	19,17	4,57	0,55	1,58	0,34	11,46
5.	Глина каолиновая прося- новская	49,40	34,53	0,50	0,56	0,32	1,23	12,40
6.	Глина гидрослюдистая новооскольская	66,20	20,05	1,05	0,88	–	2,60	7,98
7.	Огарки пиритные Вос- кресенского химкомбина- та	17,81	2,97	73,10	1,90	1,51	0,06	–

Примечание. В яшкинском известняке содержится 0,20 мас.% SO₃, а в пиритных огарках – 2,34 мас. % SO₃.

Реологические свойства шламов характеризуются пластической вязкостью и статическим напряжением сдвига. Эти параметры определялись ротационным вискозиметром ВСН–3, на котором моделировались условия, характерные для всасывающего участка трубопровода шламовых насосов, так как этот участок лимитирует влажность шлама на цементных заводах [71, 72]. Исходя из этого, градиент скорости сдвига шлама был принят равным 42 с⁻¹.

Активность ионов Ca²⁺ и OH⁻ определялась на иономере ЭВ–74. Измерения указанных параметров проводились на свежеприготовленных шламах, а также после их двухсуточной выдержки и последующего перемешивания.

После введения в состав шламов в качестве пластификатора технического лингосульфата кальция (ЛСТ), углещелочного реагента (УЩР), триполисульфата натрия (ТСФ) и кальцинированной соды, были получены данные об изменении реологических свойств исследуемых шламов. Результаты замеров пластической вязкости и статического напряжения сдвига исследуемых

суспензий представлены табл. 3.7 и рис. 3.12. Необходимо заметить при этом, что кальцинированная сода довольно часто используется совместно с органическими понизителями вязкости.

Анализ графиков, представленных на рис. 3.12, и данных табл. 3.7 позволяет сделать вывод о том, что ЛСТ хорошо снижает пластическую вязкость и статическое напряжение сдвига суспензий, содержащих гидрослюда, каолин и кальциевый монтмориллонит. Воздействие этого реагента менее заметно в смесях, составленных на основе натриевого монтмориллонита (см. рис. 3.12, *a*), и в целом по всей группе изученных смесей ЛСТ в меньшей степени влияет на снижение статического напряжения сдвига, чем УЦР.

Таблица 3.7

Результаты замеров пластической вязкости и статического напряжения сдвига суспензий после введения реагентов

Номера суспензий	Состав суспензий (номера компонентов по табл. 3.2)	Изменение величины пластической вязкости суспензии, %				Изменение величины статического напряжения сдвига суспензии, %			
		Без добавки	С добавкой 0,5 мас. %			Без добавки	С добавкой 0,5 мас. %		
			ЛСТ	УЦР	ТСФ		ЛСТ	УЦР	ТСФ
1	1	0	-53,5	-47,4	-32,9	+0,2	-16	0	-26,2
2	2	0	0	-4,2	+17,2	0	+12,5	-6,1	+20,6
3	3	+7,9	+50,0	+29,2	+38,3	+16,1	+8,4	-21,4	+36,4
4	4	+4,3	+23,9	+10,0	+38,9	+4,2	+88,9	+77,8	+12,2
5	5	0	+15,4	0	220,0	0	0	-8,5	-5,6
6	6	0	+18,1	+23,2	+13,5	0	+4,2	+15,4	0
7	1+3+7	+4,5	+13,5	0	+39,9	+2,2	+3,8	+68,2	+29,1
8	1+4+7	+0,5	+4,0	-3,7	+4,6	0	+33,2	+22,2	+3,4
9	1+5+7	+0,6	-47,5	-17,8	-17,1	0	-54,5	-7,7	-66,7
10	1+6+7	0	0	-8,1	-13,4	0	-62,5	+14,3	0
11	2+3+7	+4,3	+6,5	+53,1	+105,9	+2,0	+38,2	+61,8	+36,0
12	2+4+7	+0,4	+0,69	-48,4	+5,2	0	0	72,7	+7,9
13	2+5+7	0	+4,7	-1,6	+17,4	0	-4,5	0	-6,7
14	2+6+7	0	+6,9	-3,0	229,9	0	-7,7	-13,3	14,9

Примечание. (+) – увеличение; (–) – уменьшение.

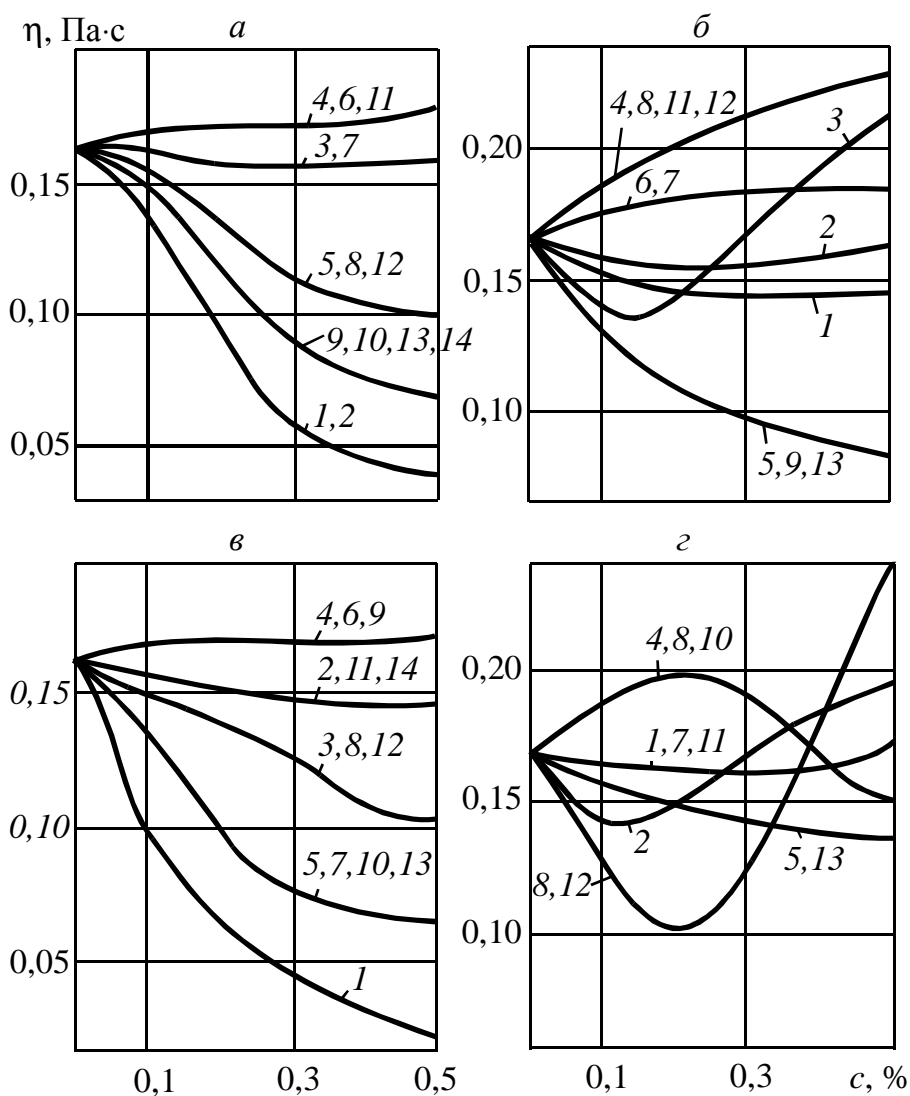


Рис. 3.12. Зависимость величины пластической вязкости от концентрации лигносульфоната кальция (*а*), углещелочного реагента (*б*), триполисульфата натрия (*в*) и кальцинированной соды (*г*) в суспензиях

В свою очередь, УЩР, являясь анионоактивным органическим соединением, разрушает структуру как суспензий мела, так и шламов, приготовленных на его основе. УЩР малоэффективен в суспензиях, приготовленных на основе известняка, гидрослюдистых и кальциево-монтмориллонитовых глин (рис. 3.12, б). Основной причиной низкой эффективности УЩР в этом случае является образование в шламе нерастворимых гуматов кальция. А шламы, включающие в качестве пластификатора натриевые монтмориллониты, имеют в процессе хранения повышенную склонность к загустеванию (см. табл. 3.7).

Триполифосфат натрия снижает вязкость каолиновых суспензий почти в 2 раза, при этом они не густеют при хранении. Вязкость остальных суспензий этот реагент снижает в малой степени (рис. 3.12, в). При дозировках 0,15...0,20% и выше ускоряются процессы структурообразования, наблюдается неустойчивость реологических характеристик во времени (см. табл. 3.7).

Кальцинированная сода снижает вязкость суспензий каолина в 1,5 раза, для остальных глинистых суспензий эта добавка неэффективна (рис. 3.12, г). Добавление в приготовленные шламы триполифосфата натрия и технической соды сопровождается уменьшением активности ионов кальция и увеличением активности гидроксильных ионов в дисперсной среде.

Цементные шламы, приготовленные на основе известняка и натриевого бентонита, имеют большую склонность к загустеванию при последующем хранении (см. табл. 3.7). Причиной этого является образование гидросиликатов в дисперсионной среде сырьевых суспензий в результате взаимодействия гидроксида кальция, получающегося при механохимической деструкции карбоната кальция, с кремнеземсодержащими компонентами шлама. Для предотвращения этого явления можно использовать замедлители гидратации гидросиликатов и других соединений, обладающих вяжущими свойствами. Кроме того, можно использовать метод выделения из раствора ионов кальция по мере их образования при помеле в осадок в виде нерастворимых соединений.

Следует отметить, что если между компонентами шлама не происходит достаточно интенсивного физико-химического взаимодействия, то его реологические свойства являются аддитивной суммой свойств компонентов. Иначе реологические свойства смесей не имеют прямой зависимости от свойств компонентов, особенно это заметно в суспензиях на основе известняка.

Ионы кальция, содержащиеся в жидкой фазе суспензий, часто оказывают влияние на действие пластификаторов. Особенно подвержены влиянию ионов кальция реагенты, содержащие карбоксилатные и другие функциональные группы, образующие с ионами кальция малорастворимые соединения (углещелочной реагент, водорастворимые фосфаты, карбоксиметилцеллюлоза и др.). Слабо подвержены действию этих ионов лигносульфонаты. Необходимо стремиться защитить реагент – понизитель вяз-

кости от выделения его в осадок как нерастворимого соединения. При помоле мела механические реакции менее интенсивны (в сравнении с известняком), поэтому жидкая фаза меловых суспензий содержит меньше ионов кальция и менее агрессивна по отношению к глинам и реагенту – понизителю вязкости.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что влияние пластификаторов обусловлено минералогическим составом дисперсной среды и характером взаимодействия реагентов исследуемой системы. Реагенты, которые эффективны для снижения вязкости суспензий одного состава, могут быть неэффективны либо увеличивать вязкость суспензий другого состава.

Замечено также, что известняк оказывает большое влияние на реологические свойства шлама. В процессе помола в суспензиях регистрируется повышенная активность ионов Ca^{2+} и OH^- , причем, чем ниже концентрация ионов OH^- в дисперсионной среде глинистого компонента и выше его дисперсность, тем ощутимее ухудшаются реологические свойства и затрудняется сохранение суспензий во времени. Учитывая неоднозначное действие понизителей вязкости на реологические свойства суспензий, необходимо учитывать их влияние на свойства шламов при проектировании сырьевых смесей на различных цементных заводах.

3.6. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИЙ МЕТОДАМИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для оценки влияния физико-механического воздействия на реологические свойства суспензий проводилось изучение шламов Балаклейского, Амвросиевского, Каменец-Подольского и Николаевского цементных заводов [45, 57, 58, 70].

Экспериментальная часть работы выполнялась по методике, представленной выше. При этом было использовано три типа рабочих органов, показанных на рис. 3.3. Виброустановка имела регулируемую частоту в диапазоне от 0 до 50 Гц, при этом использовались бездобавочные шламы с титрами $76 \pm 1,5\%$ и растекаемостью 52, 56, 60 мм. На выходе емкости, в которую помещался испытуемый шлам, устанавливались два вида капилляров – диаметром 13 мм и 15 мм, влажность шлама менялась от 37,1 до 50,2% .

Результаты исследований влияния частоты $V_{\text{шл}} = F(f)$ вибрации рабочего органа на объемный расход шлама представлены на рис. 3.13 и в табл. 3.8, при этом изучалось влияние частоты рабочего органа с учетом его формы.

Таблица 3.8

Регулируемые параметры реологических свойств шламов

Регулируемый параметр шлама	Номер наблюдения					
	1	2	3	4	5	6
Влажность шлама, %:						
БЦШК	37,1	37,1	38,1	38,1	41,6	41,6
Амвросиевский завод	46	46	47,8	47,8	50,2	50,2
Каменец-Подольский завод	34,1	34,1	35,8	35,8	37	37
Николаевский завод	38,1	38,1	39,7	39,7	42,2	42,2
Растекаемость по конусу, мм	52	52	56	56	60	6
Диаметр капилляра, мм	13	15	13	15	13	15

Оказалось, что наибольшее разрушающее воздействие на структуру шлама и его текучесть оказал виброорган с вертикальным насосным эффектом (см. рис. 3.3). Было замечено, что спиралеобразный рабочий виброорган (тип 1) увеличивал текучесть шлама в 2,8...5,2 раза, виброорган с вертикальным насосным эффектом (тип 2) – в 2,2...6 раз, а виброорган с горизонтальным насосным эффектом (тип 3) – в 3,1...10,8 раза. Причем наибольший пластифицирующий эффект проявляется у шламовых суспензий, имеющих более низкую влажность, при этом точка экстремума объемного расхода шлама через капилляр явно выражена при частотах вибрации всех типов органов в пределах от 10 до 25 Гц.

Сопоставляя зависимости объемного расхода шламов от частоты вибрации (рис. 3.14) следует отметить повышение эффективности физико-механических воздействий при работе с менее пластичными сырьевыми компонентами. При этом точки экстремума четко выражены у шламов Балаклейского и Амвросиевского заводов, характер влияния частоты вибрации на шламовые суспензии Каменец-Подольского и Николаевского заводов несколько отличен, так как имеет более монотонный спад после точки экстремума. Точки экстремума объемного расхода шлама через капилляр для шламов Каменец-Подольского и Николаевского заводов смещены в область более низких частот.

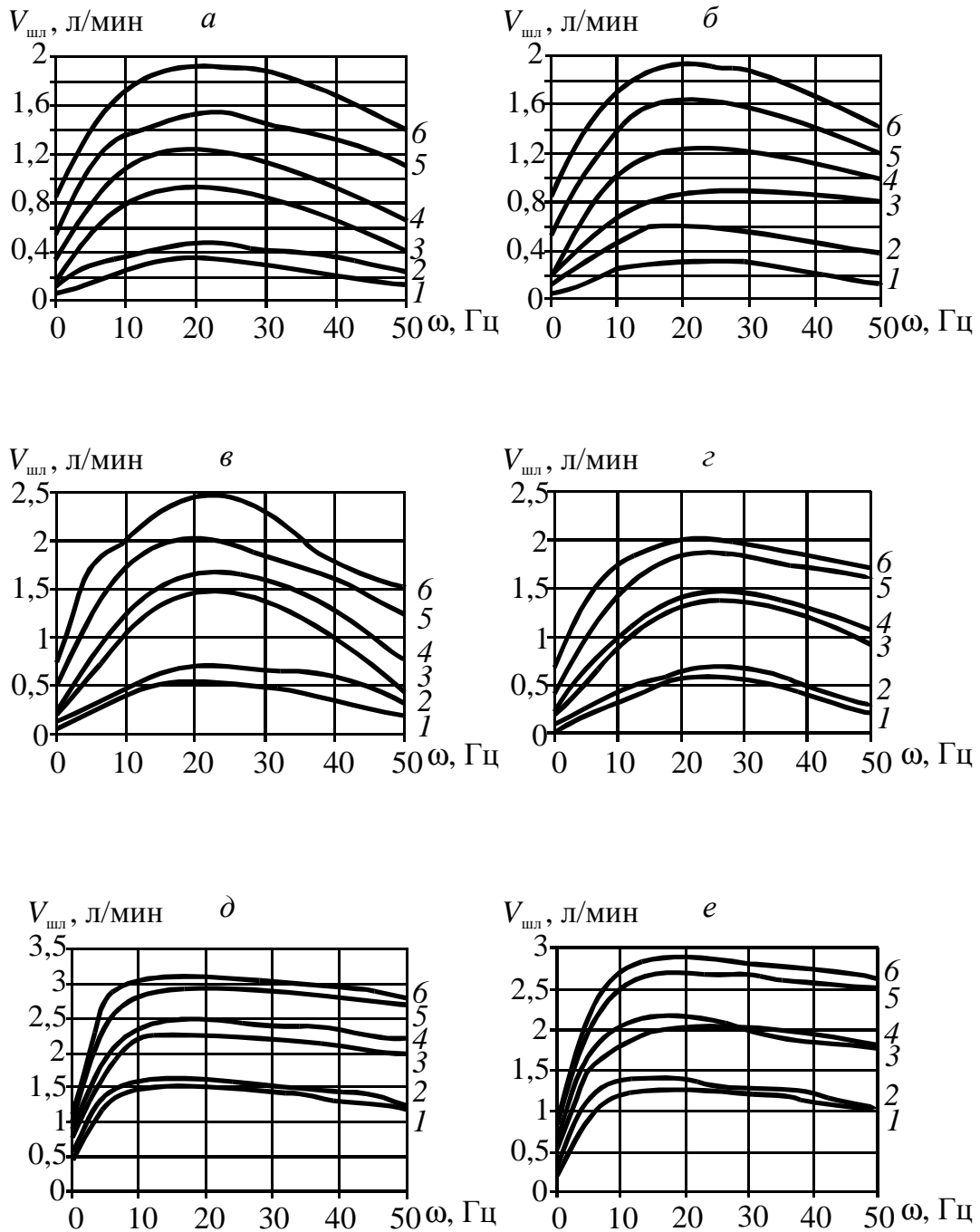


Рис. 3.13. Влияние частоты ω вибрации рабочих органов различного типа (рис. 3.3) на реологические свойства шламов:

шлам Амвросиевского завода: *a* – тип 1; *б* – тип 2; *в* – тип 3; *г* – тип 3;

шлам Николаевского завода: *д* – тип 3;

шлам Каменец-Подольского завода: *е* – тип 3

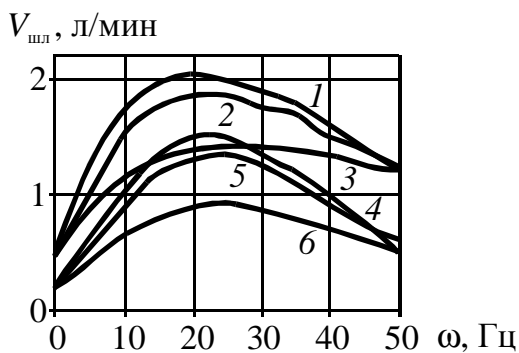


Рис. 3.14. Влияние частоты и амплитуды A на подвижность шлама БЦШК:

1, 2, 3 – $P = 60$ мм; 4, 5, 6 – $P = 56$ мм;
 1, 4 – $A = 4$ мм; 2, 5 – $A = 3$ мм;
 3, 6 – $A = 2$ мм

На рис. 3.15 представлены зависимости объемного расхода сырьевого шлама Балаклейского завода через капилляры от начальной растекаемости при различных частотах колебаний рабочих органов вибратора. При увеличении диаметра капилляра наблюдается некоторое увеличение объемного расхода шлама, однако в области оптимальных значений частоты виброобработки влияние диаметра капилляра оказывается незначительным.

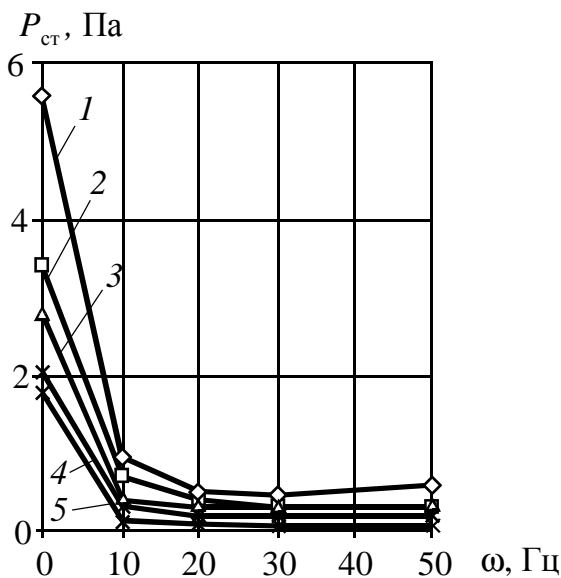


Рис. 3.15. Влияние вибрации на статическое напряжение сдвига:

1, 2, 3, 4, 5 – растекаемость шлама соответственно 52, 54, 56, 58, 60 мм

В табл. 3.9 представлены данные влияния вибрации на реологические свойства шламов.

Данные табл. 3.9 показывают, что величина статического напряжения сдвига на всех испытуемых шламах изменяется более чем на порядок, при этом растекаемость шламов варьировалась от 52 мм до 60 мм.

Влияние вибрации на реологические свойства шламов

Растекаемость шлама	Величина статического напряжения сдвига $P_{ст}$, Па				
	Без вибрации	С виброобработкой при частоте, Гц			
		10	20	30	50
52	5,60	0,95	0,51	0,47	0,60
54	3,41	0,71	0,4	0,3	0,3
56	2,80	0,4	0,31	0,29	0,28
58	2,04	0,32	0,2	0,2	0,2
60	1,77	0,14	0,09	0,07	0,07

При этом важно отметить, что особенно заметно влияние виброобработки на реологические свойства густых шламов (рис. 3.16, кривые 1–3). На рис. 3.15 представлена зависимость объемного расхода сырьевого шлама от частоты и амплитуды вибрации. Повышение амплитуды колебаний рабочего органа позволяет получить значительные насосные эффекты при пониженной частоте вибрации. Так, для густых шламов с растекаемостью 56 мм лучшие результаты объемного расхода для амплитуды 2 мм получены при 25 Гц, при амплитуде 4 мм – при 22 Гц, при этом эффективность вибровоздействия повышена в 2 раза. Эта закономерность отмечается в шламах с повышенной растекаемостью (растекаемость шлама 60 мм), при этом частота вибрации уменьшается (см. рис. 3.3, кривые 1, 3).

При повышении частоты вибровоздействия выше оптимальной (24...27 Гц) наблюдается уменьшение эффективности амплитуды колебания, причем, чем больше амплитуда, тем больше относительное уменьшение объемного расхода шлама. Это, вероятно, связано с интенсивным передвижением частиц шлама в поперечном направлении относительно основного потока.

Таким образом, амплитуда колебаний рабочего органа вибратора оказывает заметное влияние на подвижность сырьевых шламов, причем увеличение амплитуды позволяет усилить эффект при низких частотах вибрации.

Изменение положения виброоргана по отношению к капиллярам также играет важную роль. Установлено, что дальность распространения волны в шламе БЦШК распространяется на 2,6...3,1 диаметра рабочего органа вибратора, причем волна колебаний за-

тухает на расстоянии 1,8 диаметра рабочего органа вибратора. Из этого следует, что оптимальное расстояние монтажа виброоргана от выходного отверстия должно быть менее одного диаметра его рабочего органа. Тиксотропные свойства структуры шлама после вибровоздействия восстанавливаются через 25...30 секунд.

3.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИЙ МЕТОДАМИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Ранее согласно работам [45, 57, 58, 70] была показана эффективность действия пластификаторов различного типа на реологические свойства шламовых суспензий. Естественным продолжением исследований явилось изучение влияния комплексного механохимического воздействия на структурно-механические свойства шлама. С этой целью в исследуемые шламы Балаклейского, Амвросиевского, Каменец-Подольского и Николаевского цементных заводов вводились химические реагенты, часто применяемые в технологии цемента, такие, как лигносульфонаты (ЛСТ) и углещелочной реагент (УЦР). Во всей серии исследований вводилось одинаковое количество реагента – 0,25 мас. % ЛСТ и 0,1 мас. % УЦР. Затем приготовленные образцы шлама подвергались виброобработке. Объемный расход шлама через капилляр в зависимости от частоты вибрации рабочего органа типа 3 и введенных реагентов представлен на рис. 3.16.

Анализ зависимости влияния частоты вибрации с учетом ввода реагентов (рис. 3.16) показывает, что комплексное воздействие эффективно для суспензий с повышенной влажностью (растекаемость 56 мм и более).

Механохимическое воздействие на шламы с пониженной влажностью (растекаемость 52 мм; см. рис. 3.5, б, г) и введение реагентов – понизителей вязкости вызвало снижение объемного расхода во всем диапазоне исследуемых частот.

Проведенные исследования показывают, что применение механохимических методов обработки эффективно для шламов повышенной влажности. Густые шламы (растекаемость 52 мм) под действием виброобработки повышают объемный расход в 14...19 раз по сравнению с первоначальными значениями.

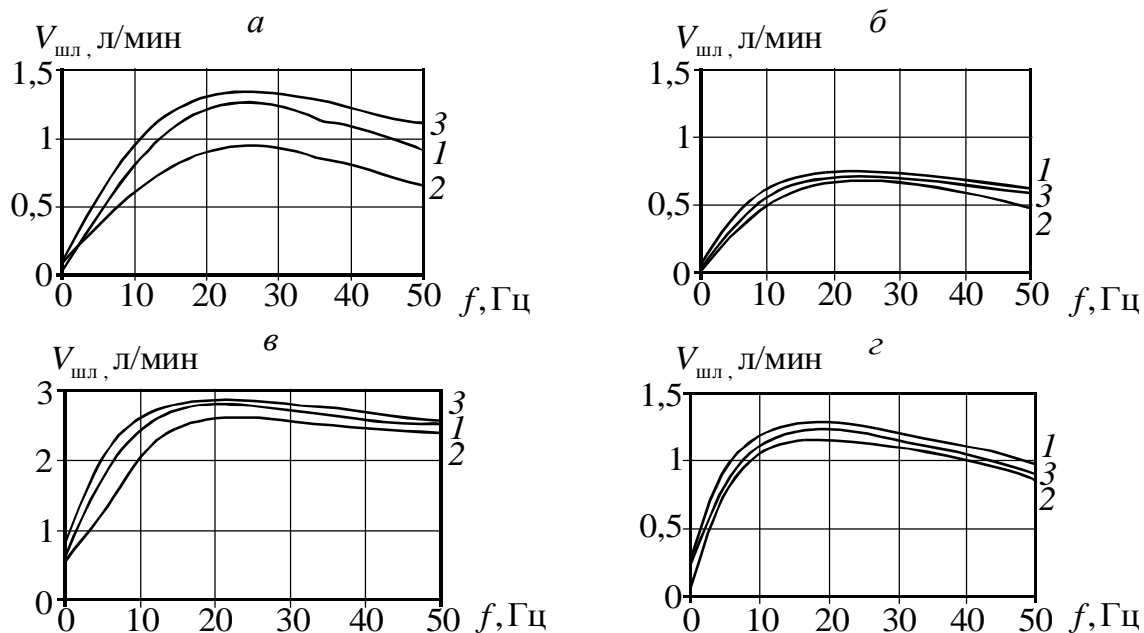


Рис. 3.16. Механохимическое воздействие на реологические свойства шламов Балаклейского (а, в) и Каменец-Подольского (б, г) заводов:
растекаемость шлама: а – 56 мм; б – 52 мм; в – 58 мм; г – 52 мм;
1 – бездобавочный шлам; 2 – шлам с добавкой 0,25 мас. % ЛСТ; 3 – шлам с добавкой 0,1 мас. % УЦР

Сравнивая характеристики влияния частоты виброобработки на реологические свойства шламов, представленных на рис. 3.16 для сырьевых компонентов меньшей пластичности (шламы Николаевского и Каменец-Подольского цементных заводов), можно заметить смещение точки экстремума объемного расхода $v = f(\omega)$ в область более низких частот.

На основе проведенных исследований можно представить функциональную зависимость реологических свойств от факторов, влияющих на свойства шлама, в частности, объемный расход v через калиброванный капилляр можно представить в следующем виде:

$$v = f(\omega, W, x), \quad (3.11)$$

где ω – частота виброобработки; W – влажность шлама; x – массовое процентное содержание понизителя вязкости в шламе.

4. АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СПЕКАНИЯ КЛИНКЕРА

4.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СПЕКАНИЯ КЛИНКЕРА

Процесс образования клинкера состоит из отдельных стадий, каждая из которых протекает в соответствующих технологических зонах. В зависимости от степени нагрева потока материала весь процесс условно делят на несколько стадий. Фазовые превращения на первой стадии технологического процесса происходят при нагреве до 100°C и определяются сушкой жидкого шлама с удалением внешней влаги; эта зона является подготовительной, а процесс эндотермическим.

Рассматривая скорость сушки шлама во вращающихся печах, необходимо остановиться на некоторых особенностях этого процесса. В зоне сушки материала вода, механически смешанная со шламом, нагревается до 80...100 °С и испаряется. В этой зоне температура газов относительно низка, а теплообмен большей частью осуществляется путем конвекции. Для улучшения теплообмена эта зона оборудуется цепями, которые попеременно то оmyваются горячими газами, то погружаются в материал, отдавая при этом накопленную теплоту [73, 74].

Процесс сушки в зоне с цепной завесой можно разбить на несколько этапов [75, 76]. Первый этап соответствует участку печи мокрого шлама. В этот период шлам налипает на цепи, происходит подъем наибольшего количества материала, что сопровождается интенсивной сушкой конвективным потоком газа, а влажность шлама уменьшается по прямолинейному закону.

На втором этапе происходит уменьшение влажности материала, шлам приобретает повышенную вязкость. Это участок второй критической влажности, скорость движения минимальна, наблюдается застойное явление, а температура нагрева цепей выше.

Третий этап соответствует участку относительно сухого материала, здесь происходит гранулообразование, максимальный нагрев цепей и отдача тепла нагретыми цепями материалу [73–76].

Следующая реакционная зона делится на несколько стадий. Сначала материал нагревается от 100 до 500°C с удалением оставшейся внешней влаги и дегидратацией каолина. Затем протекает процесс эндотермического разложения карбонатов $MgCO_3$ и $CaCO_3$ при температуре 500...1150°C [23–26, 77]. Материал на этом участке печи находится в гранулированном состоянии. В зоне дегидратации происходит выделение в противоточный газовый поток высокотемпературных паров, а в зоне декарбонизации – интенсивное выделение углекислого газа.

Процесс синтеза основного клинкерного материала – алита, протекающий в интервале температур 1250...1450°C, является эндотермическим и представляет собой совокупность последовательно и параллельно протекающих физико-химических превращений, основными из которых являются следующие:

- твердофазное взаимодействие компонентов с образованием промежуточных соединений;
- плавление части сырьевой смеси;
- растворение в расплаве кристаллов промежуточных соединений, сопровождающееся изменением его состава и количества;
- миграция расплава в зерна окиси кальция и белита;
- растворение контактных зон макрочастиц диспергированием их на отдельные блоки;
- диффузионное растворение выделившихся после диспергирования и образовавшихся после рекристаллизации микрокристаллов CaO и C_2S , диффузия ионов Ca^{2+} , O^{2-} , SiO^{2-} к зонам роста кристаллов C_3S [78–80].

Спекание портландцементного клинкера можно представить как совокупность следующих трех взаимосвязанных происходящих одновременно физико-химических процессов [79, 81]:

1. Переход компонентов сырьевой шихты и продуктов твердофазных реакций из твердой фазы в жидкую, плавление и растворение в расплаве.

2. Диффузия в расплаве ионов реагирующих компонентов от места их перехода в расплав к местам образования новых твердых фаз.

3. Образование твердых фаз из расплава (кристаллизация).

На рис. 4.1 представлена объединенная схема состояния фаз во вращающейся печи при обжиге цементных сырьевых смесей по мокрому способу производства клинкера.

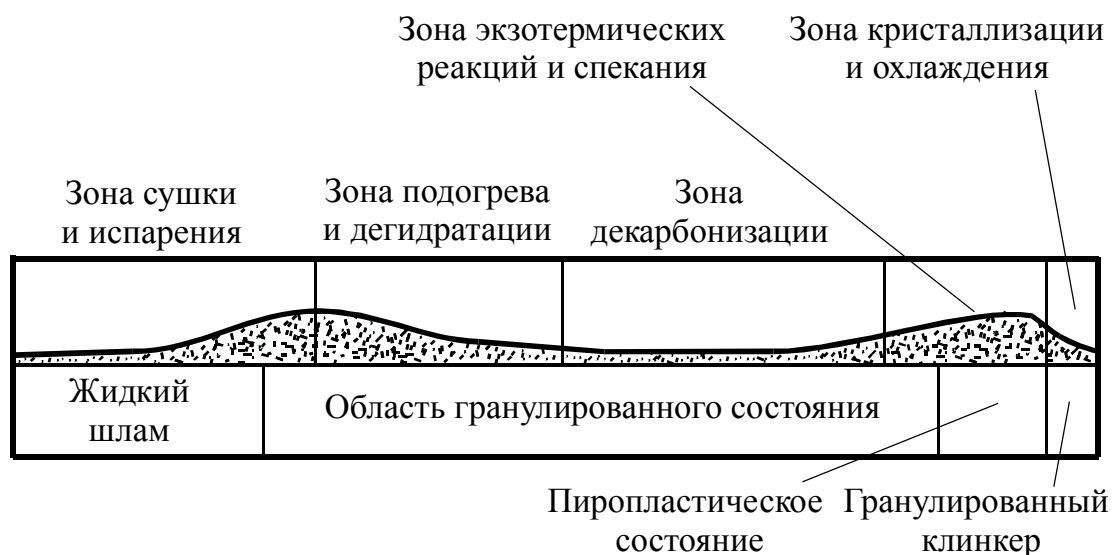


Рис. 4.1. Состояние фаз потока материала при обжиге цементного клинкера во вращающейся печи по мокрому способу производства

Математическое описание состояния и химического превращения обжигаемого материала в печи можно представить последовательной совокупностью моделей протекающих процессов. Так, в первой подготовительной зоне скорость сушки можно определить уменьшением влажности или содержания химически связанной воды H_2O сырьевого шлама dC_{H_2O} в единицу времени dt на участке печи dl [82].

Исследования процесса разложения карбонатов цементной сырьевой смеси проводились в лабораторных условиях [83–85], в полупромышленных и промышленных печах [82, 83, 86, 87]. При этом были получены уравнения, количественно описывающие этот процесс (табл. 4.1).

В исследованиях кинетики образования клинкера [79, 82, 86, 88] принимались различные гипотезы механизма роста клинкерных минералов (табл. 4.2).

Таблица 4.1

**Модели химических превращений сырьевых смесей
при получении клинкера**

Зависимость	Условия проведения эксперимента	Авторы
$\frac{dz}{d\tau} = -kz(1-z)$ $\ln \frac{z}{1-z} = 0,035(\tau-\tau_0)$	Лабораторные, уточнение в промышленных условиях	И. А. Гнедина, Е. С. Кичкина, Л. М. Манухина, Ю. Шлионский [83]
$\frac{dC_{CO_2}}{d\tau} + v \frac{dC_{CO_2}}{dl} = -k_{CO_2} C_{CO_2}$ $r_{CO_2} = 6,15 C_{CO_2}^{0,98}$	Моделирование на ЭВМ, экспериментальная проверка	Б. Б. Шифрин, А. Мишулович [82]
$r_{CaCO_3} = a C_{CaCO_3}^n e^{-E/RT}$	Полупромышленные, промышленные	В. С. Ефремов, В. Копелович, А. Мишулович, К. Т. Петкин [87]
$r_{CaCO_3} = k_{CaCO_3} C_{CaCO_3}^n$	Полупромышленные, промышленные	В. С. Ефремов, В. Копелович, А. Мишулович, К. Т. Петкин [87]

Обозначения в формулах: Z – степень декарбонизации сырьевой смеси; r – скорость химической реакции; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура, К; a – постоянная в пределах рассматриваемого участка.

Таблица 4.2

Кинетика образования клинкерных минералов

Зависимость	Условия проведения эксперимента	Авторы
1	2	3
$\tau = \frac{D}{A_1} e^{E/R}$	Лабораторные	Н. А. Горопов, П. Ф. Румянцев [79]
$r_{C_3S} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \exp\left(-\frac{k_1}{T\Delta T}\right);$ $R_{C_3S} = A_2(\Delta T)^m \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$	Лабораторные	Ю.М.Бутт, В. В. Тимашев, А. П. Осокин [81]

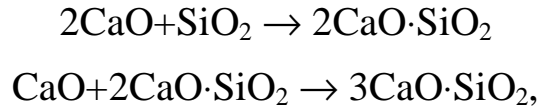
1	2	3
$w = k_y C^n;$ $\lg k_y = 47,36 - 12,23T_1 - 1,975 \frac{10^4}{T^2}$	Лабораторные, экспериментально-статистическое моделирование	В. К. Хохлов, Л. В. Мишулович [88]
$\frac{dC_{CaO}}{d\tau} + n \frac{dC_{CaO}}{dl} = k_y C_{CaO};$ $\frac{dC}{d\tau} + n \frac{dC}{dl} = 1,35 C_{CaO}^{1,1} e^{-0,14(230 - 1,31)}$	Моделирование на ЭВМ, экспериментальная проверка в промышленных условиях	В. Б. Шифрин, А. В. Мишулович [82]
$X_{2CaO \cdot SiO_2} = 1,75 \times 10^{-3} e^{3,22} \times$ $\times s(t-900) \times 10^{-6} + 3,55 s^{1,25} \times$ $\times e^{-1000/T} \tau \times 10^{-6}$	Лабораторные, экспериментально-статистическое моделирование	М. М. Сычев, С. С. Кичкина, М. А. Астахова [86]
$y = 0,707 - 0,794 z^{1/3}$	Промышленные	И. А. Гнедина, Е. С. Кичкина и др. [83]
$\frac{dC_{CaO}}{d\tau} = k_0 C_{CaO}^n e^{-E/RT}$	Промышленные	В. Копелевич, А. В. Мишулович [89]

Обозначения в формулах: τ – продолжительность растворения реагирующих элементов; D – диаметр растворяющегося зерна; A_1 – постоянная, слабо зависящая от температуры; R – газовая постоянная; k_0 , k_1 , k_y , A_2 – константы; $m \approx 2$; $X_{2CaO \cdot SiO_2}$ – степень превращения CaO в $2CaO \cdot SiO_2$; y – отношение $CaO_{своб} = CaO_{связ}$ в пробе к содержанию CaO в клинкере; Z – степень декарбонизации.

Например, в работе [88] изучалось два пути развития кристаллов: по схеме образования и охлаждения двухмерных зародышей и дислокационный механизм роста. Однако опытные данные показали, что в разных зонах спекающейся системы рост кристаллов неодинаков, а скорость роста неудовлетворительно описывается полученными формулами. Затем установили, что скорость образования в реальных спекающихся системах практически соответствует кинетике растворения окиси кальция, причем это соответствие не нарушается при увеличении длительности изотермической выдержки до достижения равновесного состояния.

В работе [90] представлена математическая идентификация модели процесса спекания цементного клинкера. При этом предполагалось, что:

1. Декарбонизация известняка CaCO_3 не лимитирует процесс.
2. Химизм процесса описывается реакциями образования C_2S и C_3S :



причем обе реакции идут на поверхности раздела твердых фаз.

3. Спекание может быть представлено совокупностью следующих стадий:

- а) химической реакцией CaO и SiO_2 ;
- б) диффузией CaO через слой продуктов взаимодействия на частицах SiO_2 .

4. Процесс протекает в изотермических условиях.

С учетом принятых допущений математическая модель процесса спекания цементного клинкера представлена системой дифференциальных уравнений [90]:

$$\begin{aligned} \frac{dC_c^s}{d\tau} &= 4,5b_1D_m \frac{G_s^0 + G_s}{G_s} (C_c^0 - C_c^s) - \frac{C_c^0 + C_c^s}{G_s} \frac{dG_s}{d\tau} - 12 b_2 k_1 C_c^s; \\ \frac{dC_c^p}{d\tau} &= b_4(C_c^0 - 2b_5 k_1 C_c^s); \\ \frac{dC_c^{C_2S}}{d\tau} &= 2b_6 D_{ж} (C_c^p - C_c^{C_2S}) - \frac{dC_c^p}{d\tau} - 2b_7 k_2 C_c^{C_2S} C_{C_2S}; \\ \frac{dG_c}{d\tau} &= G^0 - 2b_5 k_1' C_c^s - k_2 C_c^{C_2S} C_{C_2S}; \\ \frac{dG_s}{d\tau} &= G_s^0 - 2,42 b_5 k_1 C_c^s; \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\frac{dC_{C_2S}}{d\tau} = b_5 k_1 C_c^s - k_2 C_c^{C_2S} C_{C_2S};$$

$$\frac{dC_{C_3S}}{d\tau} = k_2 C_c^{C_2S} C_{C_2S},$$

где C_c^s – концентрация CaO на поверхности непрореагировавшего SiO_2 , г/см³; C_c^0 – начальная концентрация CaO, г/см³; G_s – количество прореагировавшего SiO_2 , г; C_c^p – растворимость CaO в жидкой фазе, г/см³; $C_c^{C_2S}$ – концентрация CaO на поверхности непрореагировавшего $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, г/см³; D_t – коэффициент диффузии в твердой фазе, см²/с; $D_{\text{ж}}$ – коэффициент диффузии в жидкой фазе, см²/с; G_c – количество CaO, г; C_{C_2S} – концентрация $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ г/см³; C_{C_3S} – концентрация $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ г/см³; k_i – константы скорости химических реакций, см/с; b_i – коэффициенты дифференциальных уравнений, которые были получены в результате моделирования представленных уравнений на аналоговых вычислительных машинах ЭМУ–10.

4.2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ КЛИНКЕРООБРАЗОВАНИЯ

Исследование кинетики физико-химического превращения цементных сырьевых смесей в клинкер проводилось в лабораторных условиях в лабораторных стационарных печах с силитовыми нагревательными элементами.

Для исследования скорости образования клинкерных минералов испытывался шлам Белгородского цементного завода следующего химического состава (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Химический состав исходных материалов, мас. %

Сырьевые материалы	ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	F ₂ O
Мел	42,16	0,76	0,14	0,4	54,83	0,26	0,45	–	–
Глина	7,49	65,52	13,19	3,87	4,15	1,9	0,2	1,02	0,66
Огарки	–	–	–	100	–	–	–	–	–
Сырьевая смесь	34,13	14,54	2,92	2,67	43,19	0,61	0,39	0,22	0,14

Шлам с титром 76,12 %, коэффициентом насыщения $KH = 0,92$, кремнеземным модулем $n = 2,6$, глиноземным модулем $p = 1,09$ сначала высушивался в сушильном шкафу, затем измельчался и увлажнялся до 10...12%. Из этого материала изготавливались гранулы размером 10 и 15 мм и таблетки размером 10 мм.

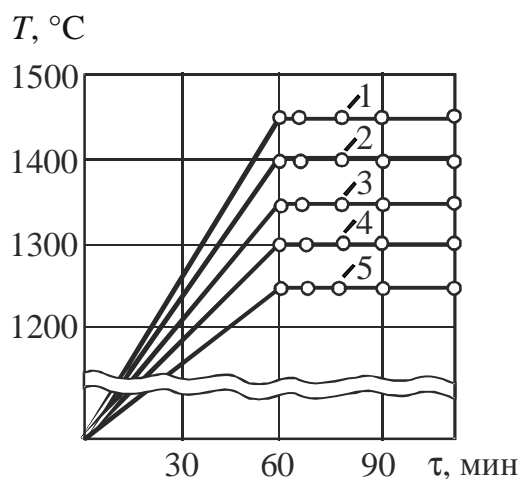


Рис. 4.2. Температурный режим обжига гранул

Сырьевые гранулы и таблетки высушивались и подвергались обжигу – нагревались до температуры обжига и обжигались в изометрических условиях (рис. 4.2).

Основным методом количественной оценки содержания минералов в обожженных образцах был принят рентгенофазный анализ, так как интенсивность аналитической линии клинкерных минералов C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF при прочих равных условиях пропорциональна количественному содержанию исследуемой фазы. Для количественной оценки относительного содержания исследуемых минералов в анализируемых образцах была принята аналитическая линия серебра в качестве внешнего эталона. Для анализа обожженных образцов были выбраны аналитические линии C_3S – 3,02 Å, C_2S – 2,86 Å, C_3A – 2,7 Å, C_4AF – 2,63 Å. Съёмка рентгенограмм проводилась при вращении образца в осевой плоскости и повороте углов от 28° до 38°. За начало интенсивности аналитических линий исследуемых пиков на рентгенограммах считался уровень фона. Изменение количественного содержания минералов в обожженном сырье определялось по относительному изменению интенсивности пика исследуемого материала и интенсивности пика эталона серебра.

Далее были построены графики (рис. 4.3–4.7), показывающие зависимость содержания в спеке основных клинкерных минералов C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF от температуры и времени выдержки в изометрических условиях. Из рис. 4.3, 4.4 видно, что наибольшая скорость образования алита получена для гранул размером 15 мм при температуре обжига 1450 °С.

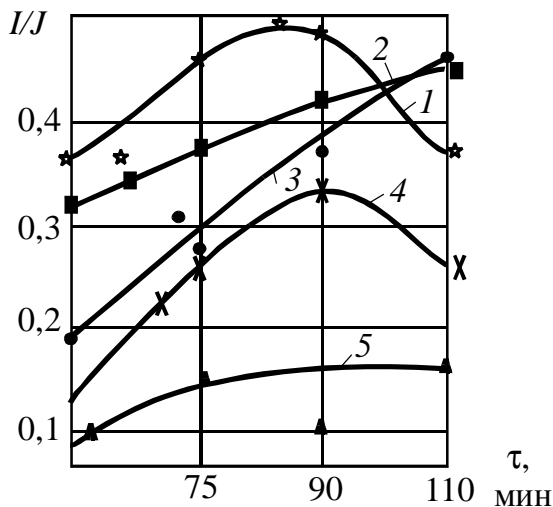


Рис. 4.3. Изменение содержания алита в грануле размером 15 мм при температуре:
 1 – 1450°C; 2 – 1400°C; 3 – 1350°C;
 4 – 1300°C; 5 – 1250°C

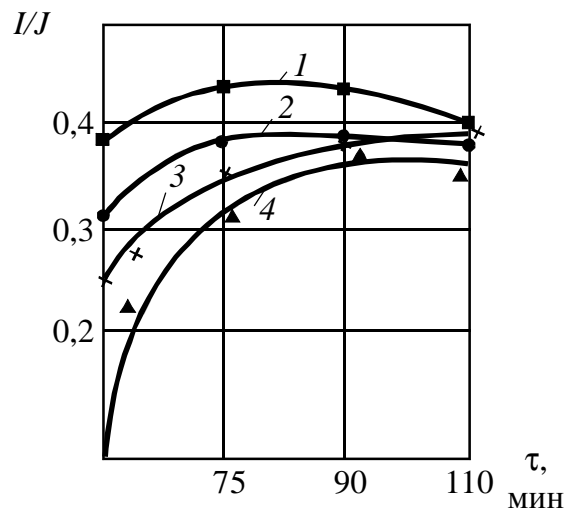


Рис. 4.4. Изменение содержания алита в грануле размером 10 мм при температуре:
 1 – 1450°C; 2 – 1400°C; 3 – 1350°C;
 4 – 1300°C

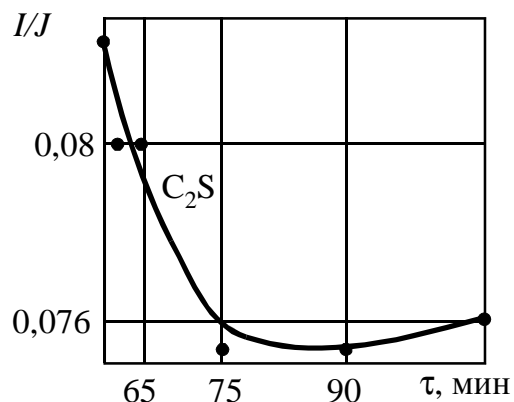
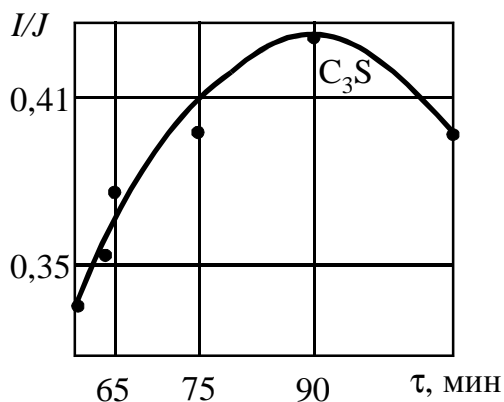


Рис. 4.5. Изменение содержания алита C_3S и белита C_2S в образцах:
 $d_{\text{табл}} = 10 \text{ мм}$; $t = 1450^\circ\text{C}$

Наибольший интерес представляют кинетические кривые, полученные при температуре 1450 °С (см. рис. 4.3). На графиках видно, что при этих температурах наблюдается точка достижения максимума концентрации C_3S .

Это говорит о том, что алит при длительной выдержке при температуре 1450 °С подвержен разложению или модифицированию, что было проверено в повторных экспериментах. Для этого были отформованы таблетки диаметром 10 мм на прессе под давлением 100 кгс/см² из навески сырьевой смеси 1 г.

Рентгеноструктурный и графический анализ и в данном случае подтверждает понижение содержания алита в обжигаемом

сырье при выдержке таблеток при $t = 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в изометрических условиях (см. рис. 4.5). При этом на завершающей стадии обжига одновременно замечено некоторое приращение концентрации белита C_2S (см. рис. 4.5). Это дает основание предположить, что при длительной выдержке уже полученного клинкера в зоне спекания содержащийся в нем алит C_3S частично разлагается.

Изменение концентраций алюминатов и алюмоферритов в области исследуемых температур и режимов обжига в каждом отдельном эксперименте не показало четкой закономерности, как, например, для алита и белита. В этой связи была выделена некоторая область их изменения, которая показана на рис. 4.6 и 4.7.

Из представленных графиков видно, что если рассматривать характер изменения этих областей в целом, то закономерность образования C_3A и C_4AF достаточно очевидна.

Максимального значения концентрации C_3A и C_4AF достигают в начальной стадии высокотемпературного нагрева, а затем, по мере образования трехкальциевого силиката C_3S , содержание C_3A и C_4AF в клинкерном расплаве снижается. Вместе с тем наблюдается температурный режим устойчивого образования и существования этих минералов. Как видно из графиков на рис. 4.6, 4.7 для трехкальциевого алюмината это температура составляет $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для четырехкальциевого алюмоферрита – $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

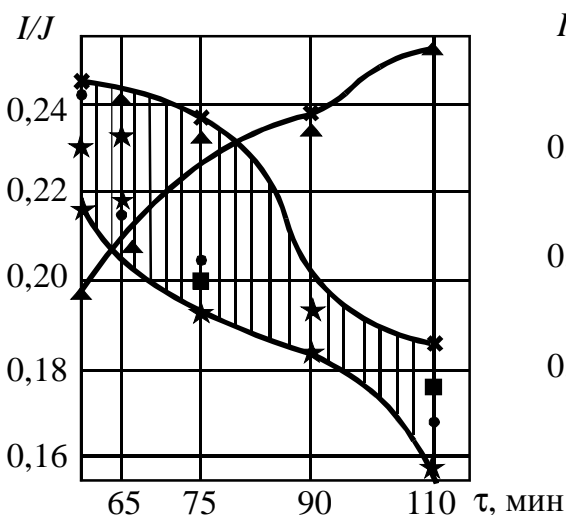


Рис. 4.6. Изменение содержания C_3A в грануле $d = 15\text{ мм}$:
 \blacktriangle – 1250°C ; \blackstar – 1300°C ; \blacksquare – 1350°C ;
 \bullet – 1400°C ; \llcorner – 1450°C

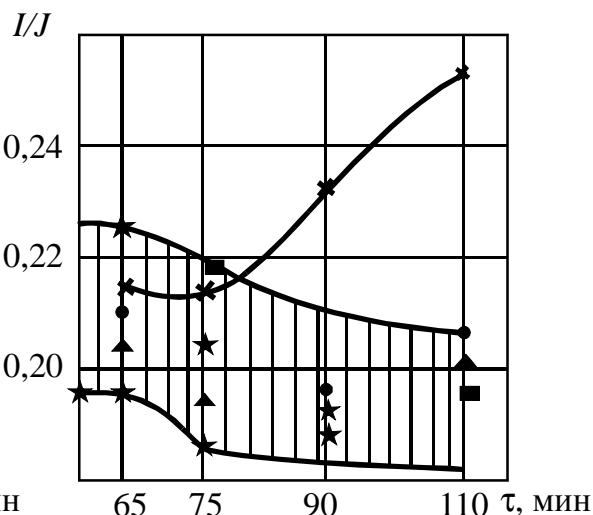


Рис. 4.7. Изменение содержания C_4AF в грануле $d = 15\text{ мм}$:
 \blacktriangle – 1250°C ; \blackstar – 1300°C ; \blacksquare – 1350°C ;
 \bullet – 1400°C ; \llcorner – 1450°C

Следующим этапом исследований было изучение влияния примесей на кинетику образования алита в условиях изотермической выдержки. Для этого в шлам Белгородского цементного завода вводилось 5% шлака с химическим составом: $\text{CaO} - 44,49\%$, $\text{SiO}_2 - 37,33\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 - 6,37\%$, $\text{F}_2\text{O}_3 - 0,54\%$. В состав шлака входили примеси окислов марганца, фосфора хрома, бария, серы и других компонентов.

Режим обжига представлен на рис. 4.8. Сначала исследуемые образцы нагревались от начальной температуры до температуры обжига, равной 1450°C в течение 90 мин. Затем они выдерживались при температуре 1450°C в течение 30 мин. Далее образцы извлекались из печи через каждые 5 мин и исследовались на содержание в них алита.

На рис. 4.9 представлены рентгенограммы наиболее характерных образцов клинкера из шлама с добавкой 5% шлаковой пыли, при этом определялась величина пика алита ($d = 2,181\text{\AA}$). Результаты измерения интенсивности отражения рентгеновских лучей исследуемых образцов представлены на рис. 4.10.

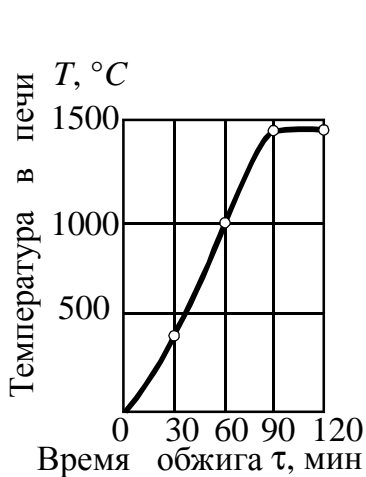


Рис. 4.8. Режим обжига

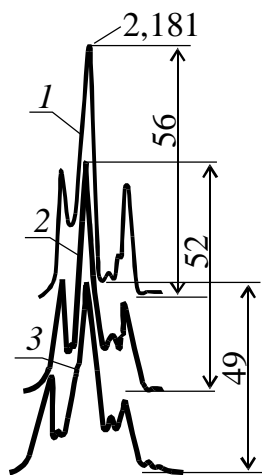


Рис. 4.9. Рентгенограммы клинкера из шлама с добавкой 5% шлаковой пыли

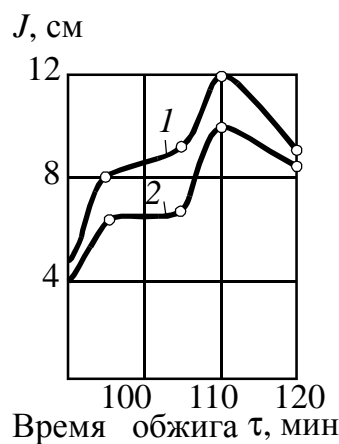


Рис. 4.10. Интенсивность пика алита на дифрактограмме исследуемых образцов

Проведенные исследования показывают, что и в этом случае при обжиге сырьевых смесей в изотермических условиях наблюдается изменение содержания алита.

4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА КЛИНКЕРООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ РАЗДЕЛЬНОГО НАГРЕВА СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Известны работы, посвященные раздельному нагреву [91, 92]. При этом достигается снижение температур процесса клинкерообразования путем двухстадийного приготовления сырьевой смеси. На первой стадии готовится низкоосновная сырьевая шихта с коэффициентом насыщения КН, равным от 0,3 до 0,5, далее эта шихта нагревается до спекания при температуре 1100...1200 °С. На следующей стадии вводится оставшаяся часть известняка, коэффициент насыщения доводится до 0,85...0,95 и далее шихту обжигают при температуре 1300...1350 °С. В соответствии с этой методикой готовились легкоплавкие шихты с КН = 0,1; 0,3; 0,5 и $p = 1,5$.

Первая часть эксперимента с целью сравнения с традиционным способом обжига предусматривала обжиг традиционной шихты для Топкинского цементного завода по методике, изложенной выше. Для этого отбирался готовый шлам, высушивался и обжигался. Во второй части исследовалось влияние режима обжига и физико-химического состава легкоплавкой шихты на кинетику образования клинкерных минералов C_2S и C_3S .

В табл. 4.4 и 4.5 представлена характеристика исходных компонентов и сырьевой смеси.

Таблица 4.4

Химический состав сырьевых материалов

Компоненты	ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Известняк	42,99	1,38	0,33	0,28	53,87	1,15
Глина	9,42	62,4	14,3	6,06	4,87	2,30
Огарки	5,76	6,9	4,08	76,31	3,25	1,92

Таблица 4.5

Химический состав сырьевой смеси

Наименование	ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Сумма
Сырьевая смесь	35,24	13,53	3,84	2,48	44,91	100,00

Сырьевые материалы и сырьевая смесь предварительно размалывались до полного прохождения через сито 008. Температурный режим обжига сырьевой смеси, представленной в табл. 4.5, приведен на рис. 4.11. Химический состав легкоплавких шихт и клинкера из них приведен в табл. 4.6, 4.7.

Режимы обжига легкоплавких шихт и клинкера, полученного на их основе, представлены в табл. 4.8. На рис. 4.12 показан график изменения температур при обжиге легкоплавких шихт (табл. 4.6) и клинкера (табл. 4.7).

Таблица 4.6

Химический состав легкоплавких шихт

Номер шихты	Химический состав шихты						Расчетные модули		
	ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	КН	<i>n</i>	<i>P</i>
1, 2	23,39	35,43	8,19	5,46	25,34	1,81	0,10	2,60	1,50
3, 4	28,8	26,05	6,02	4,02	33,22	1,63	0,30	2,59	1,50
5, 6	31,95	20,59	4,76	3,18	37,8	1,52	0,50	2,59	1,50

Таблица 4.7

Химический состав клинкера из легкоплавких шихт

Номер шихты	Химический состав шихты						Расчетные модули		
	ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	КН	<i>n</i>	<i>P</i>
1, 2	29,18	15,81	3,66	2,48	47,2	1,54	0,91	2,57	1,48
3, 4	23,95	16,98	3,93	2,66	50,69	1,65	0,91	2,58	1,48
5, 6	17,69	18,39	4,26	2,86	54,87	1,79	0,91	2,58	1,49

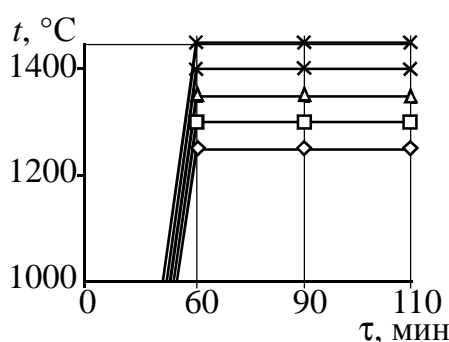


Рис. 4.11. Режим подъема температуры и обжига сырьевой смеси Топкинского цементного завода

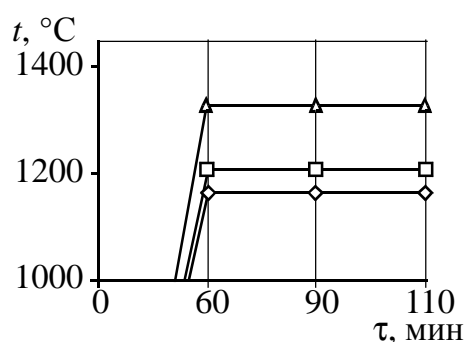


Рис. 4.12. Режим подъема температуры и обжига легкоплавкой и двухкомпонентной шихт

Для приготовления легкоплавкой шихты сырьевые компоненты взвешивались в расчетных соотношениях, представленных в работах [91, 92]. Из каждой смеси готовилось 10 таблеток диаметром 20 мм, весом 12,5 г, давление пресса доводилось до 764 кгс/см². Пять таблеток смеси 1, 3, 5 обжигались до температуры 1150 °С, а пять таблеток – до 1200 °С. Обжиг проводился в течение одного часа. График изменения температур обжигаемых образцов представлен на рис. 4.12.

Таблица 4.8

Режимы обжига легкоплавкой шихты и клинкера

Номер клинкера	КН	Температура предварительного обжига, °С	КН	Температура окончательного обжига, °С
1	0,1	1150	0,91	1350
2	0,1	1200	0,91	1350
3	0,3	1150	0,91	1350
4	0,3	1200	0,91	1350
5	0,5	1150	0,91	1350
6	0,5	1200	0,91	1350

Затем из обожженных легкоплавких шихт и известняка готовилась двухкомпонентная шихта, которая обжигалась при температуре 1350 °С. Для этого, как и в предыдущем случае, готовились таблетки диаметром 20 мм и весом 12,5 г под давлением 764 кгс/см². Кроме этого, было изготовлено 25 таблеток для обжига сырьевой смеси Топкинского цемзавода. Обжиг проводился при температурах 1250, 1300, 1350, 1400, 1450 °С.

Режим подъема температуры и последующая выдержка обжигаемых таблеток легкоплавких шихт в изотермических условиях в течение 50 мин показан на рис. 4.12. Обжиг сырьевых смесей проводился в лабораторной электропечи. Образцы сырьевой смеси Топкинского цементного завода обжигались в пять приемов, при этом в печь помещалось 5 таблеток. После достижения необходимой температуры и времени выдержки образцы извлекались из печи.

Обожженные образцы затем подвергались петрографическому и рентгенофазовому анализу. Петрографическим методом определялась концентрация алита и белита сырьевой смеси ТЦЗ,

обожженной при температуре 1400 °С (рис. 4.13) и 1450 °С (рис. 4.14). На рис. 4.15 и 4.16 представлены результаты исследования кинетики минералообразования C_3S и C_2S клинкеров ТЦЗ методами РФА.

Проведенные исследования клинкеров, полученных на основе сырьевых смесей и легкоплавкой шихты Топкинского цементного завода, подтверждают закономерности, отмеченные выше. В отличие от методики, приведенной в разделе 4.2, в этом эксперименте были изменены размеры исследуемых образцов, их форма и степень уплотнения. Однако закономерность кинетики процесса алитообразования (см. рис. 4.5) сохраняется.

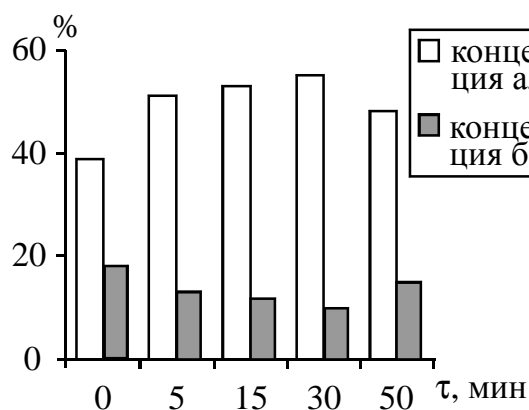


Рис. 4.13 Концентрация алита, белита, $t = 1400^{\circ}C$

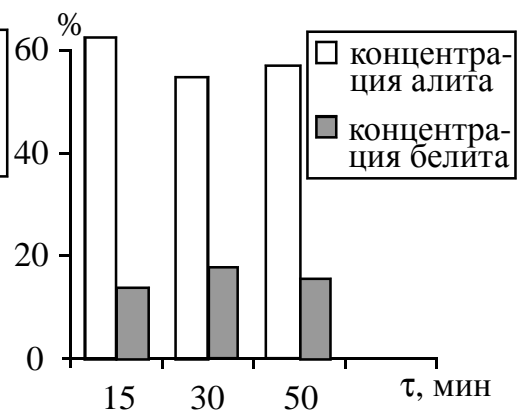


Рис. 4.14 Концентрация алита, белита, $t = 1450^{\circ}C$

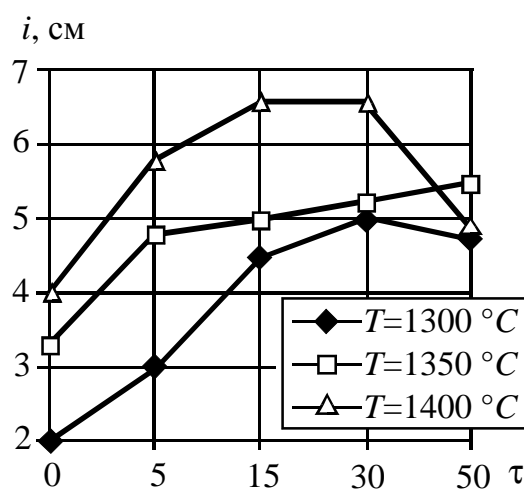


Рис. 4.15. Кинетика образования алита C_3S в клинкерах Топкинского цементного завода

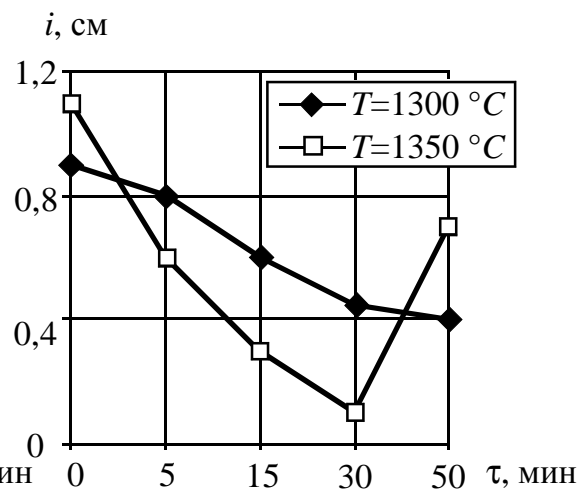


Рис. 4.16. Кинетика образования белита C_2S в клинкерах Топкинского цементного завода

На гистограммах (см. рис. 4.13, 4.14) и графиках (см. рис. 4.15, 4.16) прослеживается убывание концентрации алита, некоторое возрастание белита после выдержки исследуемых образцов в изотермических условиях, причем при более высокой температуре наблюдается сокращение времени образования экстремума.

На стадии исследования кинетики процессов минералообразования в условиях двухшихтовой технологии изучалась закономерность образования промежуточных минералов, в частности геленита C_2AS на фоне образования C_3S . На рис. 4.17–4.20 показаны кинетические кривые изменения этих минералов. При этом изучалось влияние коэффициента насыщения (см. табл. 4.8) на кинетику образования C_2AS и C_3S .

Наиболее интересными представляются графики образования геленита и алита (см. рис. 4.18, 4.20) при $КН = 0,5$. В этом случае получена максимальная скорость образования C_2AS и C_3S . В более ранний период наблюдается наибольшая концентрации этих минералов.

Таким образом, регулирование скорости образования клинкерных минералов возможно за счет формирования состава легкоплавкой шихты и при выборе температурного режима обжига. Прослеживается также и снижение концентрации образования алита при изотермической выдержке при $t = 1350^\circ C$ и геленита при $t = 1200^\circ C$ (см. рис. 4.20).

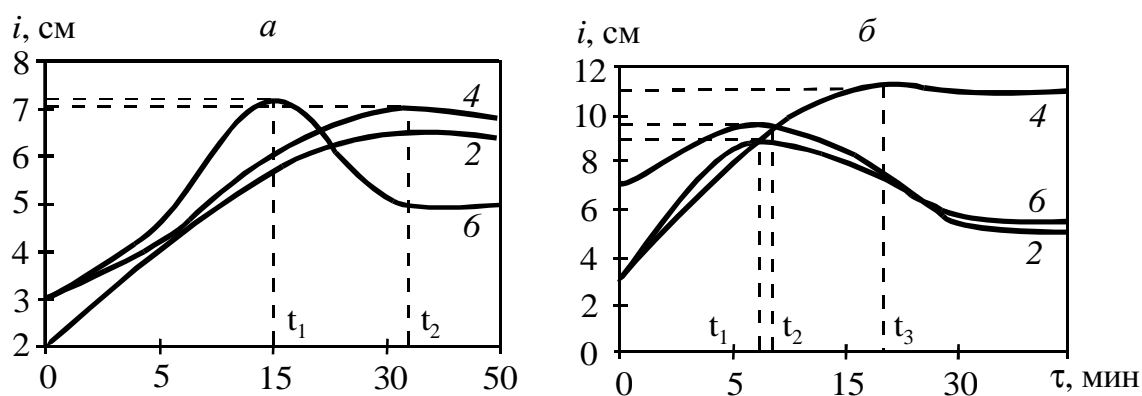


Рис. 4.17. Влияние коэффициента насыщения на образование C_3S и C_2AS при температуре предварительного обжига $1200^\circ C$:
 а) C_3S ; $t = 1350^\circ C$; 2 – $КН = 0,1$; 4 – $КН = 0,3$; 6 – $КН = 0,5$;
 б) C_2AS ; $t = 1200^\circ C$; 2 – $КН = 0,1$; 4 – $КН = 0,3$; 6 – $КН = 0,5$

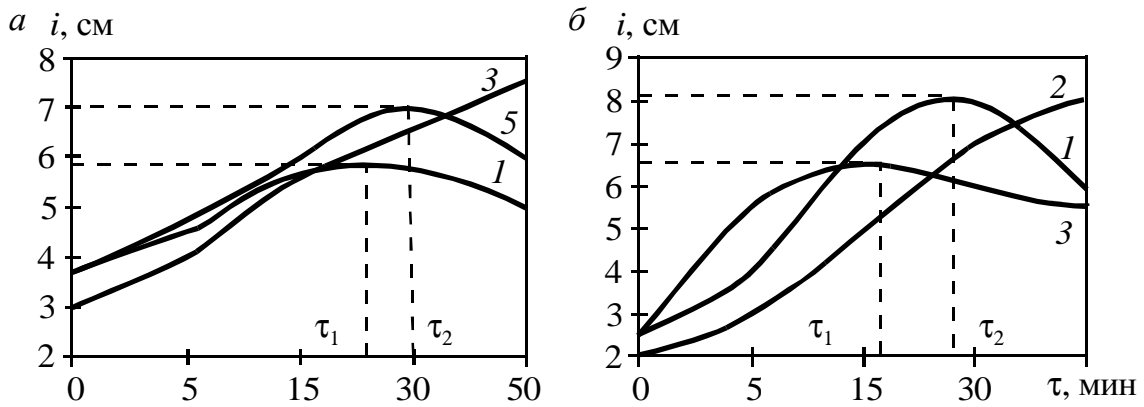


Рис. 4.18. Влияние коэффициента насыщения на образование C_3S и C_2AS при температуре предварительного обжига $t = 1150\text{ }^\circ\text{C}$:

a) C_3S ; $t = 1350\text{ }^\circ\text{C}$; 1 – $KH = 0,1$; 3 – $KH = 0,3$; 5 – $KH = 0,5$;

б) C_2AS ; $t = 1150\text{ }^\circ\text{C}$; 1 – $KH = 0,1$; 2 – $KH = 0,1$; 3 – $KH = 0,3$

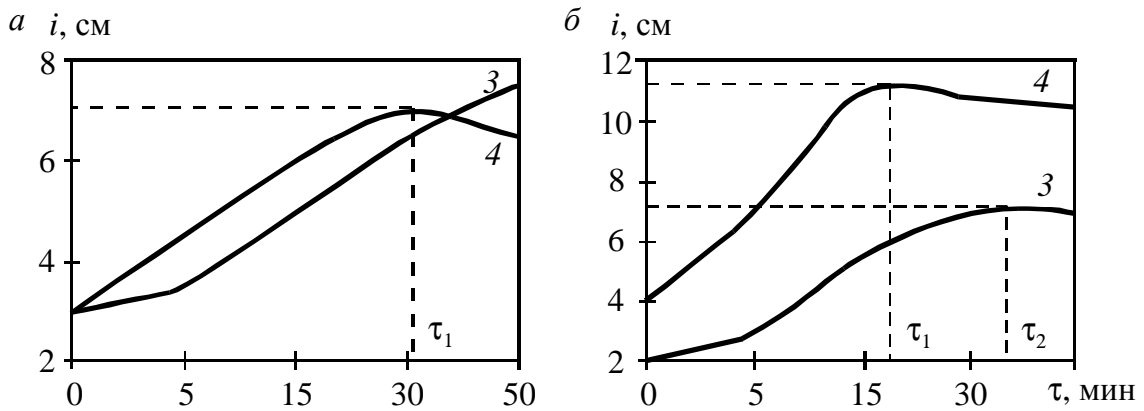


Рис. 4.19. Влияние температуры предварительного обжига на образование C_3S и C_2AS , $KH = 0,3$:

a) C_3S ; $t = 1350\text{ }^\circ\text{C}$; *б)* C_2AS , 3 – $t = 1150\text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $t = 1200\text{ }^\circ\text{C}$

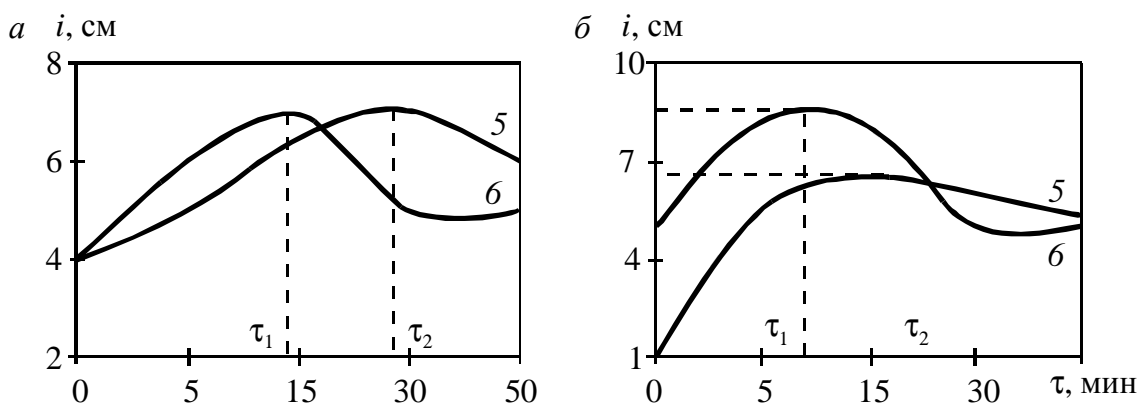


Рис. 4.20. Влияние температуры предварительного обжига на образование C_3S и C_2AS , $KH = 0,5$:

a) C_3S ; $t = 1350\text{ }^\circ\text{C}$; *б)* C_2AS ; 5 – $t = 1200\text{ }^\circ\text{C}$; 6 – $t = 1150\text{ }^\circ\text{C}$

Передержка уже готового клинкера в области высоких температур приводит не только к неоправданным затратам тепла, а следовательно и топлива, но и к снижению качественных характеристик клинкера. Передержка спекаемого клинкера в высокотемпературной зоне вызывает снижение содержания алита на 7–20%, что в последующем может ухудшить качественные характеристики получаемого на основе этого клинкера цемента.

4.4. АНАЛИЗ КИНЕТИКИ КЛИНКЕРООБРАЗОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

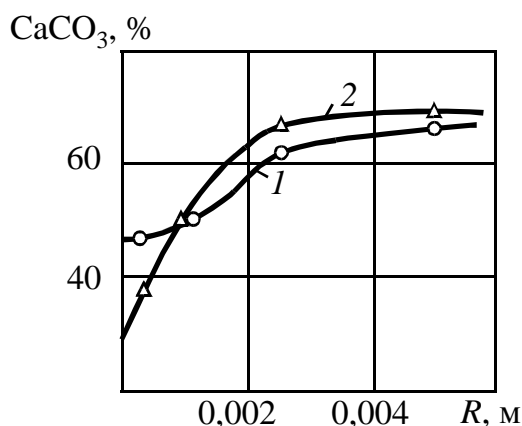
В работах [93, 94] показано, что перемещение материала во вращающихся печах большой мощности характеризуется значительным изменением его скорости. Причем расслоение потока происходит в зоне декарбонизации, где наступает интенсивное газовыделение. Для анализа и оценки влияния параметров технологического процесса на структуру потока были отобраны пробы материала в печах № 1 и 2 Топкинского цементного завода. Параллельно отбирались пробы материала для изучения и скорости химических реакций в зонах декарбонизации и спекания. Результаты отсева и химического анализа по отдельным фракциям приведены в табл. 4.9.

Из графиков на рис. 4.21 видно, что по мере роста размера гранул увеличивается содержание непрореагировавшего CaCO_3 . Причем для печи № 1 это содержание изменяется от 47 до 68 %, а для печи № 2 – от 37 до 69%, то есть декарбонизация выше у гранул меньшего размера.

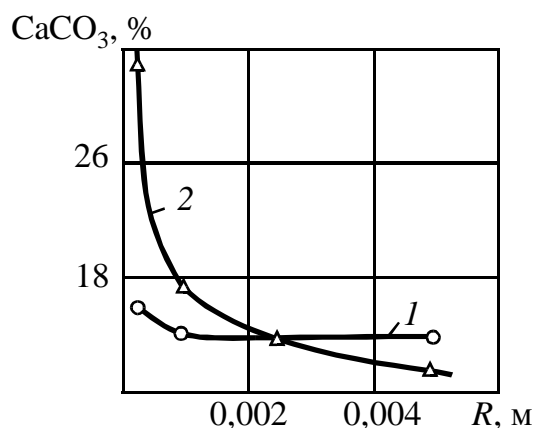
Рис. 4.22 показывает, что в конце зоны декарбонизации содержание CaCO_3 для печи № 1 изменяется с 14,07 до 16,1, а для печи № 2 – с 6,75 до 18,8, то есть в печи № 1 декарбонизация в зоне спекания практически одинакова для всех размеров фракций обжигаемого материала, а для печи № 2 содержание непрореагировавшего CaCO_3 в пылевидной фракции почти в 3 раза больше, чем в гранулах размером более 5 мм. Как в печи № 1, так и в печи № 2 менее прореагировавшим оказывается мелкодисперсный материал. Такое явление можно объяснить различной скоростью движения разных по размеру гранул, то есть расслоением потока материала.

Состав материала из вращающихся печей

Номер печи и место отбора проб	Размер гранул, мм	Потери при прокаливании, %	Содержание, %		
			CO ₂	CaO	CaCO ₃
Печь № 1, 130-й м	Менее 0,25	20,39	20,65	26,28	46,96
	0,25...1,0	22,69	22,12	28,15	50,30
	1,0...2,5	26,07	27,73	35,29	63,06
	2,5...5,0	28,88	28,91	36,79	65,75
	Более 5,0	30,00	29,79	37,91	67,75
Печь № 1, 170-й м	Менее 0,25	9,91	7,08	9,01	16,1
	0,25...1,0	5,84	6,19	7,87	14,07
	1,0...2,5	5,22	6,2	7,89	14,1
	2,5...5,0	5,04	6,19	7,87	14,07
Печь № 2, 135-й м	Менее 0,25	17,85	16,32	20,77	37,11
	0,25...1,0	21,13	21,83	27,78	49,64
	1,0...2,5	29,29	30,09	38,29	68,43
	2,5...5,0	29,87	30,09	38,29	68,43
	Более 5,0	30,91	30,39	38,67	69,11
Печь № 2, 170-й м	Менее 0,25	16,11	14,75	18,77	33,54
	0,25...1,0	7,36	7,67	9,76	17,44
	1,0...2,5	4,18	6,20	7,89	14,1
	2,5...5,0	4,48	5,31	6,75	12,01

Рис. 4.21. Изменение содержания CaCO₃ в гранулах в начале зоны декарбонизации:

1 – печь № 1; 2 – печь № 2

Рис. 4.22. Изменение содержания CaCO₃ в гранулах в конце зоны декарбонизации:

1 – печь № 1; 2 – печь № 2

Для анализа химических превращений по длине печи были отобраны пробы через каждые 10 метров. Сравнительный анализ фазовых превращений цементного сырья (рис. 4.23, 4.24) показывает, что химические реакции в печах протекают также по-разному.

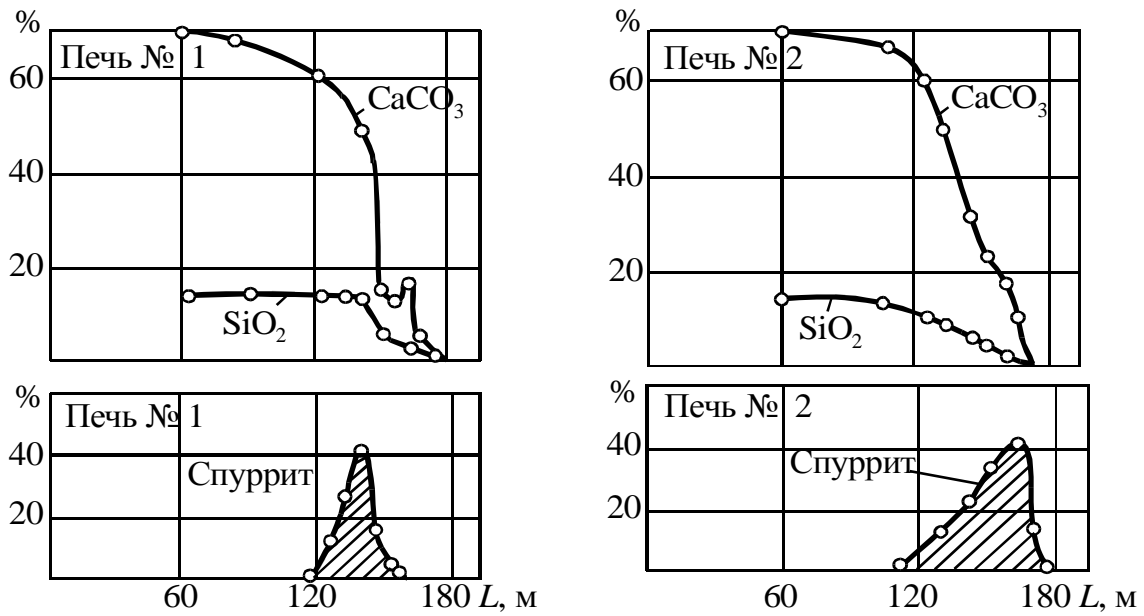


Рис. 4.23. Изменение обжигаемого материала по длине печи

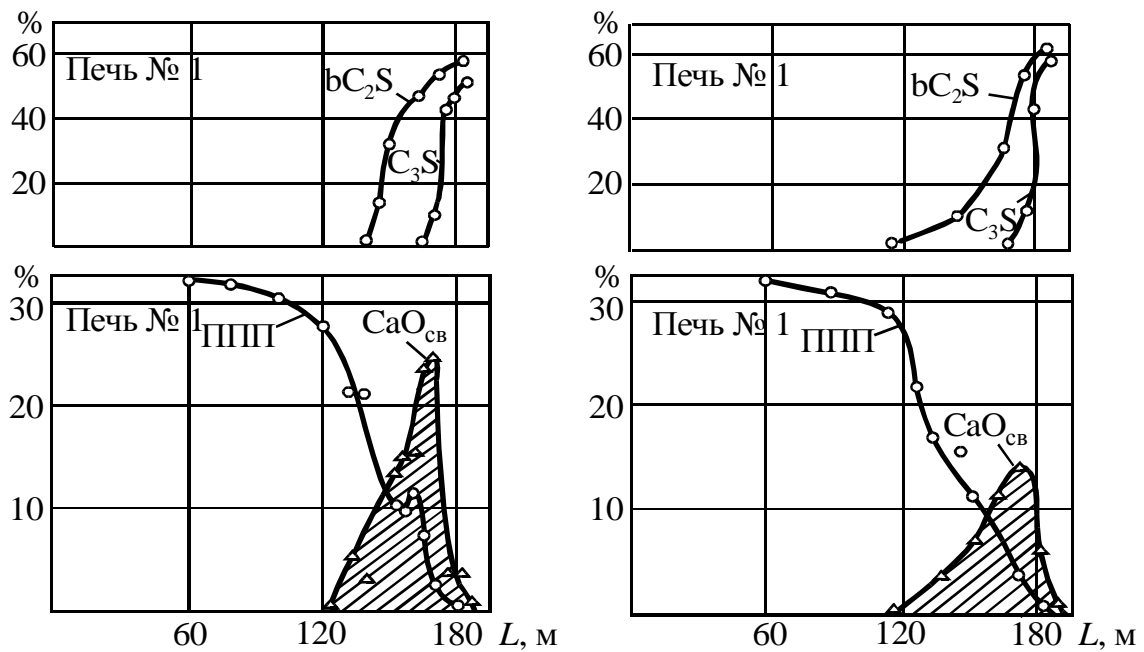


Рис. 4.24. Изменение обжигаемого материала по длине печи

Например, образование промежуточного соединения спуррита $(C_2S)_2CaCO_3$ в печи № 2 начинается со 110-го метра и наблюдается на 60 метрах; в печи № 1 начало образования этого минерала наступает позже, а разложение завершается значительно раньше. Максимальное образование CaO_{cb} в печи № 2 приходится на 170-й м и равно 14,36%. Образование белита $\beta-C_2S$ и алита C_3S здесь происходит более медленно. В печи № 1 содержание CaO_{cb} возрастает до 25,18%, затем происходит быстрое образование алита и на пяти метрах оно снижается с 25,18 до 3,7%.

Таким образом, для печи № 1 наличие спуррита характерно на коротком участке и наблюдается большая скорость образования алита, что благоприятно сказывается на качестве цементов. Образование спуррита на большом участке печи № 2 свидетельствует о переносе тепла из главной тепловой системы в холодную часть печи и нерациональном сжигании топлива. Изменение режима обжига не только вызывает смещение технологических зон, но и изменяет их длину (см. рис 4.23, 4.24).

Анализ химических превращений в зонах декарбонизации и спекания хорошо согласуется с графиками, показанными на рис. 4.21, 4.22. Гидродинамическая обстановка в печи № 1 ближе к поршневому режиму, который характеризуется равномерным движением материала, а протекание реакций при этом соответствует лучшему образованию клинкерных минералов.

На основе изложенного выше можно сделать выводы, что режим процесса обжига и факторы, увеличивающие расход топлива на обжиг клинкера, не только вызывают интенсивное перемещение материала и пылеобразование в печи, но оказывают определяющее влияние на гидродинамическую обстановку в печи. Повышенный расход топлива приводит к расслоению частиц потока материала и образованию для каждого размера гранул своих реакционных зон.

В случае обеспечения оптимального протекания процесса обжига, то есть при максимальной загрузке материалом и минимальном расходе топлива, вращающаяся печь можно отнести по гидродинамическим условиям к аппаратам идеального вытеснения, а при математическом описании структуры потока обжигаемого материала – использовать типовые модели идеального вытеснения и их модификации.

4.5. УСЛОВИЯ ТЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ ПРИ ОБЖИГЕ КЛИНКЕРА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ РЕАКЦИЙ КЛИНКЕРООБРАЗОВАНИЯ

Исследования [23] показывают, что даже в простейших бинарных смесях CaO и SiO₂ или CaO и Al₂O₃ наблюдается сложный многоступенчатый характер химического взаимодействия между компонентами. В смеси, состоящей из CaO и SiO₂ в соотношении 1:1, первоначально образуется ортосиликат кальция 2CaO·SiO₂, только на последующих стадиях реакций начинается энергичное образование CaO·SiO₂. На рис. 4.25 приведена последовательность образования соединений в системе CaO+SiO₂.

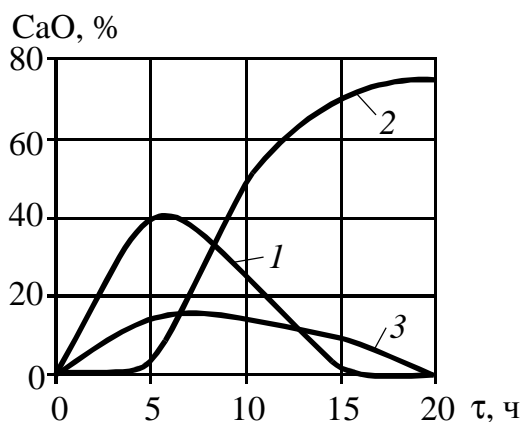


Рис. 4.25. Последовательность образования соединений в системе CaO+SiO₂: 1 – Ca₂SiO₄; 2 – CaSiO₃; 3 – Ca₃Si₂O₇

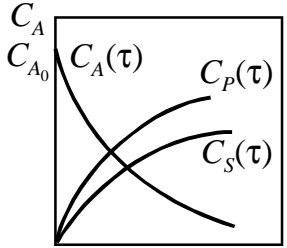
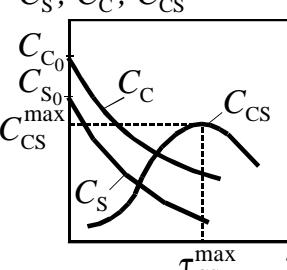
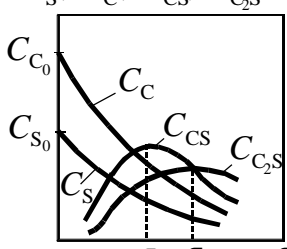
Ранее была показана сложность условий, в которых протекают реакции химического превращения многокомпонентной сырьевой смеси в клинкер.

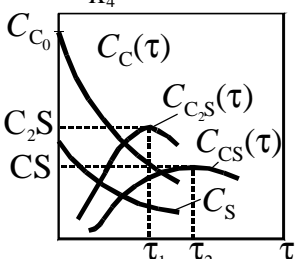
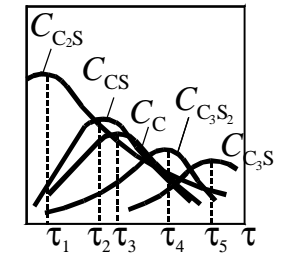
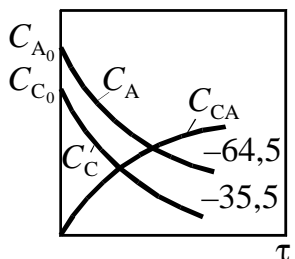
На основании анализа, проведенного в работе, представляется возможным выполнить классификацию основных реакций клинкерообразования и предложить кинетические уравнения, описывающие закономерности, последовательность и скорости химических реакций. В табл. 4.10, 4.11 представлены условия течения и типы основных реакций, стехиометрические уравнения, уравнения кинетики, а также графики изменения концентраций реагирующих компонентов во времени.

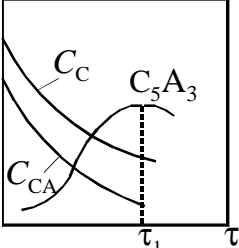
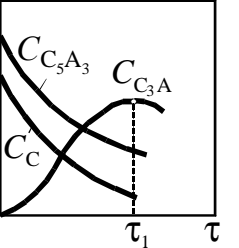
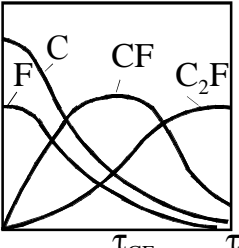
Условия течения основных реакций клинкерообразования

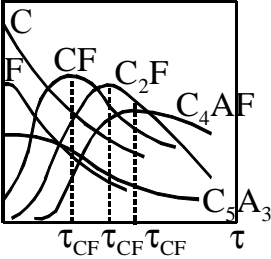
Основные реакции клинкерообразования	Процессы, протекающие в технологии клинкера	Условия реакций	Библиографический источник
1	2	3	4
Декарбонизация сырьевой смеси			
<p>Термическая</p> $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow - Q$ $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2 \uparrow - Q$ <hr/> <p>Термохимическая</p> $\text{CaCO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \chi \text{SiO}_2 \xrightarrow{t} \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + p \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CO}_2 \uparrow$	<p>Процесс термической и термохимической диссоциации карбонатной составляющей CaCO_3 и MgCO_3</p> <p>Диссоциация карбонатов является наиболее энергоемким процессом и составляет 25...40 % от расхода топлива. При обжиге клинкера зона декарбонизации, как правило, лимитирует скорость реакций образования клинкера в печи</p>	<p>Температура теоретическая $t^{\text{теор}} = 910^\circ\text{C}$</p> <p>В присутствии реакционных компонентов начальная температура разложения CaCO_3 и MgCO_3</p> $t_{\text{дис}}^{\text{CaCO}_3} = 600^\circ\text{C};$ $t_{\text{дис}}^{\text{MgCO}_3} = 600^\circ\text{C}$ <p>Эндотермический эффект разложения карбонатов</p> $Q_{\text{дис}}^{\text{CaCO}_3} = 1660 \dots 1800 \text{ кДж/кг}$ $Q_{\text{дис}}^{\text{MgCO}_3} = 1424 \text{ кДж/кг}$ <p>Коэффициент диффузии</p> $K_{\text{диф}}^{\text{CO}_2} \text{ CaCO}_3 = 4,5 \times 10^{-4} \text{ см/с}$	[23–26, 28, 77]
Реакции клинкерообразования в системе CaO – SiO₂			
<p>Образование волластонита метасиликата кальция</p> $\beta\text{-CaO} \cdot \text{SiO}$	<p>Образуется как промежуточная фаза клинкерообразования. Метасиликат кальция CS может иметь две формы: α-модификация – псевдоволластонит и β-модификация – волластонит и пароволластонит</p>	$t_{\beta\text{-CS}} = 600 \dots 900^\circ\text{C}$ $\Delta H_{\beta\text{-C}_2\text{S}} = 765 \text{ кДж/кг}$ $\Delta H_{\alpha\text{-C}_2\text{S}} = 725 \text{ кДж/кг}$	[23–25, 77]

Моделирование кинетики реакций клинкерообразования

Тип реакции по технологической схеме	Стехиометрические уравнения, графики зависимости $C(\tau)$	Кинетические уравнения реакции
1	2	3
Декарбонизация сырьевой смеси $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 - Q$	$A_{\text{ТВ}} \xrightarrow{900^\circ\text{C}} P_{\text{T}} + S_{\text{Г}}$ $A_{\text{ТВ}} \begin{cases} \xrightarrow{K_1} P_m \\ \xrightarrow{K_2} S_{\text{Г}} \end{cases}$ 	$\begin{cases} \frac{dC_A(\tau)}{d\tau} = -(k_1 + k_2) C_A(\tau); \\ \frac{dC_P(\tau)}{d\tau} = k_1 C_A(\tau); \\ \frac{dC_S(\tau)}{d\tau} = k_2 C_A(\tau) \end{cases}$
Образование силикатов кальция в системе $\text{CaO} - \text{SiO}_2$ Реакции образования метасиликата кальция – волостанита CS $\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightleftharpoons \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$C + S \xrightleftharpoons[K_2]{K_1} \text{CS}$ C_S, C_C, C_{CS} 	$\begin{aligned} \frac{dC_S(\tau)}{d\tau} &= -K_1[C_C(\tau)] + K_2[C_{\text{CS}}(\tau)]; \\ \frac{dC_C(\tau)}{d\tau} &= -K_1[C_C(\tau)] \times \\ &\quad \times [C_S(\tau) + K_2[C_{\text{CS}}(\tau)]; \\ \frac{dC_{\text{CS}}(\tau)}{d\tau} &= K_1[C_C(\tau)] \times \\ &\quad \times [C_S(\tau) - K_2[C_{\text{CS}}(\tau)]] \end{aligned}$
Образование белита C_2S Схема 1 $\text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightleftharpoons \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{CaO} \rightleftharpoons 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$C + S \xrightleftharpoons[K_2]{K_1} \text{CS} \xrightarrow{K_3} \text{CS} + S \xrightleftharpoons[K_5]{K_4} \text{C}_2\text{S}$ $C_S, C_C, C_{\text{CS}}, C_{\text{C}_2\text{S}}$ 	$\begin{aligned} \frac{dC_C(\tau)}{d\tau} &= -K_1[C_C(\tau)] \times \\ &\quad \times [C_S(\tau) + K_2[C_{\text{CS}}(\tau)]; \\ \frac{dC_S(\tau)}{d\tau} &= -K_1[C_C(\tau)] \times \\ &\quad \times [C_S(\tau) + K_2[C_{\text{CS}}(\tau)]; \\ \frac{dC_{\text{CS}}(\tau)}{d\tau} &= K_1[C_C(\tau)] \cdot [C_S(\tau)] \times \\ &\quad \times K_2[C_{\text{CS}}(\tau)] - K_3[C_{\text{CS}}(\tau)]; \\ \frac{dC_{\text{C}_2\text{S}}(\tau)}{d\tau} &= K_4[C_{\text{CS}}(\tau)] \times \\ &\quad \times [C_S(\tau) - K_5[C_{\text{C}_2\text{S}}(\tau)]] \end{aligned}$

1	2	3
<p>Образование белита C_2S Схема 2</p> $2CaO + SiO_2 \rightleftharpoons CaO \cdot SiO_2 \rightleftharpoons CaO \cdot SiO_2 + CaO$	$2C + S \xrightleftharpoons[K_2]{K_1} C_2S \xrightleftharpoons[K_4]{K_3} CS + C$ 	$\frac{dC_C(\tau)}{d\tau} = -K_1 [2[C_C(\tau)] \times [C_S(\tau)] + K_2[C_{CS}(\tau)]]$ $\frac{dC_{C_2S}(\tau)}{d\tau} = -K_1 [2[C_C(\tau)] \times [C_S(\tau)] + K_2[C_{CS}(\tau)]]$ $\frac{dC_{C_2S}(\tau)}{d\tau} = K_1 [2[C_C(\tau)] \times [C_S(\tau)] - K_2[C_{C_2S}(\tau)]]$
<p>Образование алита C_3S</p> $2CaO \cdot SiO_2 \rightarrow CaO + SiO_2 \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 + 3CaO \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$	$C_2S \rightleftharpoons_{K_6+K_8}^{K_5+K_7} CS + C \rightleftharpoons_{K_9}^{K_10} C_3S_2 \rightleftharpoons C_3S$ 	$\frac{dC_{C_2S}(\tau)}{d\tau} = -K_1 C_{C_2S}(\tau) + K_2 C_{C_2S}(\tau)$ $\frac{dC_{CS}(\tau)}{d\tau} = K_1 C_{C_2S}(\tau) - K_2 C_{CS}(\tau)$ $\frac{dC_C(\tau)}{d\tau} = K_3 C_{C_2S}(\tau) - K_4 C_{C_2S}(\tau)$ $\frac{dC_{C_3S_2}(\tau)}{d\tau} = (K_5+K_6) \cdot C_{CS}(\tau) \cdot C_C(\tau) - (K_6+K_8) \cdot C_{CS}(\tau) \cdot C_C(\tau)$ $\frac{dC_{C_3S}(\tau)}{d\tau} = K_9 \cdot C_{C_3S_2}(\tau) - K_{10} \cdot C_{C_3S}(\tau)$
<p>Образование алюминатов кальция в системе $CaO - Al_2O_3$</p> $CaO + Al_2O_3 \rightarrow CaO \cdot Al_2O_3$	$C + A \xrightleftharpoons[K_2]{K_1} CA$ 	$\frac{dC_C(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_C(\tau) \times C_A(\tau) + K_2 \cdot C_{CA}(\tau)$ $\frac{dC_A(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_C(\tau) \times C_A(\tau) + K_2 \cdot C_{CA}(\tau)$ $\frac{dC_{CA}(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_C(\tau) \times C_A(\tau) - K_2 \cdot C_{CA}(\tau)$

1	2	3
<p>Образование других модификаций на основе Al_2O_3</p> <p>$CaO \cdot Al_2O_3 + CaO +$</p> $\begin{cases} K_1 \\ \rightarrow 5CaO \cdot 3Al_2O_3 \\ K_2 \\ \rightarrow 9CaO \cdot 5Al_2O_3 \\ K_3 \\ \rightarrow 12CaO \cdot 7Al_2O_3 \end{cases}$ <p>$aCaO \cdot Al_2O_3 + bCaO +$ $+ cAl_2O_3 \rightarrow dCaO \cdot eAl_2O_3$</p>	$\begin{array}{c} \xrightarrow{K_1} \\ \xleftarrow{K_2} \\ C_5A_3 \\ \xrightarrow{K_3} \\ \xleftarrow{K_4} \\ CA+C \\ \xrightarrow{K_5} \\ \xleftarrow{K_6} \\ C_9A_5 \\ \xrightarrow{K_5} \\ \xleftarrow{K_6} \\ C_{12}A_7 \\ C_A, C_C, C_{CA} \end{array}$ 	$\frac{dC_{CA}(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_{CA}(\tau)C_C(\tau) + K_2 \cdot C_{C_5A_3}(\tau);$ $\frac{dC_C(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_{CA}(\tau)C_C(\tau) + K_2 \cdot C_{C_5A_3}(\tau);$ $\frac{dC_{C_5S_3}(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_{CA}(\tau)C_C(\tau) - K_2 \cdot C_{C_5A_3}(\tau)$
<p>Образование трехкальциевого алюмината $3CaO \cdot Al_2O_3$</p> <p>$5CaO \cdot 3Al_2O_3 + CaO \rightarrow$ $\rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$</p>	$C_5A_3 + C \xrightleftharpoons[K_2]{K_1} C_3A$ 	$\frac{dC_{C_5S_3}(\tau)}{d\tau} = -K_1 C_{C_5A_3} \times C_C + K_2 C_{C_3A}$ $\frac{dC_C(\tau)}{d\tau} = -K_1 C_{C_5A_3} \times C_C + K_2 C_{C_3A}$ $\frac{dC_{C_3S}(\tau)}{d\tau} = K_1 C_{C_5A_3} \times C_C - K_2 C_{C_3A}$
<p>Образование алюмоферритов кальция в системе $CaO - Al_2O_3 - Fe_2O_3$</p> <p>Образование двухкальциевого феррита</p> <p>$CaO + Fe_2O_3 \rightleftharpoons CaO \cdot Fe_2O_3$</p> <p>$CaO \cdot Fe_2O_3 \rightleftharpoons 2CaO \cdot Fe_2O_3$</p>	$C + F \xrightleftharpoons[K_2]{K_1} CF$ $C + F \xrightleftharpoons[K_4]{K_3} C_2F$ 	$\frac{dC_C(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_C(\tau) \times C_F(\tau) + K_2 \cdot C_{CF}(\tau)$ $\frac{dC_F(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_C(\tau) \times C_F(\tau) + K_2 \cdot C_{CF}(\tau)$ $\frac{dC_{CF}(\tau)}{d\tau} = -K_1 \cdot C_C(\tau) \times C_F(\tau) + K_2 \cdot C_{CF}(\tau)$ $\frac{dC_{C_2F}(\tau)}{d\tau} = -K_3 \cdot C_{CF}(\tau) \times C_C(\tau) + K_4 \cdot C_{C_2F}(\tau)$

1	2	3
<p>Образование четырехкальциевого алюмоферрита</p> $5\text{Ca}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} \rightleftharpoons \rightleftharpoons 4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_5\text{A}_3 + \text{C}_2\text{F} + \text{C} \xrightleftharpoons[K_6]{K_5} \text{C}_4\text{AF}$ 	$\frac{dC_{\text{C}_5\text{A}_3}(\tau)}{d\tau} = -K_5 C_{\text{C}_5\text{A}_3}(\tau) \times C_{\text{C}_2\text{F}}(\tau) C_{\text{C}}(\tau) + K_6 \cdot C_{\text{C}_4\text{AF}}(\tau)$ $\frac{dC_{\text{C}_2\text{F}}(\tau)}{d\tau} = -K_5 C_{\text{C}_5\text{A}_3}(\tau) \times C_{\text{C}_2\text{F}}(\tau) C_{\text{C}}(\tau) + K_6 \cdot C_{\text{C}_4\text{AF}}(\tau)$ $\frac{dC_{\text{C}}(\tau)}{d\tau} = -K_5 C_{\text{C}_5\text{A}_3}(\tau) \times C_{\text{C}_2\text{F}}(\tau) C_{\text{C}}(\tau) + K_6 \cdot C_{\text{C}_4\text{AF}}(\tau)$ $\frac{dC_{\text{C}_4\text{AF}}(\tau)}{d\tau} = -K_5 C_{\text{C}_5\text{A}_3}(\tau) \times C_{\text{C}_2\text{F}}(\tau) C_{\text{C}}(\tau) + K_6 \cdot C_{\text{C}_4\text{AF}}(\tau)$

Таким образом, моделирование процессов клинкерообразования дает возможность определить оптимальные концентрации, стехиометрические соотношения и условия течения реакций.

4.6. МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕКАРБОНИЗАЦИИ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

При обжиге клинкера происходит целый комплекс физико-химических процессов, скорость течения которых определяет производительность печей, а степень их завершения характеризует качество цемента.

Ранее было показано, что обжиг клинкера, а следовательно, и скорость процесса складываются из отдельных стадий, каждая из которых протекает в соответствующих технологических зонах. Определение скорости физико-химических процессов, происходящих в печи, затруднено параллельным протеканием реакций разложения и взаимодействия различных оксидов. Рассматривая изолированно наиболее важные реакции, можно получить модели для изучения влияния отдельных параметров на кинетику процессов, а также для управления процессом обжига [97].

Рассмотрим вывод кинетического уравнения на примере декарбонизации движущейся твердой фазы. При этом сделаем следующие допущения:

1. Химизм реакции определяется уравнением разложения CaCO_3



или



где α и β – стехиометрические коэффициенты.

2. Концентрацией примесей пренебрегаем из-за низкого содержания их в сырьевой смеси.

3. Образовавшиеся в зоне сушки сырьевые гранулы в процессе их движения и обжига в печи не изменяют своих размеров.

С учетом принятых допущений можно заметить, что в зоне химического разложения карбоната кальция процесс носит термический характер. Следовательно, при нагреве реакция в первую очередь протекает на внешней поверхности гранулы, затем зона реакции по мере нагрева постепенно перемещается внутрь гранулы, оставляя за собой полностью прореагировавший продукт. Внутри гранулы имеется непрореагировавшее ядро сырьевого компонента, размер которого в ходе химической реакции постепенно уменьшается (рис. 4.26).

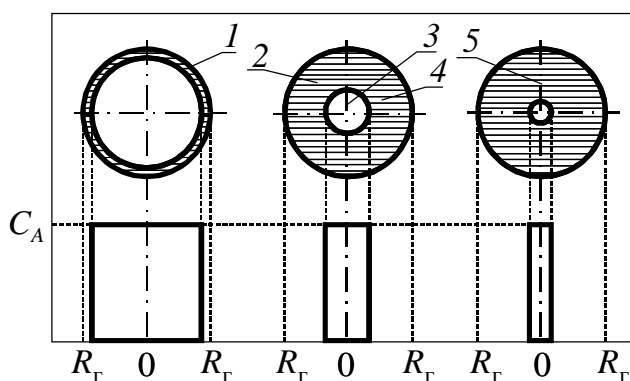


Рис. 4.26. Непрореагировавшее ядро сырьевого компонента: 1 – низкая степень превращения; 2 – продукт реакции; 3 – непрореагировавшее ядро; 4 – зона реакции; 5 – высокая степень реакции; C_A – концентрация твердого реагента в грануле

Таким образом, исходя из описанного физического представления, за основу математического описания для химической

реакции разложения карбоната кальция можно принять модель частицы с непрореагировавшим ядром. Эта реакция рассматривается по аналогии описания скорости химической реакции в гетерогенной системе «газ – твердое тело» как частицы с невзаимодействующим ядром [97]. Из числа факторов, тормозящих процесс превращения в грануле, в качестве лимитирующей стадии выберем химическую реакцию. Кроме того, учитывая однородность формы поступающих в зону разложения сырцовых гранул, ограничимся рассмотрением сферических частиц.

Сначала рассмотрим случай движения гранулы заданного размера в температурном поле. На рис. 4.27 показано изменение концентрации неразложившегося реагента в процессе реакции, лимитируемой скоростью химического разложения и протекающей согласно модели, показанной на рис.4.26.

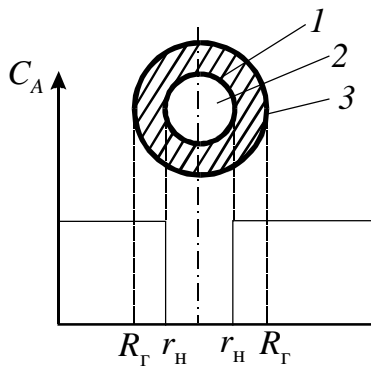


Рис. 4.27. Изменение концентрации реагента: 1 – перемещающаяся зона реакции; 2 – ядро гранулы; 3 – наружная поверхность гранулы; r_n – текущее значение радиуса гранулы

Скорость такой химической реакции r_A , отнесенная к единице поверхности, в данном случае равна

$$r_A = \frac{1}{S} \frac{dN_A}{dt} = \frac{1}{4\pi r_n^2} \frac{dN_A}{dt}, \quad (4.4)$$

где S – площадь зоны реакции; r_n – радиус непрореагировавшего ядра; N_A – мольное содержание реагента A в грануле.

Заметим, что

$$dN_A = \beta dN_z. \quad (4.5)$$

Принимая во внимание условие, согласно которому течение реакции не зависит от наличия какого бы то ни было слоя «золы», можно полагать, что количество реагирующего вещества пропорционально активной поверхности непрореагировавшего ядра. Следовательно, скорость реакции в соответствии с принятым стехиометрическим соотношением, отнесенную к единице поверхности ядра гранулы, можно выразить следующим уравнением:

$$r_A = -\frac{\beta dN_z}{4\pi r_H^2 dt} = \beta k_n C_z, \quad (4.6)$$

где k_n – константа скорости реакции, отнесенная к единице поверхности раздела фаз $A_{(ТВ)}$ и $Z_{(ТВ)}$; C_z – концентрация $Z_{(ТВ)}$ в грануле, количество молей $Z_{(ТВ)}$ в единице объема гранулы.

Обозначая мольную плотность реагента $A_{(ТВ)}$ в твердой фазе через ρ_A и объем гранулы через V_A , можно определить количество вещества, содержащегося в одной грануле:

$$N_A = \rho_A V_A. \quad (4.7)$$

Уменьшение объема или радиуса непрореагировавшего ядра эквивалентно исчезновению из зоны реакции dN_A моль твердого реагента или образованию βdN_z моль прореагировавшего вещества, следовательно,

$$-dN_A = -\rho_A dV_A = -\rho_A d\left(\frac{4}{3}\pi r_H^3\right) = -4\pi\rho_A r_H^2 dr_H. \quad (4.8)$$

Подставляя выражение (4.8) в уравнение (4.4), получаем с учетом формулы (4.6)

$$-\frac{\rho_A dt_H}{dt} = \beta k_n C_z. \quad (4.9)$$

Согласно уравнению Аррениуса,

$$k_n = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4.10)$$

где k_0 – константа, $k_0 \gg 1$; E – энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – температура в зоне реакции.

После разделения переменных, интегрирования и подстановки уравнения (4.10) в выражение (4.9) получаем

$$-\rho_A \int_{R_r}^{r_n} dr_n = \beta k_0 C_z \int_{t_0}^t e^{-E/RT} dt, \quad (4.11)$$

где R_r – радиус гранулы.

В правой части уравнения (4.11) k_0 , E , R , C являются константами, а температура T в пределах рассматриваемой зоны печи меняет свое значение от $T_n = T_0$ до $T_k = T$. Учитывая, что гранулы в зоне реакции находятся в непрерывном движении, обладая определенной скоростью v , изменение температуры на участке зоны можно представить уравнением

$$T = T_0 + \Theta v t, \quad (4.12)$$

где t – время движения гранулы в реакционной зоне; Θ – коэффициент пропорциональности, характеризующий изменение температуры материала по длине зоны реакции. Если принять допущение, что температура на рассматриваемом участке печи изменяется по линейному закону, то Θ является тангенсом угла наклона $T = f(l)$ (рис. 4.28). Тогда

$$\Theta = \operatorname{tg} \frac{T_k - T_n}{l_k - l_n}. \quad (4.13)$$

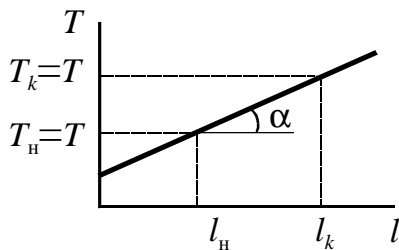


Рис. 4.28. Изменения температуры в реакционной зоне печи

Подставив выражение (4.12) в формулу (4.11) и проинтегрировав левую часть, получим уравнение, связывающее изменение радиуса гранулы, температуры и скорости движения материала:

$$\rho_A (R_\Gamma - r_H) = \beta k_0 C_z \int_{t_0}^t e^{-E/R(T_0 + \Theta vt)} dt. \quad (4.14)$$

Для вычисления интеграла в правой части уравнения (4.14) используем разложение в ряд Макларена:

$$\int_{t_0}^t e^{-E/RT} dt = \int_{t_0}^t dt - \frac{E}{R} \int_{t_0}^t \frac{dt}{T} + \frac{E^2}{2R^2} \int_{t_0}^t \frac{dt}{T^2} - \frac{E^3}{6R^3} \int_{t_0}^t \frac{dt}{T^3} + \frac{E^4}{24R^4} \int_{t_0}^t \frac{dt}{T^4}. \quad (4.15)$$

Ошибка при вычислении подынтегральной функции в этом случае не превышает 2,5%, так как остаточный член по формуле Макларена

$$R_4 < \frac{3}{5!} = \frac{1}{40}.$$

Тогда правую часть уравнения (4.14) при условии, что $v = \text{const}$, можно представить так:

$$\begin{aligned} \beta k_0 C_z \int e^{-E/R(T_0 + \Theta vt)} dt = \beta k_0 C_z \left\{ t - t_0 - \frac{E}{R\Theta v} \ln \frac{T_0 + \Theta v t}{T_0 + \Theta v t_0} + \right. \\ \left. + \frac{E^2}{2R^2} \left[-\frac{1}{\Theta v (T_0 + \Theta v t)} + \frac{1}{\Theta v (T_0 + \Theta v t_0)} \right] - \right. \\ \left. - \frac{E^3}{6R^3} \left[-\frac{1}{2\Theta v (T_0 + \Theta v t)^2} + \frac{1}{2\Theta v (T_0 + \Theta v t_0)^2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{E^4}{24R^4} \left[-\frac{1}{3\Theta v (T_0 + \Theta v t)^3} + \frac{1}{3\Theta v (T_0 + \Theta v t_0)^3} \right] \right\}. \quad (4.16) \end{aligned}$$

Введем обозначения:

$$a = \beta k_0 C_z \left[-t_0 + \frac{E}{R\Theta v} \ln (T_0 - \Theta v t_0) + \right. \\ \left. + \frac{E^2}{2R^2 \Theta v ((T_0 + \Theta v t_0))} + \frac{E^3}{12R^3 \Theta v ((T_0 + \Theta v t_0)^2)} + \right. \\ \left. \frac{E^4}{72R^4 \Theta v ((T_0 + \Theta v t_0)^3)} \right]; \quad (4.17)$$

$$b = \frac{\beta k_0 C_z}{\Theta v}; \quad c = b \frac{E}{R}; \quad d = b \frac{E^2}{2R^2}; \quad f = b \frac{E^3}{12R^3};$$

$$g = b \frac{E^4}{72R^4}; \quad z = T_0 + \Theta v t.$$

После подстановки и преобразований получим

$$\rho_A = (R_r - z_H) = a + b k_0 C_z t - c \ln z - \frac{d}{z} + \frac{f}{z^2} - \frac{g}{z^3}. \quad (4.18)$$

Если τ – время полного разложения гранул, то $r_H = 0$ и

$$z = z' = T_0 + Q v t. \quad (4.19)$$

Тогда уравнение (4.18) можно записать в следующем виде:

$$\rho_A R_r = a + b k_0 C_z \tau - c \ln z' - \frac{d}{z'} + \frac{f}{(z')^2} - \frac{g}{(z')^3}. \quad (4.20)$$

Разделив уравнение (4.18) на выражение (4.20), получим:

$$1 - \frac{r_H}{R_r} = \frac{a + b k_0 C_z t - c \ln z - \frac{d}{z} + \frac{f}{z^2} - \frac{g}{z^3}}{a + b k_0 C_z \tau - c \ln z' - \frac{d}{z'} + \frac{f}{(z')^2} - \frac{g}{(z')^3}}. \quad (4.21)$$

Для решения уравнения (4.21) целесообразно пренебречь в числителе и знаменателе двумя последними слагаемыми, так как они, по крайней мере, на порядок ниже стоящих впереди слагаемых, тем более, что f/z^2 и g/z^3 имеют противоположные знаками.

Тогда

$$1 - \frac{r_H}{R_r} = \frac{a + b k_0 C_z t - c \ln z - \frac{d}{z}}{a + b k_0 C_z \tau - c \ln z' - \frac{d}{z'}}. \quad (4.22)$$

Выражая величину степени превращения X_A через изменение объема непрореагировавшей части гранулы, можно записать следующее выражение:

$$1 - X_A = \frac{\frac{4}{3} \pi r_H^3}{\frac{4}{3} \pi R_r^3} = \left(\frac{r_H}{R_r} \right)^3. \quad (4.23)$$

Тогда, обозначив

$$\varepsilon = a + b k_0 C_z \tau - c \ln z' - \frac{d}{z'} \quad (4.24)$$

и подставив формулу (4.23) в уравнение (4.22) с учетом выражения (4.24), получим

$$1 - (1 - X_A)^{1/3} = \frac{a + b k_0 C_z t - c \ln z - \frac{d}{z}}{\varepsilon}, \quad (4.25)$$

ИЛИ

$$(1 - X_A)^{1/3} = 1 - \frac{a + b k_0 C_z t - c \ln z - \frac{d}{z}}{\varepsilon}. \quad (4.26)$$

Далее, подставив в уравнение (4.26) значения d , b , c и z , получим

$$(1 - X_A)^{1/3} = 1 - \frac{\beta k_0 C_z}{\varepsilon} \left\{ \left[-t_0 + \frac{E}{R \Theta v} \ln (T_0 - \Theta v t_0) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{E^2}{2 R^2 \Theta v (T_0 + \Theta v t_0)} - \frac{E^3}{12 R^3 \Theta v (T_0 + \Theta v t_0)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. \frac{E^4}{72 R^4 \Theta v (T_0 + \Theta v t_0)^3} \right] + t - \frac{E}{R \Theta v} \ln (T_0 - \Theta v t) - \right. \\ \left. - \frac{E^2}{2 R^2 \Theta v (T_0 + \Theta v t)} \right\}, \quad (4.27)$$

где

$$\varepsilon = \beta k_0 C_z \left\{ \left[-t_0 + \frac{E}{R \Theta v} \ln (T_0 - \Theta v t_0) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{E^2}{2 R^2 \Theta v (T_0 + \Theta v t_0)} - \frac{E^3}{12 R^3 \Theta v (T_0 + \Theta v t_0)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{E^4}{72 R^4 \Theta v (T_0 + \Theta v t_0)^3} \right] + \right. \\ \left. + \tau - \frac{E}{R \Theta v} \ln (T_0 - \Theta v \tau) - \frac{E^2}{2 R^2 \Theta v (T_0 + \Theta v \tau)} \right\}. \quad (4.28)$$

Уравнение (4.27) дает возможность определить скорость химической реакции, протекающей в отдельной грануле, в зависимости от концентрации основного реагента, изменения температуры и скорости движения гранулы в реакционной зоне. При $t_0 = 0$

$$(1 - X_A)^{1/3} = \frac{A + \frac{\beta k_0 C_z}{\Theta v} \left[\Theta v t - \frac{E}{R} \ln (T_0 + \Theta v t) - \frac{E^2}{2R^2(T_0 + \Theta v t)} \right]}{A + \frac{\beta k_0 C_z}{\Theta v} \left[\Theta v \tau - \frac{E}{R} \ln (T_0 + \Theta v \tau) - \frac{E^2}{2R^2(T_0 + \Theta v \tau)} \right]}, \quad (4.29)$$

где

$$A = \frac{\beta k_0 C_z E}{72 R^4 \Theta v T_0^3} \left(72 R^3 T_0^3 \ln T_0 + 36 R^2 T_0^2 E - 6R T_0 E^2 + E^3 \right). \quad (4.30)$$

Рассмотрим поток материала в зоне реакции, состоящий из гранул различных размеров.

При этом условимся, что:

- 1) количество гранул, проходящее через каждое сечение рассматриваемой зоны, не изменяется;
- 2) гидродинамические условия движения гранулированного материала соответствуют модели идеального вытеснения.

Пренебрегая изменением плотности и имея в каждом сечении рассматриваемой зоны ансамбль частиц различного гранулометрического состава R_{rj} с определенным законом распределения по фракциям, можно определить количество поступающего в реакционную зону материала $Q_{зр}$ в единицу времени:

$$Q_{зр} = \sum_{R_{ri} = R_{r \min}}^{R_{rm} = R_{r \max}} Q_{зр}(R_{rj}), \quad (4.31)$$

где $R_{\Gamma \min}$, $R_{\Gamma \max}$ – минимальный и максимальный размер гранул, поступающих в зону реакции. Среднюю степень превращения потока гранул, покидающих зону реакции, можно определить как сумму степеней превращения отдельных гранул различных размеров от $R_{\Gamma \min}$ до $R_{\Gamma \max}$. Если $R_{\Gamma}(\tau)$ – радиус наибольшей гранулы, полностью прореагировавшей в зоне реакции, и по условию идеального вытеснения время пребывания всех гранул из рассматриваемого сечения одинаково, то гранулы размером меньше $R_{\Gamma}(\tau)$ успеют полностью прореагировать за время, меньшее τ . Следовательно, степень непрореагировавшего потока можно определить суммой гранул, больших $R_{\Gamma}(\tau)$, то есть

$$1 - X_A = \sum_{R_{\Gamma i} = R_{\Gamma \min}}^{R_{\Gamma}(\tau)} [1 - X_A(R_{\Gamma j})] \frac{Q_{3p}(R_{\Gamma j})}{Q_{3p}}. \quad (4.32)$$

4.7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕКАРБОНИЗАЦИИ СЫРЬЕВЫХ ГРАНУЛ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР МЕЖДУ МАТЕРИАЛОМ И ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В случае двухфазного потока необходимо учесть градиент температуры между движущимися фазами. Для нахождения $T = T(t)$ можно допустить, что скорость нагрева гранулы в зоне конвективного теплообмена пропорциональна разности температур газовой среды $T_{\text{сп}}$ и гранулы $T_{\text{гр}}$, то есть (рис. 4.29)

$$\frac{dT}{dt} = \chi (T_{\text{сп}} - T_{\text{гр}}), \quad (4.33)$$

где χ – коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость изменения температуры гранулы при разности температуры между фазами, равной единице, с^{-1} .

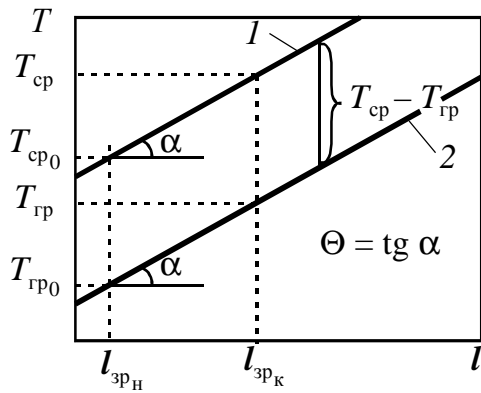


Рис. 4.29. Изменение температуры в реакционной зоне:

1 – температура газовой фазы $T_{cp} = f(l)$;
2 – температура гранулы $T_{гр} = f(l)$

Можно допустить, что температура газовой среды T_{cp} в процессе теплообмена равна температуре в печи и изменяется по линейному закону на отрезке длины реакционной зоны l . Считая скорость движения гранулы постоянной, можно записать, что

$$T_{cp} = T_{cp0} + \Theta l = T_{cp0} + \Theta v t. \quad (4.34)$$

Можно также допустить, что в рассматриваемом участке печи изменение разности температур по мере движения гранулированного материала есть величина постоянная, то есть

$$T_{cp} - T_{гр} = \text{const}. \quad (4.35)$$

Тогда

$$\int_{T_{гр0}}^T = \chi (T_{cp} - T_{гр}) \int_0^t dt, \quad (4.36)$$

где $T_{гр0}$ – начальная температура гранулы перед поступлением в реакционную зону. Из уравнения (4.36) находим $T_{гр}$:

$$T_{гр} = \frac{\chi T_{cp} t + T_{гр0}}{1 + \chi t} = \frac{T_{cp} t + \frac{T_{гр0}}{\chi}}{\frac{1}{\chi} + t}. \quad (4.37)$$

Подставив уравнение (4.34) в выражение (4.37), получим

$$T_{\text{гр}} = \frac{(T_{\text{ср}} - \alpha t) t + T_{\text{гр}0} \frac{1}{\chi}}{\frac{1}{\chi} + t}, \quad (4.38)$$

где $\alpha = \theta v$, определяется экспериментально и равняется тангенсу угла наклона прямой $T_{\text{ср}} = T_{\text{ср}0} + \alpha t$.

Введя обозначения

$$c = \frac{T_{\text{гр}0}}{\chi}, \quad k = \frac{1}{\chi}, \quad b = T_{\text{ср}},$$

получим

$$T_{\text{гр}} = \frac{\alpha t^2 + b t + c}{t + k}. \quad (4.39)$$

Тогда уравнение, связывающее изменение радиуса гранулы, концентрации реагента, температуры и скорости движения гранулы, исходя из принятой в разделе 4.6 модели, можно представить так:

$$\rho_A (R_r - r_H) = \beta k_0 C_z \int_0^t e^{-\frac{E}{R \left(\frac{\alpha t^2 + b t + c}{t+k} \right)}} dt. \quad (4.40)$$

Используя формулу Макларена и ограничиваясь при этом первыми пятью членами ряда, получим

$$\rho_A (R_r - r_H) = \beta k_0 C_z \left[\int_0^t dt - \frac{E}{R} \int_0^t \frac{(t+k)}{(\alpha t^2 + b t + x)} dt + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{E^2}{2R^2} \int_0^t \frac{(t+k)^2}{(\alpha t^2 + bt + x)^2} dt - \frac{E^3}{6R^3} \int_0^t \frac{(t+k)^3}{(\alpha t^2 + bt + x)^3} dt + \\
& \left. + \frac{E^4}{24R^4} \int_0^t \frac{(t+k)^4}{(\alpha t^2 + bt + x)^4} dt \right]. \tag{4.41}
\end{aligned}$$

Введем следующие обозначения:

$$I_1 = \int_0^t \frac{(t+k)}{(\alpha t^2 + bt + x)} dt; \quad I_2 = \int_0^t \frac{(t+k)^2}{(\alpha t^2 + bt + x)^2} dt; \tag{4.42}$$

$$I_3 = \int_0^t \frac{(t+k)^3}{(\alpha t^2 + bt + x)^3} dt; \quad I_4 = \int_0^t \frac{(t+k)^4}{(\alpha t^2 + bt + x)^4} dt.$$

С учетом принятых обозначений получим

$$\rho_A(R_\Gamma - r_H) = \beta k_0 C_3 \left(t - \frac{E}{R} I_1 + \frac{E^2}{2R^2} I_2 - \frac{E^3}{6R^3} I_3 + \frac{E^4}{24R^4} I_4 \right). \tag{4.43}$$

I_1, I_2, I_3, I_4 представляют собой интегралы, содержащие квадратичный трехчлен; после вычисления этих интегралов получим

$$I_1 = \frac{1}{2} \ln |z| + \frac{U}{\sqrt{P}} \left(2k - \frac{b}{a} \right); \tag{4.44}$$

$$I_2 = \frac{Mt + bc - ak(2G - kF)}{apZ} + \frac{4U[c - k(b - ak)]}{P^{3/2}}; \tag{4.45}$$

$$\begin{aligned}
I_3 = & \frac{ak^2(kF + 3G) + c(kF - G)}{2aPZ^2} - \frac{t(t + 2k)}{2aZ^2} + \\
& + \frac{3F[c(2ak - b) + ak^2(2ak - 3b)]}{2aP^2Z} + \\
& + \frac{G[c(2k - ab) + a^2k^2(2ak - 3b)]}{aP^{5/2}} U; \tag{4.46}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_4 = & \frac{3t(bk - 6ak - c) - 5at^2(3k + t)}{15a^2Z^3} + \\
& + \frac{F[c(c - bk - 5b + 6ak^2) - 5ak^3(2ab + ak)]}{3aP^2Z^2} + \\
& + \frac{c[F(c - kb(1 - ak)) - 10akG]}{15a^2PZ^3} + \frac{F(k^4 + 3c^2) - 4k^3G}{3PZ^3} - \\
& - 4a \left[c^2 - 2bk(5c - 1) + 2ak^2(6a - 4kb + 5ak^2) \right] \frac{U}{P^{7/2}}, \tag{4.47}
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
Z = at^2 + bt + c; \quad P = 4ac - b^2; \\
U = \arctg \frac{2at + b}{\sqrt{4ac - b^2}}; \quad F = 2at + b. \tag{4.48}
\end{aligned}$$

Подставив в выражение (4.44) уравнения (4.45)–(4.47) и решив их относительно значения времени полного разложения гранулы τ , при $r_H = 0$ получим

$$\rho_A R_\Gamma = k_0 \beta C_z \left(\tau - \frac{E}{R} A_1 + \frac{E^2}{2R^2} A_2 - \frac{E^3}{6R^3} A_3 + \frac{E^4}{24R^4} A_4 \right), \tag{4.49}$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 – значения соответственно I_1, I_2, I_3, I_4 при $t = \tau$.

Разделив выражение (4.43) на уравнение (4.49) получим

$$1 - \frac{r_{\text{н}}}{R_{\Gamma}} = \frac{t - \frac{E}{R} I_1 + \frac{E^2}{2R^2} I_2 - \frac{E^3}{6R^3} I_3 + \frac{E^4}{24R^4} I_4}{\tau - \frac{E}{R} A_1 + \frac{E^2}{2R^2} A_2 - \frac{E^3}{6R^3} A_3 + \frac{E^4}{24R^4} A_4}. \quad (4.50)$$

Отсюда определяется степень превращения X_A гранулы:

$$(1 - X_A)^{1/3} = \frac{t - \frac{E}{R} I_1 + \frac{E^2}{2R^2} I_2 - \frac{E^3}{6R^3} I_3 + \frac{E^4}{24R^4} I_4}{\tau - \frac{E}{R} A_1 + \frac{E^2}{2R^2} A_2 - \frac{E^3}{6R^3} A_3 + \frac{E^4}{24R^4} A_4}. \quad (4.51)$$

Из соотношения (4.43) можно определить перемещение радиуса непрореагировавшего ядра в зависимости от изменения концентрации основного компонента, радиуса гранулы, температуры и скорости ее движения:

$$r_{\text{н}} = R_{\Gamma} - \frac{k_0 \beta C_z}{\rho_A} \left(t - \frac{E}{R} I_1 + \frac{E^2}{2R^2} I_2 - \frac{E^3}{6R^3} I_3 + \frac{E^4}{24R^4} I_4 \right). \quad (4.52)$$

Уравнения (4.51), (4.52) позволяют с учетом принятых допущений определить скорость химической реакции отдельной гранулы, поступающей в реакционную зону с начальной температурой $T_{\text{гр}}$ и движущуюся с постоянной скоростью v в газовом потоке, имеющем начальную температуру $T_{\text{ср}}$.

4.8. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДЕКАРБОНИЗАЦИИ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБЖИГА НА СТЕПЕНЬ ПРЕВРАЩЕНИЯ СЫРЬЕВЫХ ГРАНУЛ

Полученные в подразделах 4.6 и 4.7 модели скорости химической реакции в однофазном (4.29), (4.32) и двухфазном (4.51), (4.52) потоках позволяют по имеющимся экспериментальным

данным технологических параметров подсчитать степень прореагировавшего материала. По этим уравнениям с помощью ЭВМ можно провести анализ влияния того или иного параметра на степень превращения сырьевой смеси. Это позволяет выбирать оптимальные сочетания значений технологических параметров для управления процессом обжига. В качестве примера рассмотрим модель, представленную в выражении (4.29).

Исходные параметры модели представлены в табл. 4.12.

Составим алгоритм расчета, который позволил бы определить влияние температуры обжига T и скорости движения гранулированного материала в зоне реакции v на степень превращения X_0 , то есть на степень разложения по стехиометрическому соотношению (4.3).

Таблица 4.12

Параметры модели декарбонизации сырьевых гранул

Параметры и константы модели	Условные обозначения	Размерность	Значение
Параметры			
Температура обжига	T	К	923...1373
Скорость движения	v	м/с	$1,66 \cdot 10^{-2} \dots 10,83 \cdot 10^{-2}$
Размер гранул (радиус)	R_r	м	0,005...0,02
Длина реакционной зоны	l_3	м	60
Начальная концентрация CaCO_3 в грануле	C_A	%	74...76
Константы			
Газовая постоянная	R	Дж/г·моль	$8,32 \cdot 10^3$
Энергия активации	E	Дж	$1,63 \cdot 10^5$
Константа скорости реакции при $y = 0$	k_0	–	1
Стехиометрический коэффициент	β	–	1
Плотность CaCO_3	ρ	кг/м ³	2000

Для анализа влияния указанных параметров в соответствии с алгоритмом была разработана программа, по результатам которой построены графики (рис. 4.30, 4.31) изменения степени превращения CaCO_3 в CaO при движении отдельной гранулы с различной скоростью в интервале температур от 650°C до 1050°C . Из графика (рис. 4.30, кривая 2) видно, что при увеличении скорости движения гранулы на 30% степень ее превращения снижается на 60%, а при увеличении скорости ее движения в 2 раза (кривая 3) степень реакции составляет примерно 20%, то есть снижается на 80%.

Следовательно, незначительное отклонение от оптимальной скорости движения вызывает значительное нарушение технологического режима.

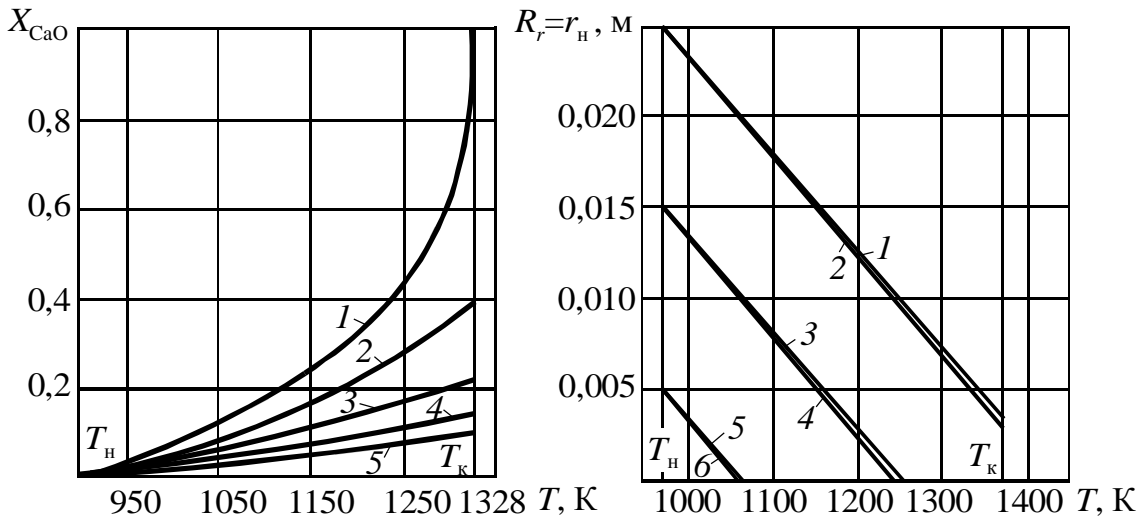


Рис. 4.30. Степень превращения CaCO_3 в CaO при движении отдельной гранулы в интервале температур от T_n до T_k с различной скоростью:

- 1 – 1 м/мин; 2 – 1,3 м/мин;
- 3 – 1,95 м/мин; 4 – 2,9 м/мин;
- 5 – 3,85 м/мин

Рис. 4.31. Перемещение непрореагировавшего ядра с учетом движение гранулы в интервале температур от T_n до T_k с постоянной скоростью 1 м/мин:

- 1 – $R_r = 0,025$ м, $C_{\text{CaCO}_3} = 0,74$;
- 2 – $R_r = 0,025$ м, $C_{\text{CaCO}_3} = 0,76$;
- 3 – $R_r = 0,015$ м, $C_{\text{CaCO}_3} = 0,74$;
- 4 – $R_r = 0,015$ м, $C_{\text{CaCO}_3} = 0,76$;
- 5 – $R_r = 0,005$ м, $C_{\text{CaCO}_3} = 0,74$;
- 6 – $R_r = 0,025$ м, $C_{\text{CaCO}_3} = 0,76$

Из уравнения (4.18) с учетом замечаний к выражению (4.21) и после подстановки a , z и d можно получить уравнение

$$R_r - r_n = \frac{\beta k_0 C_z}{\rho_A \Theta v} \left[\frac{E}{72R^4 T_0} (72R^3 T_0^2 E - 36R^2 T_0^2 E - 6RT_0 E^2 + \right. \\ \left. + E^3) \Theta v t - \frac{E}{R} \ln(T_0 - \Theta v t) - \frac{E^2}{2R^2(T_0 + \Theta v t)} \right], \quad (4.53)$$

которое позволяет изучить влияние размера гранулы и концентрации реагирующего вещества на характер перемещения непрореагировавшего ядра в глубь гранулы при ее движении в интервале температур с различной скоростью.

Из рис. 4.31 видно, что изменение концентрации CaCO_3 в сырьевой смеси от 0,74 до 0,76 оказывает незначительное влияние на скорость перемещения непрореагировавшего ядра. Увеличение размера гранулы требует пропорционального увеличения температуры и времени пребывания в реакционной зоне.

Рис. 4.32 отражает влияние скорости движения v на продвижение зоны реакции в глубь гранулы, определенное по формуле (4.53). Данные рис. 4.32 позволяют выбрать оптимальную скорость и длину реакционной зоны для заданного размера гранул.

Анализ влияния скорости движения и размера гранул на изменение скорости перемещения непрореагировавшего ядра показывает, что она постоянна (рис. 4.33) и одинакова (рис. 4.34) независимо от размера гранулы. На графике (рис. 4.35), построенном по уравнению (4.52), показано изменение скорости химической реакции материала, состоящего из ансамбля частиц различного гранулометрического состава.

Таким образом, разработанная модель позволяет оценить влияние отдельных технологических параметров режима обжига на скорость химических реакций, протекающих в печи, и в результате анализа с помощью разработанных программ выбрать оптимальное сочетание исследуемых параметров.

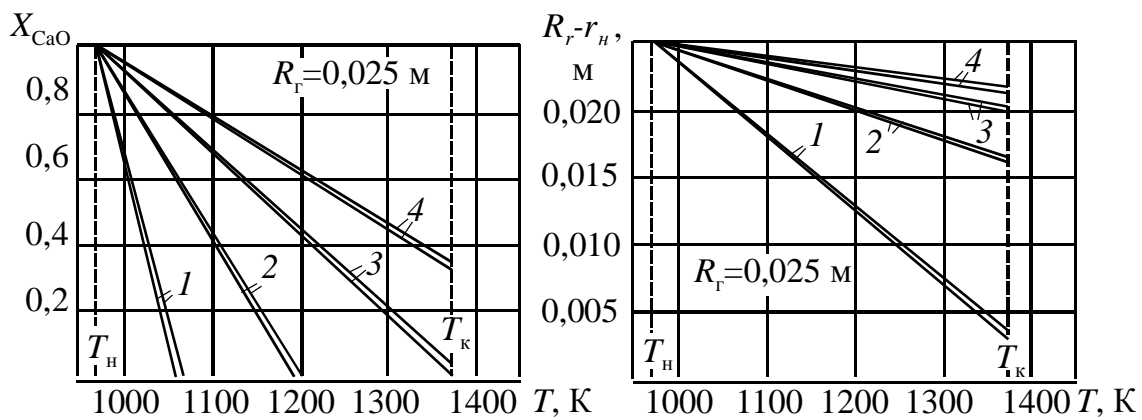


Рис. 4.32. Влияние скорости движения v на продвижение зоны реакции в глубь гранулы: 1 – 1 м/мин; 2 – 2,5 м/мин; 3 – 4,5 м/мин; 4 – 6,5 м/мин

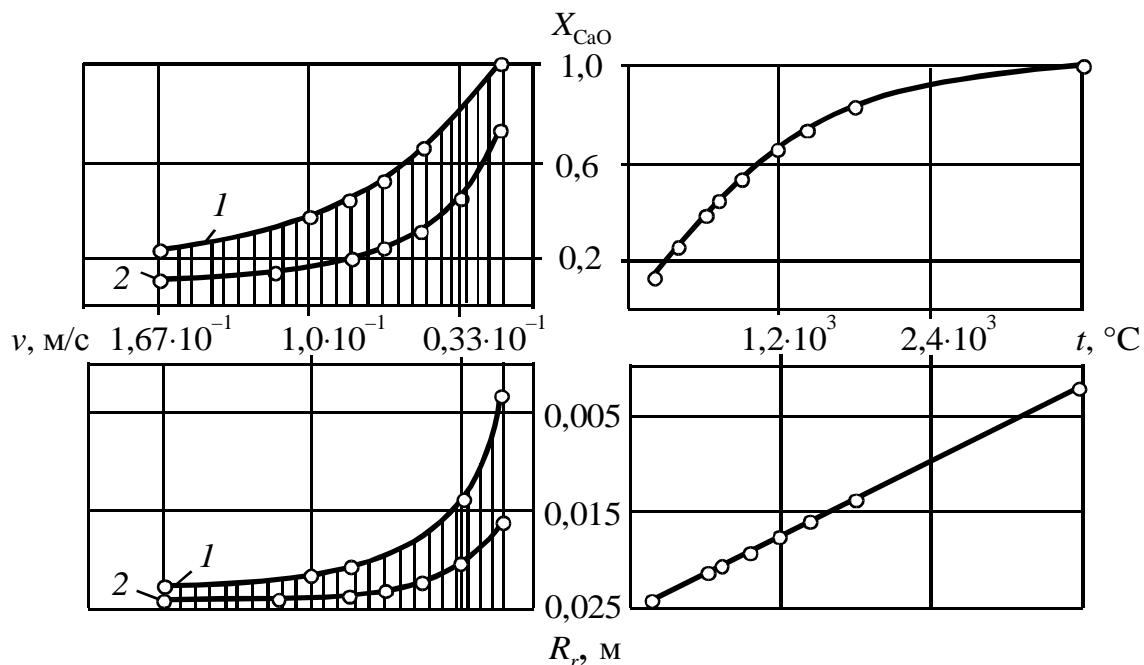


Рис. 4.33. Зависимость концентрации СаО от скорости движения и времени пребывания гранулы в зоне реакции: 1 – $R_r = 0,025$ м, $T_H = 973$ К, $T_K = 1373$ К; 2 – $R_r = 0,025$ м, $T_H = 973$ К, $T_K = 1133$ К

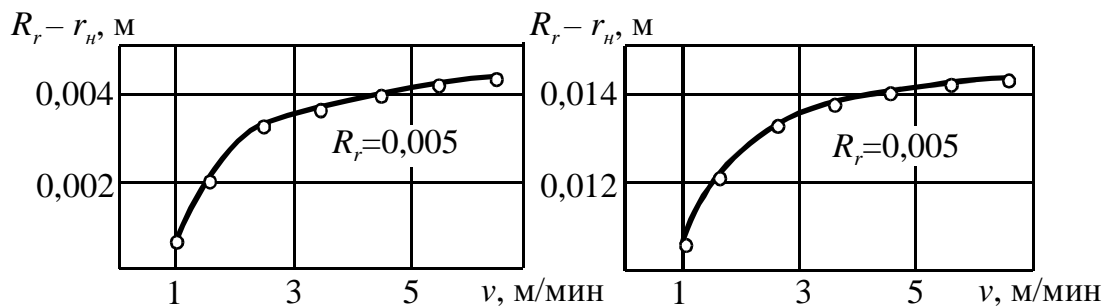


Рис. 4.34. Изменение радиуса непрореагировавшего ядра при изменении размера и скорости движения гранулы при $T = 1053$ К, $C_{CaCO_3} = 0,7$

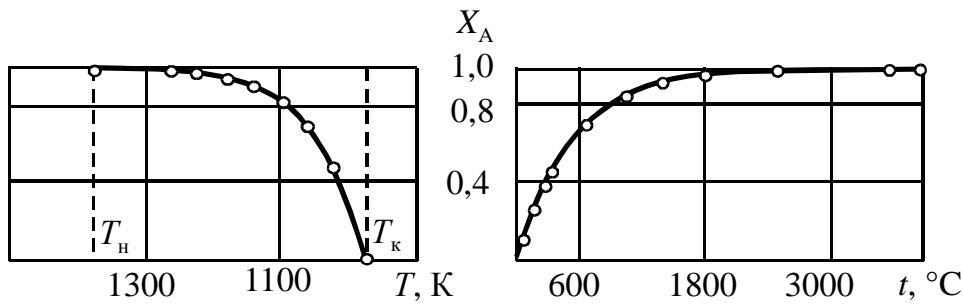
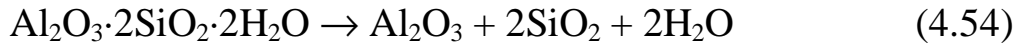


Рис. 4.35. Скорость химической реакции потока гранулированного сырья при движении его со скоростью 1 м/мин в интервале температур от $T_H = 973$ К до $T_K = 1373$ К:

гранулометрический состав потока: $R_r = 0,005$ м – 20%; $R_r = 0,01$ м – 25%;
 $R_r = 0,015$ м – 10%; $R_r = 0,02$ м – 20%; $R_r = 0,025$ м – 10%

Анализ процессов, протекающих во вращающейся печи при обжиге клинкера, показывает, что модель химического разложения карбонатов, полученная в подразделе 4.6, может быть использована и в зоне дегидратации. В этой зоне процесс носит термический характер, а выделение из каолина химически связанной воды по уравнению (4.54) происходит в интервале температур от 250 до 500 °С:



Следовательно, можно использовать полученные выше уравнения для исследования других реакций, например скорости дегидратации материала в печи, однако при этом необходимо учитывать изменения концентрации реагента, температуры и скорости движения гранулированного материала. Необходимо также учитывать стехиометрические соотношения и константы соответствующих реакций.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА И ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

5.1. Влияние режима обжига НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЕ В ЦЕМЕНТНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Режим обжига клинкера во вращающихся печах определяется конструктивными характеристиками агрегата – его размерами, объемом и особенностями теплообменных устройств. Определяющую роль в технологии получения клинкера играют загрузка печи материалом, тепловой и аэродинамический режим, а также скорость вращения. Качество клинкера определяется физико-химическими параметрами шлама.

Так как цементная печь относится к аппаратам химической технологии, в которых протекают тепломассообменные процессы, то основное внимание в работах [31, 98–107] уделено исследованию процесса обжига клинкера, при этом большое значение имеют вопросы изучения горения топлива, формы и положения факела, расхода топлива. В частности, по многолетним наблюдениям работы промышленных печей сделан вывод, что для создания оптимального режима обжига необходимо обеспечить наиболее интенсивное и полное сгорание топлива. Большое значение для экономии топлива играет температура вторичного воздуха, так как с ее возрастанием зона спекания приближается к головке печи, что способствует хорошей грануляции клинкера [101].

Отмечено также, что перерасход топлива оказывает влияние на толщину слоя материала в печи и на образование быстротекущей пыли, неблагоприятно отражается на стойкости футеровки [101]. Нерациональный тепловой режим ухудшает протекание химических процессов, кристаллизацию клинкерных минералов, изменяет модификацию алита и состава промежуточного вещества, вызывает диссоциацию окислов железа с образованием FeO и металлического железа, а также снижает прочностные характеристики клинкера [31, 102–107].

В исследованиях, представленных в работах [101, 108], установлено, что существует интервал температур, в пределах которого можно получить клинкер оптимального минералогического состава. Например, для сырьевых смесей Амвросиевского цементного комбината этот интервал находится в пределах 1430...1470 °С. Обжиг клинкера при оптимальных температурных режимах позволяет повысить его активность на 40...50 кг/см².

В исследованиях по изучению технологии обжига клинкера большое внимание уделяется изучению процессов, протекающих в подготовительных зонах печи, где происходит формирование гранулометрического состава материала, подогрев, химическое разложение сырьевой смеси [107, 109–112]. Установлено, что формирование гранулометрического состава материала [107, 111–114] зависит от свойств сырья, теплового режима и конструктивных характеристик печи, главным образом, от ее цепной завесы. При этом цепная завеса должна быть расположена так, чтобы гранулы выходили из нее с незначительным содержанием пыли. Для интенсификации теплообмена [107, 110, 112] рекомендуется увеличивать поверхность цепной завесы, однако существует оптимальное значение поверхности, обеспечивающее наибольшую суммарную теплопередачу в зонах подогрева, декарбонизации и спекания. Тип цепной завесы, плотность, навески цепей, кроме того, в значительной степени влияют на удельный расход тепла, скорость продвижения материала, интенсивность истирания гранул, пылеунос и производительность печи.

Подогрев материала, его химическое превращение связаны с движением материала и скоростью вращения печи. В последнее время наблюдается тенденция к увеличению этой скорости. Например, в работах [87, 107, 111, 115] установлено, что при увеличении скорости вращения ускоряется продвижение материала по печи, уменьшается толщина слоя, интенсифицируется перемешивание материала и за счет лучшей подготовки материала происходит смещение технологических зон в сторону холодного конца печи, что подтверждает интенсификацию теплообмена. При увеличении скорости вращения в 1,5–2 раза температура материала должна возрасти на 20...40%.

На основе изложенного выше можно сделать вывод, что процессы, протекающие в печи, определяются конструктивными

особенностями агрегата, а также ее технологическими параметрами, то есть расходом топлива, режимом обжига, скоростью вращения печи, параметрами шлама и другими характеристиками процесса обжига.

Участие пыли в процессе обжига влечет за собой многочисленные последствия, которые, несомненно, должны быть учтены в технологии получения клинкера [101, 116]. В этой связи особенно важно знать, каким образом режим обжига влияет на процессы клинкерообразования и пылеобразования.

Проведенными исследованиями установлен целый ряд причин пылеобразования. Так, в работах [117, 118] указывается, что величина скорости газового потока является основным фактором, влияющим на пылевынос из вращающейся печи. Замечено, что количество пыли зависит от влажности шлама [117, 119]. Однако при исследовании печей Себряковского цементного завода общий пылеунос при влажности шлама 41% был в 1,5 раза меньше, чем при влажности 38% [119]. В других случаях [73, 110] отмечается, что количество пыли, образующееся в цепной завесе, пропорционально количеству навешиваемых цепей и слабо зависит от других характеристик.

При исследовании режимов работы вращающихся печей [31, 101, 120] установлено, что основными причинами клинкерного пыления является передержка материала в высокотемпературной зоне, перегрузка технологических зон материалом (особенно зоны спекания) и повышенное содержание щелочей в обжигаемом материале. В этих работах делается вывод, что для полной ликвидации клинкерного пыления в мощных печах необходимо стабилизировать тепловой режим зоны спекания.

Таким образом, можно утверждать, что повышенное пылеобразование в печи является следствием нарушения оптимального технологического режима обжига.

Можно заметить, что авторы большинства работ в приведенном выше обзоре дают анализ влияния отдельных параметров на процессы, протекающие в промышленных печах. Например, в некоторых работах подробно рассматриваются условия теплообмена при обжиге сырьевых материалов в печах, при этом не учитываются другие факторы, такие, как условия движения материала и аэродинамики [98–100, 121, 122].

В работах, касающихся процессов пылеобразования, обращается внимание на характер и объем теплообменных устройств, положение факела в печи, влажность шлама. При этом не учитывается температурный режим печи и скорость движения материала. В частности, авторами [109, 110] предлагается увеличивать плотность цепных завес для интенсификации теплообмена, а в работе [88] рекомендуется увеличивать температуру в зоне декарбонизации для более эффективного использования зоны спекания. В работах [116, 123] для повышения производительности печи и активности клинкера рекомендуется вести обжиг на коротком факеле с большим и средним углами раскрытия.

Однако вращающиеся печи цементного производства являются многопараметрическими аппаратами химической технологии. Работа цементных печей как аппаратов сложных химико-технологических систем характеризуется большим числом контролируемых параметров и управляющих воздействий. Любое управляющее воздействие вызывает изменение не только контролируемых параметров, но и сказывается на качестве получаемого клинкера. Нерациональное управление печью, безусловно, отражается и на производительности промышленного агрегата.

Поэтому для выбора оптимального режима печи необходимо исследовать процесс обжига в промышленных условиях с учетом взаимного влияния основных технологических параметров.

5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА И ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ПЕЧАХ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В исследованиях закономерностей движения материала во вращающейся печи можно отметить два направления. Первое из них относится к изучению механизма движения гранулированного материала на моделях в холодной трубе. Затем проводятся исследования с последующим уточнением полученных результатов на реальных объектах [113, 114, 124]. Второе направление связано с изучением движения материала на промышленных агрегатах с использованием радиоактивных индикаторов [119, 125–128].

По данным исследований, касающихся изучения механизма движения материала во вращающихся трубах, для определения скорости его перемещения предложены формулы (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Скорость движения материала в цементных печах

Зависимость	Зона действия	Авторы
1	2	3
$\bar{v} = A \frac{D\pi\alpha}{1,77\sqrt{\beta}}$	Средняя скорость по длине печи	I. D. Sullian, Ch. G. Maier, D. C. Ralstan [129]
$\bar{v} = \frac{D\pi\dot{\alpha}}{0,308(24+\beta)}$	Средняя скорость по длине печи без подпорных колец	R.A.Rayard [130]
$\bar{v} = \frac{\pi}{45} D\pi \frac{\sin^3 \frac{\phi}{2}}{\phi - \sin \phi} \times \frac{\alpha + \gamma \cos \delta}{\sqrt{\sin^2 \beta - \sin^2 \alpha}}$	Средняя скорость по длине печи равномерного слоя материала	А.П.Ворошилов [131]
$\bar{v} = \frac{\pi}{45} D\pi \frac{\sin^3 \frac{\phi}{2}}{\phi - \sin \phi} \times \frac{\alpha + \gamma \cos \delta}{\sin \delta}$	Средняя скорость по длине печи неравномерного слоя материала	W. S. Saeman [132]
$\bar{v} = k_1 k_2 \frac{\pi}{45} \alpha D\pi \left(\frac{\sin^3 \frac{\phi}{2}}{\phi - \sin \phi} \right)$	Средняя скорость по длине печи с учетом внутренних устройств	Е. И. Ходоров [113, 114]
$\bar{v} = D\pi \frac{\sin^3 \frac{\phi}{2} \sin \alpha}{\sin \beta \cdot 90 \left(\frac{\phi}{2\pi} - \frac{\sin \frac{\phi}{2}}{2} \right)}$	Скорость материала по длине печи	Г. Гиги, Ф. Гюи [133]
$\bar{v} = A' D\pi \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \gamma(\varphi)$	Средняя скорость по длине печи	Е. И. Ходоров [114]

1	2	3
$\bar{v} = k_3 \times D \frac{n}{60} \operatorname{tg} U \left(\frac{F_{\text{ц}}}{F_{\text{фц}}} \right)^{-0,3}$	Движение пластичного материала в зоне цепей	В.Я.Абрамов [110, 134]
$\bar{v} = \frac{200 \times D \times n \times i}{\beta + 24}$	Средняя скорость движения в полном барабане	Д. Я. Мазуров [135]
$n = 2,3 D \times i \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{0,85} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)$	Линейная скорость по длине печи	В. Заболотный, З. Виш [125]
$v = k_4 \times D \times n \times i$	Средняя скорость по длине печи	Е.С.Кичкина, Л.С.Фрайман, Л.М.Манухина, В.В.Климова, Ф.И.Бедняков [126]

Обозначения в формулах: v – скорость движения материала; D – диаметр трубы, м; n – частота вращения трубы, с^{-1} $0,166 \cdot 10^{-2}$; α – наклон трубы, град; β – угол откоса материала; A – фактор, учитывающий влияние подпорных колец; i – наклон трубы, %; ϕ – центральный угол дуги, стягивающий хорду поднимающегося материала; δ – угол наклона материала к горизонту в плоскости, перпендикулярной оси трубы, рад; γ – угол наклона поверхности слоя материала относительно оси печи, рад; a – критерий, определяющий положение поверхности слоя материала во вращающейся печи, $a = f(\alpha, \beta, \gamma)$; k_1 – учитывает условия динамики; k_2 – характеризует сопротивление внутренних устройств; A' – коэффициент пропорциональности; ψ – коэффициент заполнения печи материалом; Y – угол между направлением цепей и осью печи; k_3 – коэффициент, зависящий от свойств материала; $F_{\text{ц}}/F_{\text{фц}}$ – безразмерный параметр, характеризующий плотность цепной завесы; H_1 – энтальпия шихты на входе в печь; H_2 – энтальпия шихты в исследуемой точке; k_4 – коэффициент, определяемый из эксперимента

Причины изменения скорости определяются [124] совокупным действием следующих факторов: диаметром, наклоном и частотой вращения печи, системой теплообменных устройств, шероховатостью внутренней поверхности печи, расходом и granulometрией материала, коэффициентом его внутреннего трения.

Изучение характера движения материала на промышленных агрегатах с помощью радиоактивных изотопов позволило установить действительную картину поведения движущегося материала в процессе обжига. Было установлено, что характер движения

материала в большинстве случаев подвержен значительным колебаниям [119, 127, 128]. Причиной колебаний является неоднородность гранулометрического состава и образование значительного количества мелких фракций в потоке материала. Однако это не отражается в существующих зависимостях, так как в уравнение движения потока материала не входят технологические параметры процесса.

На основе обобщения данных исследований 23 вращающихся печей [125] различных размеров, оснащенных различными системами теплообменников, сделана попытка уточнить формулу для оценки средней скорости движения материала во вращающихся печах. За основу была принята формула, предложенная в работе [126] (см. табл. 5.1).

При исследовании скорости движения материала в печи в результате изотопных измерений была сделана попытка определить степень влияния физико-химических показателей материала на его линейную скорость движения [125].

Проведенный анализ технической литературы по вопросам изучения скорости движения материала в печи показывает, что время пребывания материала в печах колеблется в широких пределах. Например, для печей Ачинского завода (печь $5,8 \times 4,8 \times 5,3 \times 175$ м) оно составляет от 114 минут, а для печей Себряковского завода (печь $3,6 \times 3,3 \times 3,6 \times 150$ м) – до 260 минут [127]. При этом скорость движения материала существенно изменяется даже в одной и той же печи.

Одной из наиболее важных причин, мешающих эффективной работе агрегатов цементного производства, является пылеобразование.

Изучение закономерностей образования пыли ведется в нескольких направлениях. В маломощных печах исследования проводились по изучению причин пылеобразования по длине печи [136, 137]. В основе этих исследований лежало изучение движения частиц мелкодисперсного материала в газовой среде. Предварительно исследования проводились на моделях в полых цилиндрах, где изучалась скорость витания частиц при различных механизмах движения потока пылеобразующей среды. В ряде работ изучался механизм пылеобразования, его физическая природа

да, а также его математическая интерпретация, движение сыпучего материала рассматривалось в челночном и пересыпном режимах [117, 118, 138, 139].

На основе этих исследований получены уравнения (табл. 5.2). Основными параметрами, определяющими процессы пылеобразования, являются скорость газов, объемная плотность навески цепей в области текучего материала и влажность материала.

Таблица 5.2

Пылеобразование в цементных печах

Зависимость	Зона действия	Авторы
$G_y = 2820 \times D^2 (f - \phi) v_{\Gamma} \times \gamma_{\Gamma} \times C_n,$ <p>где $C_n = 3,65 \times 10^{-4} \left(\frac{v_{\Gamma}^2}{g \times D_n} \right)^{15} \times \left(\frac{m_{\text{ц}}}{m_{\text{цз}}} \right) \left(\frac{v_{\text{ц}}}{v_{\text{цз}}} \right)^{-2} \left(\frac{100 - W_{\text{М}}^{\text{ц}}}{100} \right)^{15}$</p>	Вращающаяся печь с цепной завесой	Е.И.Ходоров, Б.И.Арлюк, М.М.Клюева [113, 136]
$G_y = k_n \times v_{\Gamma}^4$	Полый барабан	Е.И.Ходоров [117]
$G_y = 6600 / w^{3,45}$	Печь с цепной завесой	Л.С.Фрайман, Ю.Шлионский [118]
$G_y = 260 e^{-0,23L_{kp}}$	Печь с цепной завесой	Л.С.Фрайман, Ю.Шлионский [118]
$G_y = D L^{0,25} (0,45n - 0,02 n^2 - 0,516)$	Промышленные печи	В.С.Ефремов, В.Копелович, А.Мишулович, К.Т.Петкин [87]

Обозначения в формулах: G_y – пылеунос, $0,278 \cdot 10^{-3}$ кг/с; v_{Γ} – скорость газов в выходном сечении, м/с; γ_{Γ} – плотность газов в холодном конце печи, кг/м³; C_n – весовая концентрация пыли в отходящих газах, кг/кг · 10⁻³; $\gamma_{\text{м}}$ – удельный вес материала; $m_{\text{ц}}$ – вес цепей в области гранулированного материала; D_n – внутренний диаметр холодного конца печи, $m_{\text{цз}}$ – вес гранулированного материала, находящегося в зоне цепей; $v_{\text{ц}}/v_{\text{цз}}$ – коэффициент объемной плотности навески печей в области текучего материала; $W_{\text{М}}^{\text{ц}}$ – влажность материала, выходящего из зоны цепей.

Однако результаты многолетних наблюдений [116, 120, 123], исследования особенности работы мощных вращающихся печей

[30, 31, 35, 140] показывают, что основной причиной значительного пылеобразования является нарушение оптимальных технологических условий процесса обжига. Нарушение рационального режима обжига приводит к смещению технологических зон, к резким колебаниям движения материала и как следствие – к значительному пылеобразованию в зонах подготовки сырья, нарушению минералообразования цементного клинкера и клинкерному пылению в зонах спекания, охлаждения, на выходе из печи и в холодильнике. Причем высокое содержание пыли в потоке материала и газовой фазе, в свою очередь, влияет на перераспределение технологических зон и способствует клинкерному пылению [120, 141, 142].

Отсюда вполне закономерно следует, что, во-первых, пылеобразование в промышленных печах недостаточно объяснять челночным и пересыпным механизмами движения материала и, во-вторых, необходимо проведение дальнейших промышленных исследований, позволяющих определить влияние технологических параметров на процессы пылеобразования в печи.

5.3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКА ОБЖИГАЕМОГО МАТЕРИАЛА В ПЕЧАХ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В соответствии с поставленными целями и задачами в качестве объекта исследования были выбраны вращающиеся печи 5×185 Топкинского цементного завода, основные характеристики которых представлены в табл. 5.3.

Топкинский завод работает по технологической схеме по мокрому способу производства с влажностью шлама от 38 до 42%. В качестве сырья на заводе используются известняк, глина и пиритные огарки. Топливом является уголь марки СС Кузнецкого бассейна. В процессе производства наблюдаются значительные колебания активности клинкера. В частности, на период исследования печей среднесуточная активность изменялась от 35 до 58 МПа, причем эти изменения происходили в течение одного месяца. Результаты газового анализа (табл. 5.4) показали, что во всех печах наблюдался недожог топлива.

Таблица 5.3

Характеристики печей Топкинского цементного завода

Параметр	Обозначение	Размерность	Печь		
			№ 1	№ 2	№ 3
Частота вращения	n	об/с	0,0155	0,0153	0,02
Длина цепной завесы	$L_{ц}$	м	44,85	42,4	41,9
Поверхность цепей	$S_{ц}$	м	2245	2372	2049
Вес цепей	$G_{ц}$	кг · 10 ³	110,3	100,7	99,5

Таблица 5.4

Анализ отходящих газов печей Топкинского цементного завода

Показатели работы печи	Размерность	Печь		
		№ 1	№ 2	№ 3
Состав отходящих газов:				
среднее значение CO ₂	%	23,8	24,4	25,2
пределы колебаний CO ₂	%	19,8...26,2	20,6...29,2	21,8...27,6
среднее значение O ₂	%	2,3	1,6	2,1
пределы колебаний O ₂	%	1,2...4,4	0,4...4,4	0,8...3,6
среднее значение CO	%	2,8	2,3	1,8
пределы колебаний CO	%	0,8...7,6	0,2...7,4	0,8...8,0
Коэффициент избытка воздуха α	—	1,05	1,004	1,07
Потери тепла с химическим недожогом	кг/кг	0,03	0,025	0,02

Так, среднее содержание CO в отходящих газах за испытание колебалось от 1,8 до 2,8%. Только от недожога CO потери тепла составляли 596...876 кДж/кг клинкера, то есть от 20 до 30 кг условного топлива на тонну клинкера.

Учитывая, что наряду с CO в отходящих газах присутствовал также углерод, потери тепла от недожога составляли фактически еще большую величину. Кроме того, вследствие недожога топлива понижалась температура горения факела.

Для изучения влияния технологических параметров процесса обжига на скорость движения материала проводились исследования с помощью радиоактивных индикаторов на печах Топкинского

го цементного завода. В работе ставилась задача определения скорости движения материала в печах одного типа размером 5×185 м, вращающихся с различной частотой и имеющих различные цепные завесы.

Изучение движения материала проводилось на первой, второй и четвертой печах путем относительных измерений плотностей потоков γ -излучения от изотопа лантан-140 La^{140} в контрольных точках по всей длине печи. На рис. 5.1 представлена схема установки индикаторов по длине печи.

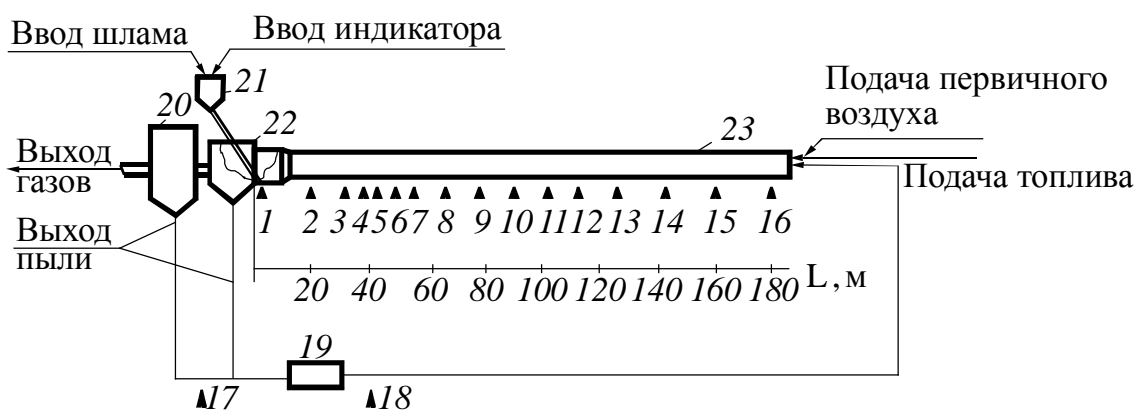


Рис. 5.1. Схема установки индикаторов при определении характера движения материала и интенсивности пылеобразования по длине печи: 1...18 – сцинтилляционные индикаторы; 19 – пневмовинтовой насос; 20 – электрофильтры; 21 – шлампитатель; 22 – пылесадительная камера; 23 – вращающаяся печь

Во время движения радиоактивного материала в печи через каждые полчаса регистрировались основные технологические параметры процесса обжига. Затем подсчитывались средне-статистические значения параметров. За время одного испытания в приведенном ниже корреляционном и регрессионном анализе эти данные принимались за одно наблюдение. Всего с регистрацией технологических параметров по движению материала было проведено 9 экспериментов. Во время проведения экспериментов машинисты вращающихся печей старались поддерживать обычный для них установившийся технологический режим этих печей.

Ввод радиоактивного индикатора в опытах по определению временных характеристик движения материала осуществлялся непосредственно в течку шлампитателя. Измерения проводились с помощью радиометрического комплекса, состоящего из радиометрического пульта УСИТ-20 и 20 сцинтилляционных датчиков, а также самописца Н-320/5 и Н-3710. Время подхода основной массы меченого материала к контролируемому сечению печи записывалось самописцем. Таким образом была получена информация о продвижении «меченой» порции шлама вдоль печи.

Исследование движения материала на промышленных агрегатах с помощью радиоактивных изотопов позволило установить характер поведения движущегося материала. Так, на рис. 5.2 представлено время пребывания материала в печи.

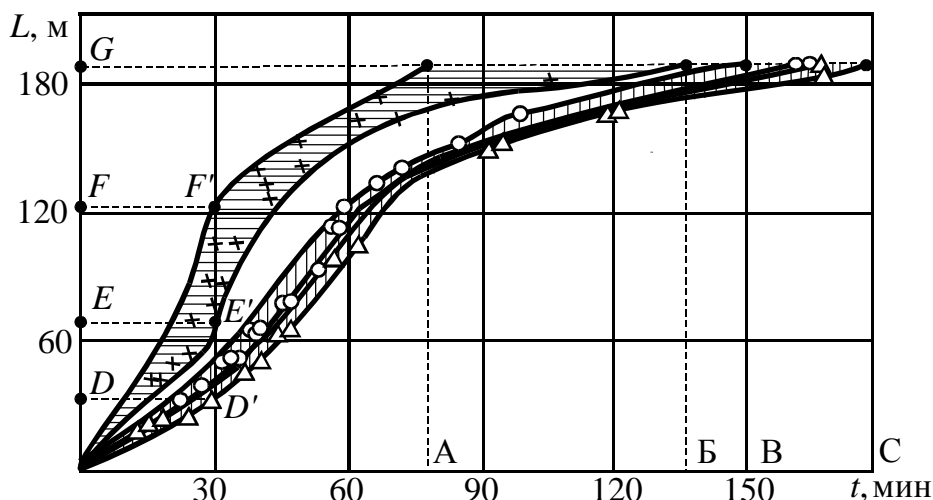


Рис. 5.2. График времени пребывания в печах:

○ – печь № 1; Δ – печь № 2; + – печь № 4

Графики показывают, что, например, в печи № 1 материал движется до 150-го м практически с одной скоростью. Только к концу цепной завесы замечается некоторое различие в изменении характера движения на этом участке, затем движение стабилизируется, то есть материал во всех трех наблюдениях почти одновременно проходит контрольные точки. Однако после 140-го...150-го м печи, где начинается спекание материала, наблюдается изменение скорости движения, и перед выходом из печи разница во времени составляет 29 мин (отрезок BC). В пе-

чи № 2 материал при движении до 150 м имеет некоторое колебание скорости, затем происходит выравнивание времени прохождения материалом контрольных точек и из печи материал выходит почти одновременно с материалом печи № 1. Характер движения материала в печи № 4 отличен от характера движения первой и второй печи. На рис. 5.3 видно, что в приведенных экспериментальных данных материал имеет разную скорость движения во всех технологических зонах и к моменту выхода из печи разница во времени движения составляет почти час (см. рис. 5.2, отрезок АБ).

Особенно наглядно характер движения материала в исследуемых печах проявляется на отрезке DF (см. рис. 5.2). За первые тридцать минут материал проходит в первой и второй печи немногим более 30 м. А в печи № 4 за то же время он может преодолеть расстояние в 120 м, то есть почти в 4 раза больше.

На рис. 5.3 изображены графики скорости движения обжигаемого материала в исследуемых печах, которые показывают, что его движение по длине печи носит неравномерный характер; это было также отмечено, например, в работах [115, 119, 126]. Так, в печи № 1 максимальные скорости характерны в третьем и пятом экспериментах для конца зоны декарбонизации и зоны экзотермических реакций.

В шестом и восьмом экспериментах максимальные скорости характерны для зоны подсушки и начала декарбонизации, то есть на участке печи в пределах от 50-го до 100-го м. Во печи № 2 материал движется равномерно и наибольшие скорости во всех трех экспериментах характерны для зоны подогрева и начала зоны декарбонизации, то есть на 50-м...100-м м.

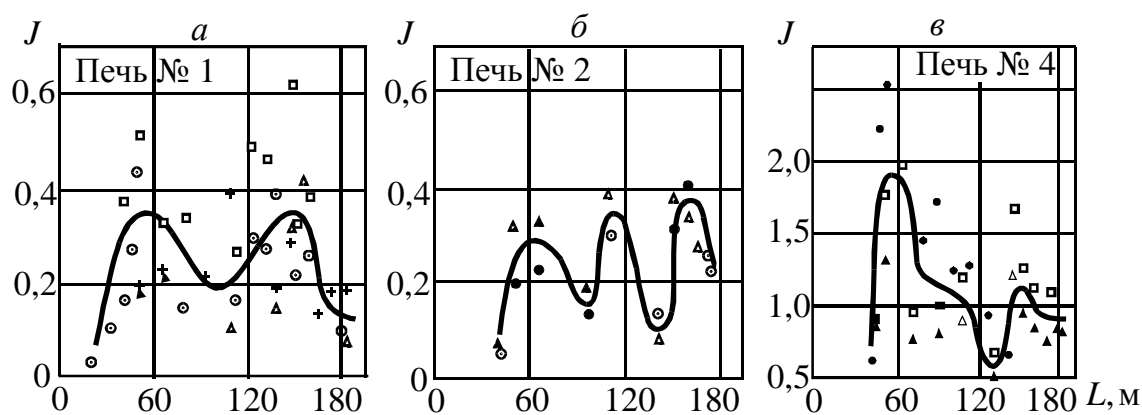


Рис. 5.3. Скорость движения материала по печам: а – № 1; б – № 2; в – № 4

Особенно заметна неравномерность движения материала в печи № 4. На рис 5.3 видно, что в зоне подсушки (50-й...100-й м) скорости резко возрастают, а в зоне декарбонизации (110-й м) движение материала несколько замедляется, затем в конце зоны декарбонизации и в зоне экзотермических реакций материал снова движется с большой скоростью.

Данные табл. 5.5 отражают значительное колебание технологических параметров во время ведения обжига. Например, колебания температуры отходящих газов происходят в пределах от 199 °С до 311 °С, что составляет 112 °С.

Температура в зоне кальцинирования колеблется от 624 до 780 °С, разрежение в пылеосадительной камере изменяет свое значение, например, на четвертой печи от 58 до 98 мм вод. ст. Естественно предположить, что столь резкое различие в значениях технологических параметров не может быть не связано с различием в поведении обжигаемого материала в печи и, в частности, с особенностями его движения в различных зонах.

Таблица 5.5

**Исследование движения материала
в печах Топкинского цементного завода**

Номер печи	Температура, °С		Разрежение за печью, кгс/см ²	Частота вращения, об/мин	Влажность шлама, %	Производительность печи, т/ч	Поверхность цепей, м ²	Масса цепей, т	Скорость движения, м/мин			
	отходящих газов	зоны кальцинирования							в цепной завесе	в зоне декарбонизации	в зоне спекания	на выходе из печи
1	228	640	122	0,93	40,0	67,0	2245	172	1,60	2,24	0,80	4,8
1	231	750	144	0,93	38,0	63,0	2245	166	1,55	2,34	0,48	5,3
1	200	638	166	0,93	39,5	70,5	2245	150	1,44	2,03	0,56	4,8
1	199	624	142	0,93	38,5	76,0	2245	150	1,40	2,03	0,36	4,3
2	199	642	150	0,92	38,0	64,0	2372	148	1,30	2,40	0,49	2,7
2	200	725	159	0,92	39,5	62,5	2372	144	1,40	2,18	0,48	3,7
4	311	731	89	0,97	40,4	71,5	2049	133	1,85	4,32	0,51	16,6
4	279	780	58	1,20	38,0	64,0	2049	108	2,46	4,00	0,90	4,97
4	286	770	74	1,20	38,0	72,0	2049	80	2,92	4,80	1,33	6,04

Проведенные исследования позволили установить следующее. Время пребывания материала в различных печах изменяется в широком диапазоне. Причем изменение времени пребывания составляет от 2 ч 52 мин до 1 ч 20 мин, что соответствует средней скорости прохождения 0,018 и 0,038 м/с (1,08 и 2,31 м/мин).

Скорость прохождения материала в печах № 1 и 2 значительно ниже, чем в печи № 4. Частично это можно объяснить замедленной скоростью вращения печей. Так, скорость печей № 1 и 2 равнялась 0,92...0,93 об/мин, а скорость печи № 4 была 1,2 об/мин. Однако увеличенная частота вращения печи № 4 не является единственной причиной роста скорости движения материала. Расчеты показывают (табл. 5.6), что за один оборот в среднем материал смещается по печам на следующее расстояние:

№ 1	1,16...1,30 м;
№ 2	1,25...1,36 м;
№ 4	1,43...1,93 м.

Наибольшая скорость продвижения наблюдается в печи № 4, что явно связано с режимом ее работы. Доказательством того, что технологические параметры в значительной мере влияют на скорость движения материала, является тот факт, что при одинаковой частоте вращения печи время пребывания материала в ней может изменяться в пределах одного часа (рис. 5.2, отрезок АБ).

Необходимо обратить внимание на то, что во всех экспериментах наблюдается временное понижение скорости движения материала в средней части печи. Наиболее отчетливо это явление проявляется в печи № 4, где особенно велика абсолютная скорость движения материала. Подобные явления отмечены также в работах [115, 128]. Временное понижение скорости движения материала можно объяснить образованием промежуточных легкоплавких соединений типа двойных карбонатов [101], которые, смачивая твердые частицы, могут снижать текучесть материала. На основе анализа полученных экспериментальных данных можно сделать выводы, что движение материала во вращающейся печи характеризуется не только числом оборотов и наклоном печи, оно определяется физико-химическим состоянием материала, гранулометрическим составом, его влажностью, интенсивностью газовой выделением, пиропластическим состоянием расплава и др.

Причиной значительных колебаний скорости движения материала в печи является изменение технологических параметров, которые определяют процесс обжига клинкера. Это изменение температур материала и газового потока, различие скорости вращения печи, количества и свойств подаваемого в печь шлама, а также физико-химических свойств обжигаемого материала. Изменение параметров процесса, в свою очередь, вызывает изменение скорости протекания процессов испарения, гранулообразования, разложения природных минералов, образования промежуточных и основных клинкерных минералов. Именно это, в первую очередь, определяет расположение технологических зон. Этим, в частности, можно объяснить отсутствие совпадения расчетных скоростей по известным формулам табл. 5.1 с экспериментальными данными, полученными в данной работе.

При моделировании процессов химической технологии теоретический закон распределения может задаваться уравнением математической модели того или иного процесса, описывающим структуру потоков в аппарате. Достоверность математической модели процесса проверяется сравнением теоретического распределения (или моментов функции распределения) с экспериментально найденным.

В проведенных исследованиях на Топкинском заводе получены кривые отклика на импульсное возмущение на входе в печь. Экспериментальные кривые отклика обрабатывались по методике изложенной в работах [8, 143]. По этой методике определялись параметры математических моделей структуры потока.

Первый момент распределения меченого материала при нанесении импульсных возмущений (C – кривая) записывается в следующем виде:

$$C = \int_0^{\infty} \tau c(\tau) d\tau, \quad (5.1)$$

где $c(\tau)$ – плотность распределения времени пребывания, характеризует долю меченого материала в выходящем потоке, находящегося в печи (время от τ до $\tau + \Delta\tau$).

Среднее время пребывания $\bar{\tau}$ материала в печи определяется по первому моменту функции распределения из соотношения

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} \tau c(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} c(\tau) d\tau} \approx \frac{\sum I \tau}{\sum \tau}, \quad (5.2)$$

где I – интенсивность излучения, имп/мин.

Функция распределения, мин^{-1} , имеет вид

$$c(\tau) = \frac{1}{\sum I \Delta\tau}. \quad (5.3)$$

В безразмерном виде при известном среднем времени пребывания материала в печи по формуле (5.2)

$$c = \bar{\tau} c(\tau) = \frac{\bar{\tau} I}{\sum I \Delta\tau}. \quad (5.4)$$

Безразмерное время пребывания в печи

$$\Theta = \tau / \bar{\tau}. \quad (5.5)$$

Полученные путем экспериментов выходные кривые распределения материала $C(\Theta)$ на импульсное возмущение на входе в печь (рис. 5.4–5.7) показывают, что характер распределения частиц потока неодинаков. Так, для печи № 1 кривая 1 характеризует движение частиц, близкое к режиму идеального вытеснения. В этом случае гранулы потока независимо от их размера обладают одной и той же скоростью. Для печи № 4 характер кривой 3 показывает, что перемещение частиц потока материала подвержено значительному распределению по скоростям их движения. Причем из сравнения рис. 5.4 и 5.5 видно, что расслоение частиц потока материала происходит в зоне декарбонизации, где наступает интенсивное газовыделение.

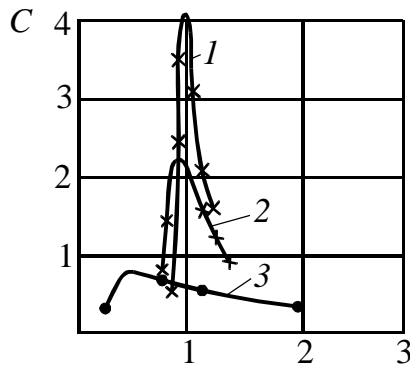


Рис. 5.4. Выходные кривые отклика на импульсное возмущение на входе в печь: 1 – печь № 1; 2 – печь № 2; 3 – печь № 4

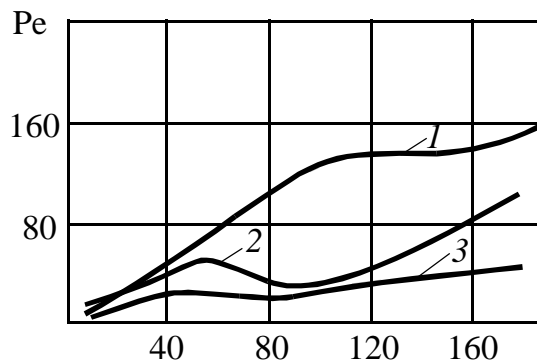


Рис. 5.5. Графики изменения критерия Пекле по длине печей: 1 – печь № 1; 2 – печь № 2; 3 – печь № 4

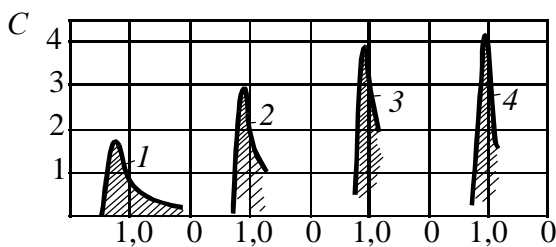


Рис. 5.6. Кривые отклика на импульсное возмущение, печь № 1, эксперимент 8:
 1 – выход из цепной завесы, 51 м, $Pe = 18,2$; 2 – зона декарбонизации, 109 м, $Pe = 80,0$;
 3 – зона спекания, 165 м, $Pe = 223,5$;
 4 – выход из печи, 184 м, $Pe = 220,1$

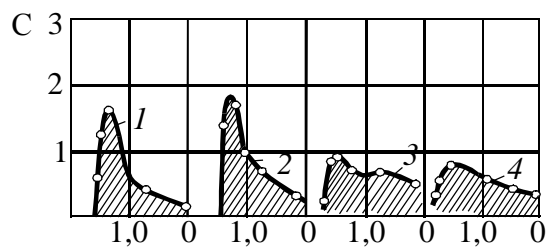


Рис. 5.7. Кривые отклика на импульсное возмущение, печь № 4, эксперимент 15:
 1 – выход из цепной завесы, 51,7 м, $Pe = 5,52$; 2 – зона декарбонизации, 106,8 м, $Pe = 9,8$;
 3 – зона спекания, 163 м, $Pe = 9,8$;
 4 – выход из печи, 180 м, $Pe = 7,56$

По экспериментальным кривым в результате обработки получены оценки среднего времени $\bar{\tau}$ и дисперсии σ :

$$\sigma = \frac{\sum \tau_i c_i}{\sum c_i} - \left[\frac{\sum \tau_i c_i}{\sum c_i} \right]^2, \quad (5.6)$$

характеризующих соответственно производительность печи и продольное перемешивание обжигаемого материала. Интенсивность продольного перемешивания характеризуется коэффициентом

том продольного перемешивания и определяется в виде безразмерного комплекса числа Пекле:

$$Pe = w L / D_L, \quad (5.7)$$

где w – средняя скорость потока; L – линейный размер системы.

Значение критерия Pe находим по кривым распределения $C(\tau)$ индикатора в контрольных сечениях по длине печи из выражения

$$\sigma^2 = 2 \frac{D_L}{w L} - 2 \left(\frac{D_L}{w L} \right)^2 (1 - e^{-wL/D_L}). \quad (5.8)$$

Гидродинамическая обстановка в исследуемых печах характеризуется по мере движения материала различным значением критерия Pe . Так, например, из данных, приведенных в табл. 5.6 и рис. 5.5, видно, что среднее значение критерия Pe на выходе печи № 1 равно 144, печи № 2 – 100, а для печи № 4 это значение равно 63. Если проанализировать данные, представленные в табл. 5.2, то для печи № 1 значение Pe колеблется от 220 до 54, для печи № 2 – от 115 до 85, а для печи № 4 – от 80 до 50. То есть гидродинамическая обстановка меняется не только в разных печах, но и в одной и той же. Это говорит о неустойчивом характере протекания физико-химических процессов в исследуемых печах.

Таблица 5.6

Значение числа Пекле по длине печи в контрольных точках

Номер печи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	–	20,0	18	30	44	51	–	55	–	69	44	56	–	42	59	99
1	1,7	30,8	59	79	–	104	169	204	–	247	349	–	165	247	223	200
1	3,9	29,1	27	35	39	–	–	–	–	–	–	–	54	–	–	–
1	–	14,5	29	18	42	–	80	–	128	–	223	173	220	–	–	–
2	4,1	17,2	19	38	–	19	2	60	78	44	54	71	85	–	–	–
2	2,9	8,9	14	16	22	26	32	72	85	86	104	115	–	–	–	80
4	1,8	12,9	28	42	48	13	21	–	27	22	63	18	–	–	–	80
4	1,04	3,67	4,7	5,5	7	18	20	57	71	76	9,8	68	7,6	60	–	–
4	1,8	2,9	4,3	7,8	9	18	25	–	36	–	–	–	–	50	–	–

Из теоретических представлений следует, что процесс обжига во вращающихся печах наиболее эффективен в том случае, если движение потока соответствует режиму идеального вытеснения. В то же время степень приближения к нему зависит от гидродинамического режима, в котором работает вращающаяся печь. Однако считается [143], что при $Re > 200$ можно с достаточной степенью точности представить структуру потока в реакторе моделью идеального вытеснения.

С точки зрения гидродинамической обстановки благополучными являются режимы на первой печи, где $Re = 200$ и $Re = 220$. Однако наиболее рациональный режим обжига наблюдается в четвертом эксперименте, где все процессы химических превращений протекали при минимальном расходе топлива, а загрузка печи составила 76 т/ч, что больше проектной (см. табл. 5.5).

Следовательно, в печах большой единичной мощности при рационально организованном процессе обжига можно не только теоретически предсказать, но и практически осуществить оптимальное течение процессов клинкерообразования. Для математического описания структуры потока материала во вращающихся печах, работающих по мокрому способу, в качестве основы может быть использована модель идеального вытеснения, а также ее модификации. Полученные данные являются основанием для разработки типовой математической модели.

5.4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА НА ЗАКОНОМЕРНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ПЕЧИ

Для оценки влияния отдельных факторов на характер движения материала был проведен корреляционный анализ [8, 97, 144]. Значения коэффициентов корреляции сведены в табл. 5.7 и на рис. 5.8.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что, как и следовало ожидать, наибольшее влияние на время пребывания материала в печи и скорость его продвижения оказывает частота вращения печи.

Корреляция между параметрами вращающейся печи

Параметры движения материала	Коэффициенты корреляции											Множественной
	$T_{о.г}$	$T_{з.к}$	$P_{п.к}$	$n_{п}$	$w_{ш}$	$Q_{вх}$	$L_{ц}$	$S_{ц}$	$G_{ц}$	$T_{кл}$	$T_{в.в}$	
$V_{ц.з}$	0,77	0,72	-0,89	0,96	-0,35	0,18	-0,55	-0,83	-0,52	-0,35	-0,19	0,98
$V_{з.д}$	0,94	0,74	-0,90	0,81	-0,19	0,21	-0,74	-0,88	-0,71	-0,38	-0,05	0,99
$V_{з.с}$	0,56	0,50	-0,73	0,85	-0,26	0,09	-0,40	-0,61	-0,37	-0,34	-0,17	0,98
V_{max}	0,78	0,43	-0,46	0,12	0,43	0,17	-0,41	-0,60	-0,39	-0,64	-0,14	0,99
τ_0	-0,64	-0,64	0,76	-0,90	0,40	-0,24	0,74	0,69	0,72	0,018	-0,13	0,99

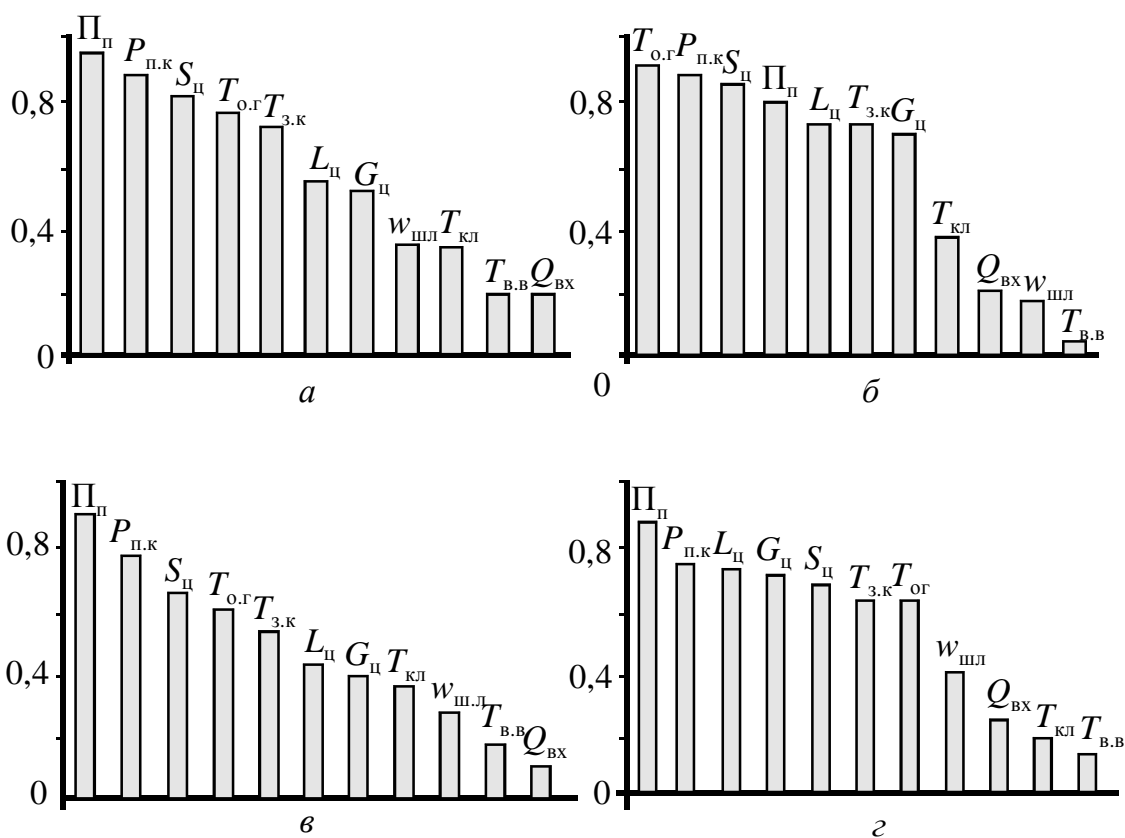


Рис. 5.8. Ранжирование коэффициентов корреляции, определяющих влияние технологических параметров на интенсивность пылеобразования: *а* – зона цепей; *б* – зона подогрева; *в* – зона декарбонизации; *г* – зона спекания

Существенное значение имеют также параметры цепной завесы (поверхность, вес, длина) и связанные с ними температура отходящих газов и разрежение за обрезом печи. Причем, чем выше температура отходящих газов и, следовательно, менее экономно работает печь, тем выше скорость перемещения материала в печи.

Особенно сильное влияние температура отходящих газов оказывает на скорость движения материала в зоне декарбонизации и подогрева, где коэффициент корреляции достигает 0,936, что выше, чем для частоты вращения (0,81). Вероятно, это связано с тем, что скорость движения материала в зоне декарбонизации сильно зависит от скорости диссоциации карбоната кальция, которая определяется интенсивностью теплообмена. С увеличением температуры отходящих газов увеличивается расход тепла и, следовательно, температура газового потока по длине печи. Вследствие этого усиливается теплопередача, диссоциация карбоната кальция и скорость движения материала в печи.

Такие параметры, как влажность шлама и производительность печи, для Топкинского цементного завода не оказали существенного влияния на характер движения материала. Вероятно, это связано с тем, что во время эксперимента во всех случаях материал за цепной завесой был пересушен и находился в пылевидном состоянии.

Необходимо заметить, что температура отходящих газов $T_{о.г.}$, разрежение в пыльной камере $p_{п.к}$ и поверхность цепной завесы $S_{ц}$ являются взаимосвязанными параметрами, поэтому значения коэффициентов корреляции имеют приблизительно одинаковую величину, но различные значения. Так, с увеличением поверхности цепных завес $S_{ц}$ уменьшается удельный расход тепла, интенсивность декарбонизации и скорость материала в зоне декарбонизации.

Увеличение разрежения в пыльной камере происходит вследствие увеличения гидравлического сопротивления печи в частности поверхности цепных завес $S_{ц}$, и также приводит к снижению температуры отходящих газов $T_{о.г.}$ и скорости $V_{з.д.}$

Для установления функциональной связи между параметрами процесса обжига и характера движения материала в печи, был проведен регрессионный анализ по методике, изложенной в рабо-

тах [8, 14, 97, 144]. В результате были получены следующие уравнения регрессии, приведенные также в работах [93, 94]:

$$\begin{aligned} \tau_0 = 337,1 - 0,217 T_{o,\Gamma} - 0,706 P_{п.к} - \\ - 294 n - 1,92 Q_{вх} + 8,35 L_{ц}; \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$V_{ц.з} = 0,0058 T_{o,\Gamma} + 0,0062 P_{п.к} + 4,79 n - 5,13; \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} V_{з.д} = 0,335 T_{o,\Gamma} - 0,006 T_{з.к} + 0,0287 P_{п.к} + \\ + 8,36 n - 0,165 L_{ц} - 5,42; \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} V_{з.с} = 38,7 - 0,02 T_{o,\Gamma} - 0,0045 T_{з.к} - 0,0156 P_{п.к} - \\ - 0,153 G_{ц} - 0,0078 T_{кл} - 0,0057 T_{в.в}; \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} V_{max} = 0,18 T_{o,\Gamma} + 0,196 P_{п.к} - 0,027 S_{ц} + 0,368 G_{ц} - \\ - 0,0363 T_{кл} - 0,00358 T_{в.в} + 24,23, \end{aligned} \quad (5.13)$$

где τ_0 – время пребывания материала в печи, мин; $V_{ц.з}$, $V_{з.д}$, $V_{з.с}$, V_{max} – скорость движения материала соответственно в цепной завесе, зоне декарбонизации, зоне спекания и максимальной, м/мин; $T_{o,\Gamma}$ – температура отходящих газов, °С; $P_{п.к}$ – разрежение за печью, кгс/см²; n – частота вращения печи, об/мин; $Q_{вх}$ – производительность печи, т/ч; $L_{ц}$ – длина цепной завесы, м; $T_{з.к}$ – температура зоны кальцинирования, °С; $G_{ц}$ – масса цепной завесы, т; $T_{кл}$ – температура клинкера на выходе из печи, °С; $T_{в.в}$ – температура вторичного воздуха, °С; $S_{ц}$ – площадь поверхности цепей, м².

Полученные уравнения дают возможность оценить влияние нескольких факторов на параметры скорости движения материала. Как видно из выражений (5.9) – (5.13), в уравнения движения потока материала вошли основные технологические параметры, которые характеризуют тепловой и аэродинамический режим, а также физические параметры печи и геометрические показатели цепной завесы.

На рис. 5.9 представлены графики, построенные по уравнению (5.9), показывающие изменение времени пребывания материала в печи в зависимости от изменения температуры отходящих газов $T_{o.g}$ при различных значениях скорости вращения печи и разрежения в пылесадительной камере $P_{п.к}$. При построении графиков по уравнению (5.9) загрузка печи $Q_{вх}$ и длина цепной завесы $L_{ц.з}$ принимались постоянными ($Q_{вх} = 67,9$; $L_{ц.з} = 43,32$), равными среднему значению в серии проведенных опытов.

Рис. 5.9 наглядно характеризует, в какой мере и насколько каждый из технологических параметров оказывает влияние на время пребывания материала в печи. Если рассматривать влияние параметров изолированно, то при установившихся значениях других переменных влияние температуры отходящих газов не очень значительно. Так, увеличение температуры отходящих газов на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшает время пребывания материала на 1 мин, в то время как увеличение скорости вращения печи только на $0,04\text{ об/мин}$ уменьшает время пребывания в печи на 10 мин. Однако столь существенный вклад скорости вращения печи в перемещение материала обусловлен совместным влиянием всех параметров процесса обжига. Более вероятно, что изменение скорости вращения печи вызывает изменение режима обжига, который, в свою очередь, определяет резкие колебания в движении материала.

На рис. 5.10 по уравнению (5.10) изображены зависимости влияния температуры отходящих газов $T_{o.g}$ на скорость движения материала в зоне теплообменных устройств. Разрежение $P_{п.к}$ и скорость вращения $V_{ц.з}$ при этом изменялось в трех точках.

Здесь при увеличении температуры отходящих газов на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ скорость движения возрастает на $0,6\text{ м/мин}$, при увеличении разрежения на выходе из печи на 100 кг/м^2 – на $0,72\text{ м/мин}$, а при увеличении скорости вращения печи на $0,1\text{ об/мин}$ – на

0,436 м/мин. И в этом случае совместное влияние основных технологических параметров дает более значительное изменение скорости движения материала в печи. Например, при увеличении температуры отходящих газов на 80 °С, разрежения – на 101 кг/м², скорости вращения – на 0,27 об/мин скорость движения увеличивается с 1,24 до 3,1 м/мин, то есть в 2,5 раза.

Статистический анализ уравнений (5.9) – (5.13) показал, что они хорошо описывают экспериментальные данные (табл. 5.8), коэффициенты уравнения статистически значимы, а модели в целом достоверны. Хотя коэффициенты при переменных уравнения (5.12) оказались статистически незначимыми, в целом совокупное влияние приведенных в уравнении параметров существенно (табл. 5.9).

Полученные зависимости требуют уточнения для других заводов, так как печи Топкинского цементного завода изучались в тот период, когда они находились в неустойчивом пусконаладочном режиме, когда материал за цепной завесой, как правило, был пересушен. Так, в проведенных экспериментах температура материала за цепями колебалась от 165 до 575 °С, а содержание пыли в потоке материала составляло от 37,5 до 65%.

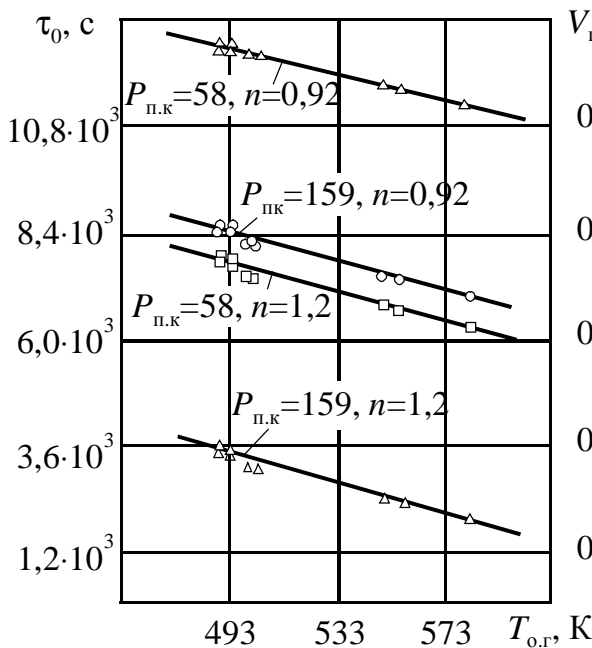


Рис. 5.9. Время пребывания материала в печи

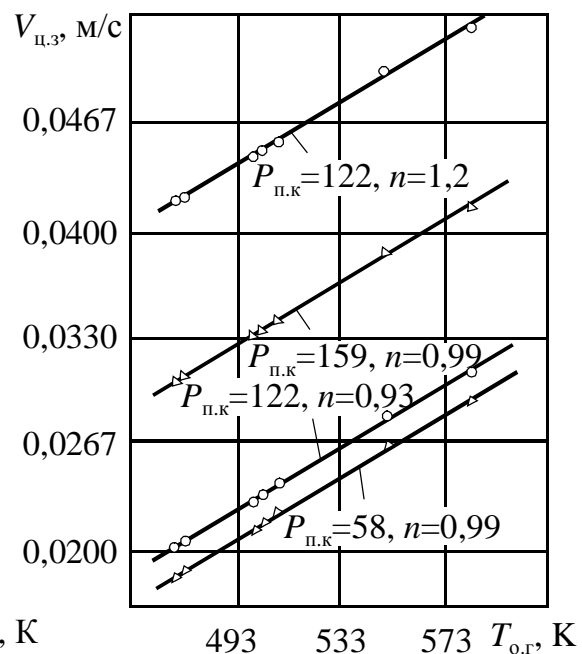


Рис. 5.10. Скорость движения материала в зоне цепной завесы

Таблица 5.8

Расчет скорости и времени движения материала в печи

Время движения, мин		Скорость движения, м/мин					
Расчетное	Экспериментальное	в цепной зоне		в зоне декарбонизации		Максимальная	
		расчетная	экспериментальная	расчетная	экспериментальная	расчетная	экспериментальная
172,99	172	1,42	1,60	2,24	2,24	4,56	4,30
164,50	166	1,58	1,55	2,32	2,34	5,02	5,30
152,60	150	1,43	1,44	2,12	2,03	4,56	4,80
147,80	150	1,37	1,40	1,94	2,03	1,39	4,30
147,70	148	1,38	1,30	2,39	2,40	2,25	2,70
144,00	144	1,44	1,40	2,18	2,18	4,14	3,70
133,13	133	1,39	1,85	4,32	4,32	16,05	16,30
107,53	108	2,61	2,46	4,02	4,02	4,70	4,97
80,44	80	2,75	2,2	4,77	4,80	6,34	6,04

Таблица 5.9

Статистическая оценка параметров вращающейся печи

Параметры движения материала	$T_{o.g}$	$T_{з.к}$	$P_{п.к}$	n	$Q_{вх}$	$S_{ц}$	$G_{ц}$	$T_{кл}$	$T_{в.в}$	Значения критерия Фишера
$V_{ц.з}$	1,92	6,6	1,1	4,5	—	—	—	—	—	42,5
$V_{з.д}$	12,7	6,6	6,8	9,4	—	—	—	—	—	354
$V_{з.с}$	3,4	2,0	3,9	—	—	—	2,87	2,19	2,6	4,6
V_{max}	6,8	—	9,1	—	—	3,3	2,85	2,45	6,1	62,0
τ_0	3,9	—	7,2	15,3	10,3	—	—	—	—	253,0

Однако именно такие условия работы печей позволили получить, на наш взгляд, новую и интересную информацию о степени влияния технологических параметров на процессы, протекающие в печи, а полученные данные позволили в дальнейшем выбрать более рациональный режим процесса обжига. Кроме того, результаты этих исследований могут быть полезны для заводов, работающих на непластичном и плохо гранулированном сырье.

Сравнивая уравнения, представленные в табл. 5.1, с уравнениями (5.9) – (5.13), можно сделать вывод, что уравнения, кото-

рые получены на холодных моделях, необходимо дополнить параметрами технологического процесса. Следовательно, общий вид уравнения движения может быть представлен в таком виде:

$$v = K_{\text{п}} f (T_{0.Г}, P_{\text{п.к}}, T_{zi}, X_c) n D \alpha , \quad (5.14)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональности, характеризующий технологическую зону печи; T_{zi} – температурный режим i -й технологической зоны; X_c – характеристика физико-химических параметров обжигаемого сырья.

Для скорости движения материала в зоне цепей общий вид уравнения следующий:

$$v_{\text{ц.з}} = K_{\text{ц.з}} f (T_{0.Г}, P_{\text{п.к}}, X_c) n D \alpha , \quad (5.15)$$

для скорости движения материала в зоне декарбонизации:

$$v_{\text{з.д}} = K_{\text{з.д}} f (T_{0.Г}, P_{\text{п.к}}, T_{\text{з.к}}, X_c) n D \alpha , \quad (5.16)$$

для скорости движения в зоне спекания:

$$v_{\text{з.с}} = K_{\text{з.с}} f (T_{0.Г}, P_{\text{п.к}}, T_{\text{з.к}}, T_{\text{з.с}}, X_c, I_{\text{в.в.д}}) n D \alpha . \quad (5.17)$$

где $K_{\text{п}}$, $K_{\text{ц.з}}$, $K_{\text{з.д}}$, $K_{\text{з.с}}$ – коэффициенты пропорциональности, определяемые из эксперимента.

Зависимость между временем пребывания и скоростью движения материала в различных зонах одного типа печи хорошо описывается линейными алгебраическими уравнениями вида:

– для времени пребывания материала в печи

$$\tau_0 = K_0 - K_1 T_{0.Г} - K_3 n - K_4 Q_{\text{вх}} + K_5 L_{\text{ц}}, \quad (5.18)$$

– для скорости движения материала в зоне цепей

$$v_{ц.з} = -K_0^{ц.з} + K_1^{ц.з} T_{о.г} + K_2^{ц.з} P_{п.к} + K_3^{ц.з} n, \quad (5.19)$$

– для скорости движения материала в зоне декарбонизации

$$v_{з.д} = -K_0^{з.д} - K_1^{з.д} T_{о.г} + K_2^{з.д} P_{п.к} + K_3^{з.д} T_{з.к} + K_4^{з.д} n - K_5^{з.д} L_{ц.з}, \quad (5.20)$$

– для скорости движения в зоне спекания

$$v_{з.с} = -K_0^{з.с} - K_1^{з.с} T_{о.г} - K_2^{з.с} P_{п.к} - K_3^{з.с} T_{з.с} + K_4^{з.с} C_{ц.з} - \\ - K_5^{з.с} T_{кл} - K_6^{з.с} I_{в.в.д}. \quad (5.21)$$

Анализ уравнений показывает, что факторы, увеличивающие расход топлива на обжиг клинкера, вызывают более интенсивное перемещение материала, особенно в зоне подогрева и декарбонизации. Общий вид уравнений движения для печей одного типа-размера можно представить полиномом первого порядка, в который наряду с частотой вращения входят основные технологические параметры, характеризующие тепловой и аэродинамический режим печи.

5.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА И ИНТЕНСИВНОСТИ ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ПЕЧАХ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Результаты многолетних наблюдений [30, 101, 116, 120, 139] и исследования особенности работы мощных вращающихся печей [30, 31] показывают, что основной причиной значительного пылеобразования является нарушение оптимального режима обжига

клинкера. Нарушение рационального режима обжига приводит к значительному пылеобразованию в зонах подготовки сырья, нарушению минералообразования клинкера и клинкерному пылению в зонах спекания, охлаждения, на выходе из печи и в клинкерном холодильнике. Высокое содержание пыли в потоке материала и газовой фазе, в свою очередь, влияет на теплообмен и положение технологических зон. Это способствует клинкерному пылению [116, 120]. Однако не ясна картина течения этих процессов и не в полной мере известны причины, их вызывающие. Отсюда очевидна необходимость проведения промышленных исследований, которые позволили бы установить характер течения этих процессов и определить влияние технологических параметров на пылеобразование в печи.

В процессе выполнения экспериментальных работ наряду с исследованиями скорости и характера движения материала [93, 94] была поставлена задача определения очагов, характера и интенсивности пылеобразования, а также степени влияния технологического режима на эти процессы как в отдельных зернах, так и по всей длине печи.

Для решения поставленной задачи была разработана методика проведения исследований. На рис. 5.1, 5.11 показана схема установки индикаторов по длине печи, которая с помощью сцинтилляционных датчиков позволила определить характеристики пыления печей.

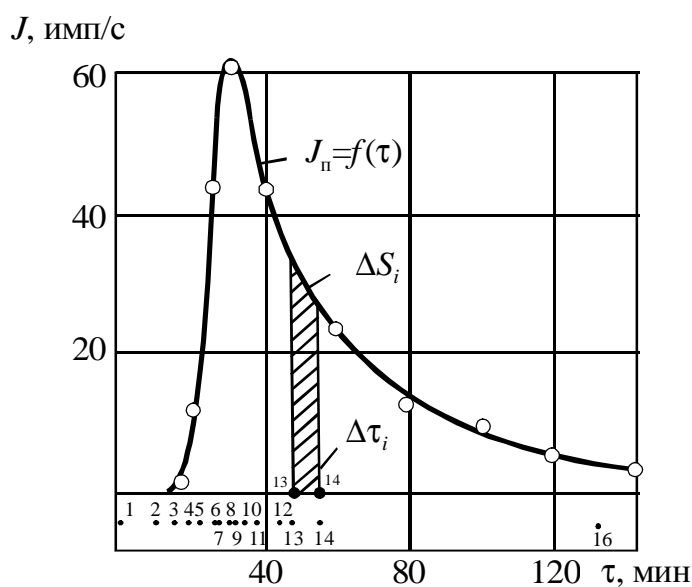


Рис. 5.11 Изменение интенсивности g -излучения, измеренной на пылепроводе за фулер-насосом, $J_n = f(t)$: 1–16 – время прохождения пиков активности меченой порции шлама, зарегистрированных индикаторами 1–16

В отличие от методики [119, 145], где интенсивность пыления находили путем сопоставления измерявшейся через определенные промежутки времени активности отобранной пыли с местонахождением в это время наибольшей части меченого материала, интенсивность γ -излучения пыли измерялась индикатором 19 (см. рис. 5.1), установленным на пылепроводе после фулер-насоса. Учитывая, что в фулер-насос подается пыль, уловленная электрофильтрами и осажденная в пылеосадительной камере, можно судить о количестве пылевыноса из печи в полной мере, так как в дымовую трубу после электрофильтров попадает незначительное количество пыли. Местонахождение материала определялось по максимуму γ -излучения меченой порции шлама индикаторами 1–16, установленными по всей длине печи. Причем в зависимости от характера проводимого опыта место установки индикаторов менялось. Исследовались наиболее важные технологические зоны движения материала: зоны теплообменных устройств и зоны спекания. Так, например, из рис. 5.11 видно, что время прохождения материала на участке печи с 6-го по 14-й индикатор составляет около 13 мин, а расстояние равно 54 м, то есть средняя скорость движения составляет более 4 м/мин. Как видно из рис. 5.11, на этом участке наблюдается максимальная интенсивность γ -излучения, измеренная индикатором 19.

Характер измерения интенсивности γ -излучения меченой порции пыли, выносимой из печи, соответствует характеру пылеобразования в печи. Следовательно, каждый участок поставляет свою порцию в общий поток выносимой из печи пыли. Общее количество пыли $G_{\text{по}}$, выбрасываемое с потоком отходящих газов, будет определяться интенсивностью пылеобразования с каждой длины печи dl за время $d\tau$. То есть пылевынос можно характеризовать функцией двух переменных l и τ :

$$G_{\text{п}} = f(\tau, l). \quad (5.22)$$

Зная вид функции (5.22), можно определить общий пылеунос $G_{\text{по}}$ интегральной суммой двух переменных:

$$G_{\text{по}} = \int_0^l \int_0^{\tau} f(\tau, l) dl d\tau. \quad (5.23)$$

Совершенно очевидно, что функция (5.22) является, в свою очередь, функцией многих переменных параметров технологического режима и обжигаемого сырья. Отыскание аналитического вида этой зависимости для промышленных агрегатов с учетом физико-химического состава сырья и изменения режима обжига в силу недостаточной изученности этого многопараметрического процесса со сложным поведением пока невозможно. Однако, используя радиоактивные индикаторы, можно получить эмпирическую информацию о поведении обжигаемого материала в промышленной печи.

Так, при движении меченой порции шлама в каждый момент времени с единицы длины печи газовым потоком будет уноситься определенное количество материала, которое характеризуется вполне определенным распределением интенсивности γ -излучения. Следовательно, кривая распределения интенсивности γ -излучения $J_{\text{п}}$ по времени

$$J_{\text{п}} = f(\tau) \quad (5.24)$$

является мерой интенсивности пылеобразования по длине печи. Общую интенсивность γ -излучения за период движения в печи меченой порции можно выразить интегралом

$$J_{\text{по}} = \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau. \quad (5.25)$$

Учитывая, что в работе получены экспериментальные данные в графической форме (см. рис. 5.11), вычисление интеграла (5.25) будем выполнять методом линейно-кусочной аппроксимации интенсивности распределения $f(\tau)$, тогда

$$J_{\text{по}} = \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n \bar{f}(\tau_i) \Delta \tau_i, \quad (5.26)$$

где ΔS_i – площадь i -го участка, расположенного между индикаторами γ -излучения, ограниченная кривой распределения; $\bar{f}(\tau_i)$ – среднее значение функции распределения интенсивности γ -излучения на i участке:

$$\bar{f}(\tau_i) = \frac{1}{2} [f(\tau_{i+1}) + f(\tau_i)]. \quad (5.27)$$

Вычислив таким образом площадь кривой, можно получить относительную меру пылеуноса из печи.

Далее, замерив фактическое количество пыли, осевшей в пылеосадительной камере и уловленной электрофильтрами, приняв это значение за общий пылеунос, можно подсчитать интенсивность пылеобразования, приравняв площадь под кривой $J_{\text{п}}$ замеренному дискретному значению пылеуноса:

$$J_{\text{по}} = G_{\text{пэ}}, \quad (5.28)$$

где $G_{\text{пэ}}$ – экспериментальное значение пылеуноса, замеренное в единицу времени, или

$$\begin{aligned} G_{\text{пэ}} &= \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau \approx \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \sum_{i=1}^n \bar{f}(\tau_i) \Delta \tau_i = \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} [f(\tau_{i+1}) + f(\tau_i)] \Delta \tau_i. \end{aligned} \quad (5.29)$$

Чтобы определить интенсивность пылеобразования, необходимо учесть, на каком отрезке длины и в какой промежуток времени образовалось данное количество пыли. Зная скорость движения материала из эксперимента, вычисляем общую интенсивность пылеобразования по длине печи. При этом необходимо определить время пребывания меченой порции шлама в печи:

$$\chi_{\text{п}} = \frac{G_{\text{п}}}{\tau l}, \quad (5.30)$$

где τ – общее время пребывания материала в печи; l – длина печи.

Для определения интенсивности пылеобразования в любой момент времени и в любой точке печи необходимо продифференцировать выражение (5.30):

$$d\chi_{\text{п}} = \frac{d G_{\text{п}}(\tau, l)}{d\tau dl} \quad (5.31)$$

Из графика на рис. 5.11, используя линейно-кусочную аппроксимацию, согласно уравнениям (5.26), (5.27), можем определить интенсивность пылеобразования i -го участка, расположенного между индикаторами γ -излучения:

$$d\chi_{\text{п}i} = \frac{\bar{f}(\tau_i) \Delta\tau_i}{\Delta\tau \Delta l} = \frac{\Delta S_i}{\Delta\tau \Delta l} = \frac{G_{\text{п}}}{\Delta\tau \Delta l}, \quad (5.32)$$

где $d\chi_{\text{п}i}$ – интенсивность пылеобразования i -го участка печи.

В соответствии с описанной выше методикой проведены исследования характера и интенсивности пылеобразования в технологических зонах вращающихся печей Топкинского цементного завода. Данные замеров пылеуноса, которые определялись непосредственным взвешиванием пыли, уловленной электрофильтрами, представлены табл. 5.10.

Результаты измерений пылеуноса из исследуемых печей

Номер печи	Номер эксперимента	Пылеунос, т/ч
1	3	22
	5	22
	6	22
	8	22
2	11	21
	13	21
4	1	48
	15	55
	17	55

Сведения об интенсивности пылеобразования по длине печи [146] получены в результате обработки экспериментальных кривых интенсивности γ -излучения меченой порции, уловленной электрофильтрами и осевшей в пылеосадительной камере и зарегистрированной сцинтилляционным индикатором, установленным на пылепроводе после фулер-насоса (см. рис. 5.1).

Анализ полученных данных показывает, что интенсивность пылеобразования имеет различные значения не только по длине одной печи, но и колеблется в широком диапазоне по разным печам. Например, общая интенсивность по печам изменяется от 1,42 до 14,12 кг/м·мин, то есть в 10 раз. Колебания интенсивности пылеобразования по технологическим зонам отличаются в значениях еще больше (для зоны цепей от 0,16 до 3,57 кг/м·мин, то есть более чем в 20 раз). Даже для одной и той же печи при одинаковой скорости вращения, имеющей одни и те же конструктивные характеристики печи, теплообменных устройств и холодильника, интенсивность пылеобразования изменяется более чем в 5 раз (для зоны цепей – от 0,16 до 0,92 кг/м·мин, для зоны декарбонизации – от 0,24 до 1,32 кг/м·мин).

В табл. 5.11 и на рис. 5.12 приведены данные количественной оценки пылеобразования по мере движения меченой порции шлама.

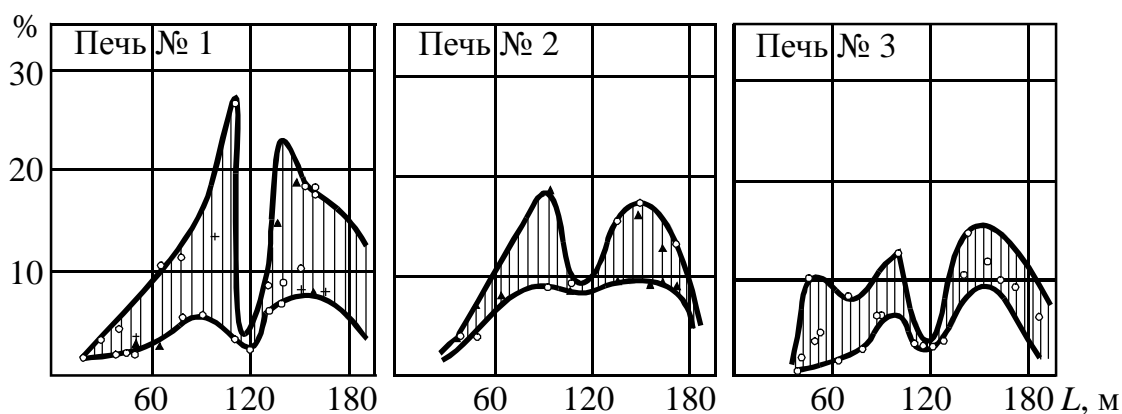


Рис. 5.12. Пылеобразование по длине печи

Таблица 5.11

Интенсивность пылеобразования в различных зонах печей № 1, 2, 4

Номер печи	Номер опыта	Интенсивность пылеобразования, кг/м·мин				По печи
		Зона цепей	Зона подогрева	Зона декарбонизации	Зона спекания	
1	1	0,92	0,33	1,32	0,36	2,92
	2	0,65	0,82	1,75	0,68	3,92
	3	0,16	0,28	0,24	0,74	1,42
	4	0,18	0,41	0,66	0,73	1,98
2	5	0,23	0,35	0,50	1,29	2,37
	6	0,35	0,50	0,55	1,10	2,51
4	7	3,57	7,05	3,88	0,32	14,12
	8	1,94	1,77	2,35	4,39	10,45
	9	2,32	2,29	3,19	5,87	13,700

Из рис. 5.12 видно, что процент пылевыноса из печи постепенно возрастает по мере выхода материала из зоны теплообменных устройств и достигает своего максимального значения примерно на сотом метре, хотя в печи № 2 этот пик несколько сдвинут в сторону холодного конца. Затем наступает резкий спад пылеобразования. Минимум приходится на 120-й м, а в печи № 2 – на 110-й м зоны декарбонизации. Далее, при движении материала к зоне спекания, пылевынос возрастает и вновь достигает максимального значения на выходе из зоны спекания.

На рис. 5.13 показаны графики интенсивности пылеобразования по длине печи. Характер кривых также показывает на неравномерность интенсивности пылеобразования по длине печи. Так,

по всем трем печам наблюдается характерный всплеск интенсивности пылеобразования на выходе из зоны цепей, далее происходит постепенный спад, минимум которого приходится на зону декарбонизации. Характер кривых по всем трем печам неодинаков. Например, при движении меченой порции шлама в печи № 2 наблюдается три характерных всплеска интенсивности пылеобразования и два спада, первый из которых приходится на 97-й, а второй – на 143-й м. В печи № 4, работающей на повышенных оборотах 1,42 об/мин, особенно ярко выражена неравномерность интенсивности пылеобразования. Наибольшая интенсивность пылеобразования наблюдается на выходе из зоны теплообменных устройств, а минимум – на 130–140-й м печи, то есть в конце зоны декарбонизации.

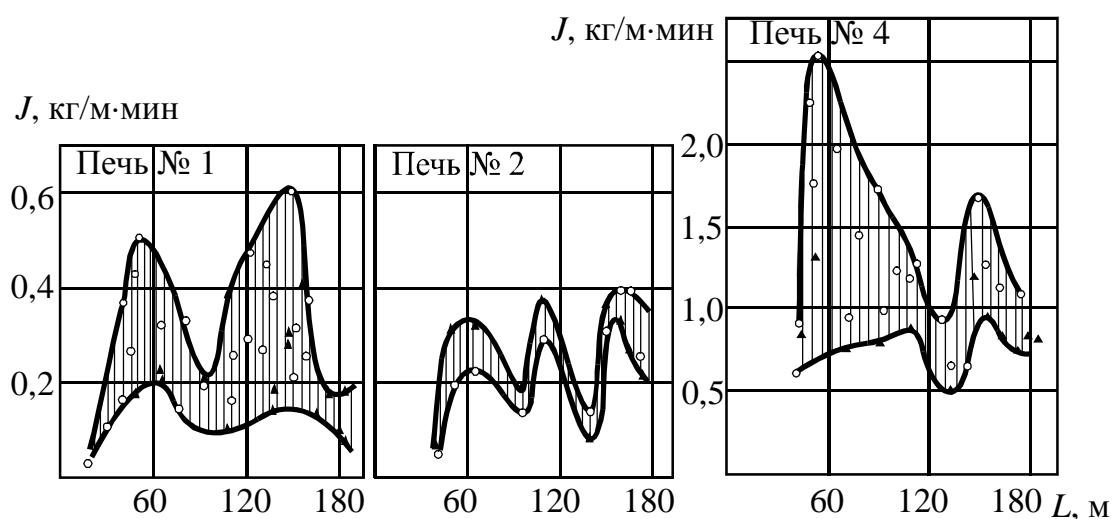


Рис. 5.13. Интенсивность пылеобразования по длине печей № 1, 2, 4

Если учесть, что исследования проводились в течение трех недель, то есть в сравнительно короткий промежуток времени и, следовательно, параметры технологического оборудования за период постановки эксперимента практически оставались постоянными, то изменение характера интенсивности пылеобразования и смещение технологических зон можно объяснить только влиянием режима обжига. Отсюда очевидна необходимость исследований, касающихся оценки качественной и количественной зависимости влияния параметров обжига на процессы, протекающие в печи.

5.6. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБЖИГА НА ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЕ В ПЕЧИ

Для определения степени влияния различных параметров в технологии обжига на процессы пылеобразования выполнен многомерный корреляционный анализ. Результаты расчета коэффициентов корреляции между значениями технологических параметров приведены в табл. 5.12.

Таблица 5.12

**Влияние скорости движения материала
на интенсивность пылеобразования**

Параметры движения материала	Коэффициенты корреляции интенсивности пылеобразования, кг/м·мин				
	$\chi_{з.ц}$	$c_{з.п}$	$\chi_{з.д}$	$\chi_{з.с}$	$\chi_{п}$
τ_0	-0,587	-0,369	-0,590	-0,916	-0,761
$V_{з.ц}$	0,678	0,369	0,734	0,909	0,814
$V_{з.д}$	0,908	0,727	0,911	0,716	0,918
$V_{з.с}$	0,463	0,102	0,516	0,866	0,589
V_{max}	0,838	0,972	0,71	-0,131	0,717

На рис. 5.14 показано влияние теплового режима на интенсивность пылеобразования в печи. Анализируя влияние режима обжига на интенсивность пылеобразования, можно заметить, что значение его велико для всех технологических зон печи. Однако более всего режимные параметры оказывают влияние на процессы, протекающие в зоне цепей и зоне декарбонизации.

Из общего числа параметров влияние теплового режима наиболее существенно. Например, коэффициенты корреляции для зоны цепей

$$r_{\chi_{з.ц}, T_{о.г}} = 0,978, \quad r_{\chi_{з.ц}, Q_T} = 0,797,$$

а для зоны декарбонизации они еще больше и составляют

$$r_{\chi_{з.д}, T_{о.г}} = 0,981, \quad r_{\chi_{з.д}, Q_T} = 0,83.$$

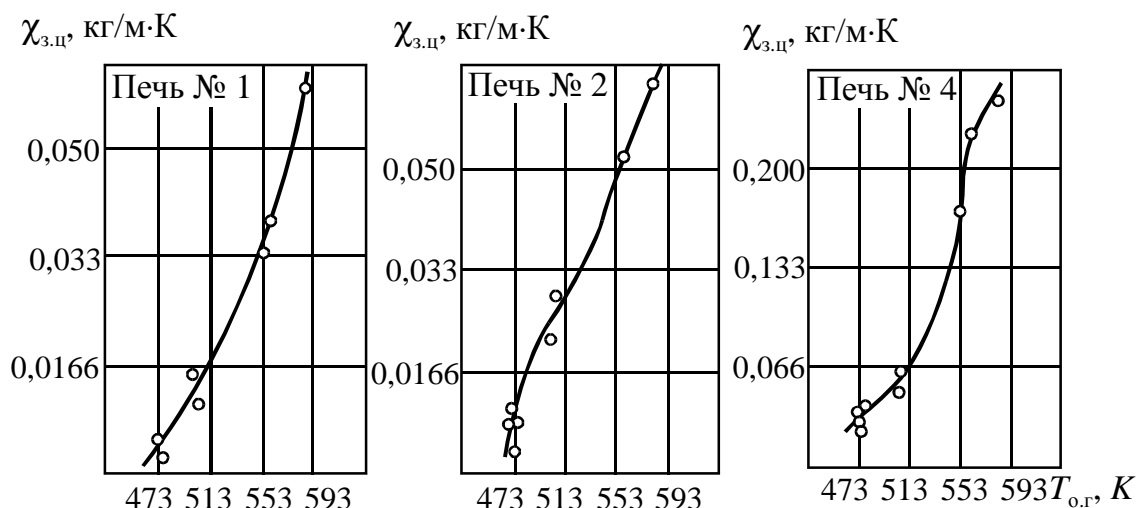


Рис. 5.14. Влияние теплового режима обжига на интенсивность пылеобразования в печи

Это показывает, что большие потери тепла с отходящими газами и перерасход топлива вызывают пересушку материала в зоне цепей и образование в зоне подогрева и декарбонизации большого количества пылевидного материала, а следовательно, и более интенсивного пылевыноса из печи.

Аналогичная картина наблюдается и при анализе общей интенсивности пылеобразования. Здесь также основную роль играет тепловой режим, так как коэффициенты корреляции

$$r_{\chi_{п}, T_{ог}} = 0,974; \quad r_{\chi_{п}, Q_{т}} = 0,673.$$

Из рис. 5.14 видно, что уже при температуре отходящих газов $280^{\circ}C$ интенсивность пылеобразования – более $10 \text{ кг/м} \cdot \text{мин}$, а в интервале температур $280 \dots 310^{\circ}C$ приращение на каждый градус составляет около $0,17 \text{ кг/м} \cdot \text{мин}$, что практически равно интенсивности пылеобразования всей зоны цепей в шестом ($\chi_{з.д 6} = 0,16$) и в восьмом ($\chi_{з.д 8} = 0,18$) экспериментах (см. табл. 5.11).

Кроме того, большое влияние на процесс пылеобразования отдельно в технологических зонах и по всей длине печи оказывает поверхность цепей, так как

$$r_{\chi_{п}, S_{п}} = -0,892,$$

причем с ее увеличением пылевынос снижается. Это отчасти согласуется с тем, что поверхность теплообменных устройств является экраном-пылеосадителем газового потока.

Значительной оказалась взаимосвязь между температурой клинкера на выходе из печи и пылеобразованием в различных технологических зонах. В практике обжига замечено, что с увеличением температуры клинкера на обреze печи уменьшается пылевынос. Увеличение температуры на обреze печи связано с хорошей грануляцией клинкера и оптимальными процессами, протекающими в данный момент в зоне спекания. Следовательно, пылеобразование печи зависит не только от основных технологических параметров, существенное влияние на него оказывает также положение факела и расположение технологических зон.

Проведенный выше анализ показывает, что технологические параметры процесса обжига в большой мере воздействуют на характер движения материала в печи. При этом факторы, увеличивающие расход тепла на обжиг клинкера, значительно интенсифицируют перемещение материала, особенно в зоне подогрева и декарбонизации.

Исходя из этого, правомерна взаимосвязь между интенсивностью пылеобразования и параметрами движения материала в печи. В табл. 5.13 приведены значения коэффициентов корреляции между этими переменными, а на рис. 5.15 показано влияние скорости движения и времени пребывания материала на интенсивность пылеобразования в печи.

Так, для скорости движения материала высокими оказались коэффициенты для зоны декарбонизации

$$r_{\chi_{з.п}, v_{з.д}} = 0,911$$

и для зоны подогрева

$$r_{\chi_{з.п}, v_{\max}} = 0,972.$$

Как видно, уменьшение времени пребывания в печи материала существенно отражается на интенсивности пыления.

Влияние процесса обжига на интенсивность пылеобразования в различных зонах (коэффициенты корреляции между параметрами)

Параметр	Интенсивность пылеобразования, кг/м·мин,				
	В зонах				Общая по печи, χ_p
	цепей, $\chi_{з.ц}$	подогрева, $\chi_{з.п}$	декарбонизации, $\chi_{э.д}$	спекания, $\chi_{з.с}$	
Температура отходящих газов, $T_{о.г}$	0,978	0,836	0,981	0,491	0,974
Температура зоны кальцинирования, $T_{з.к}$	0,620	0,438	0,701	0,630	0,719
Скорость вращения печи, n	0,565	0,245	0,602	0,949	0,721
Влажность шлама, $w_{шл}$	0,142	0,293	-0,012	-0,585	-0,069
Производительность печи, $O_{вх}$	0,220	0,344	0,207	0,165	0,300
Поверхность цепей, $S_{ц}$	-0,862	-0,684	-0,873	-0,577	-0,892
Температура клинкера на выходе из печи, $T_{кл}$	-0,563	-0,474	-0,604	-0,002	-0,464
Температура вторичного воздуха, $T_{в.в}$	-0,144	-0,044	-0,320	-0,093	-0,163
Расход топлива Q_T	0,797	0,769	0,830	-0,041	0,673

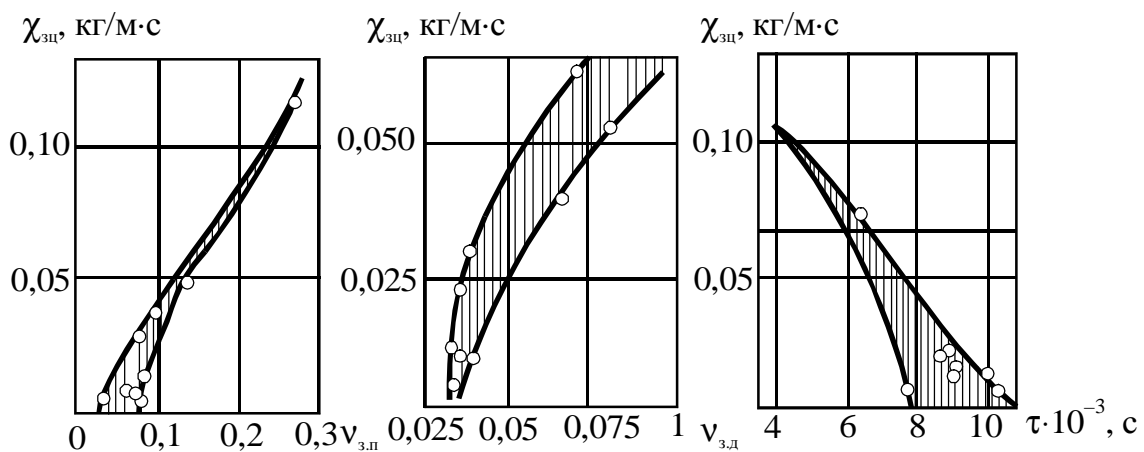


Рис. 5.15. Влияние скорости движения материала и времени пребывания на интенсивность пылеобразования в печи

Чем меньше время пребывания в печи (см. рис. 5.15), тем выше интенсивность пыления:

$$r_{\chi_{3.с}, \tau} = 0,916.$$

Следовательно, и характер движения материала в значительной мере сказывается на пылеобразовании в печи.

На рис. 5.16 показана гистограмма ранжирования коэффициентов корреляции, характеризующая совместное влияние режима обжига на процессы пылеобразования по всей длине печи и в отдельных технологических зонах. Наибольшее воздействие на образование пыли оказывают тепловой (Q_T , $T_{о.г}$, $T_{з.к}$, $T_{кл}$) режим, параметры цепной завесы ($S_{ц}$, $L_{ц}$) и скорость вращения печи n .

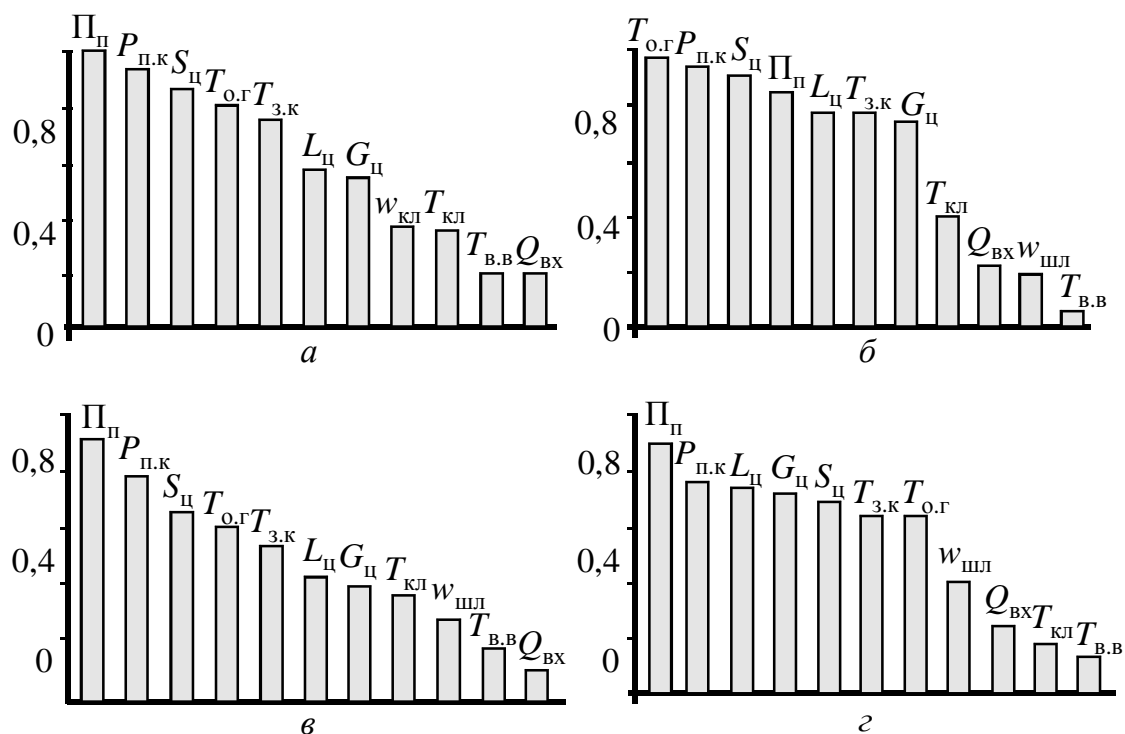


Рис. 5.16. Ранжирование коэффициентов корреляции, определяющих влияние технологических параметров на интенсивность пылеобразования:
a – зона цепей; *б* – зона подогрева; *в* – зона декарбонизации; *г* – зона спекания

Это подтверждают и уравнения, которые получены в результате регрессионного анализа:

$$\begin{aligned} \chi_{3.ц} = & 103,7 - 0,083T_{o.г} - 0,0019T_{3.к} + \\ & + 0,00848P_{п.к} - 1,06L_{ц} - 0,0233S_{ц} + 0,058Q_{т}; \end{aligned} \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} \chi_{3.п} = & 173,3 - 0,673T_{o.г} + 0,0286T_{3.к} + \\ & + 0,0813P_{п.к} - 0,108S_{ц} + 0,0259T_{в.в} + 0,659\tau + 31,93v_{3.д}; \end{aligned} \quad (5.34)$$

$$\begin{aligned} \chi_{3.с} = & -49,77 + 0,105T_{o.г} - 0,0685P_{п.к} + \\ & + 0,0321S_{ц} - 0,0278T_{в.в} - 0,0954Q_{т}; \end{aligned} \quad (5.35)$$

$$\begin{aligned} \chi_{п} = & -18,84 + 0,124T_{o.г} + \\ & + 0,0576P_{п.к} + 11,6n + 0,167Q_{вх} - 0,794L_{ц}. \end{aligned} \quad (5.36)$$

В эти уравнения вошли основные технологические параметры процесса обжига. А такие параметры, как температура отходящих газов $T_{o.г}$, разрежение в пылесадительной камере $P_{п.к}$ и характеристика цепной завесы $S_{ц}$ и $L_{ц}$ вошли в каждое из уравнений. В целом уравнения (5.33)–(5.36) хорошо описывают экспериментальные данные (табл. 5.14), а коэффициенты при переменных статистически значимы.

Подводя общий итог, можно сделать основной вывод о том, что технологические параметры режима обжига и связанная с ним скорость движения материала в значительной мере влияют на пылеобразование как в отдельных технологических зонах, так и по всей длине печи. Причем наиболее сильное воздействие на пылевынос оказывают факторы, увеличивающие расход тепла и, следовательно, скорость газового потока в печи.

**Расчет интенсивности пылеобразования
по уравнениям (5.33) – (5.36), кг/м·мин**

В цепной зоне		В зоне подготовки		В зоне спекания		Общая по всей печи	
Расчетная	Экспериментальная	Расчетная	Экспериментальная	Расчетная	Экспериментальная	Расчетная	Экспериментальная
0,92	0,92	0,34	0,33	0,24	0,36	2,89	2,92
0,64	0,65	0,23	0,82	0,86	0,68	3,86	3,92
0,19	0,16	0,19	0,28	0,76	0,74	1,55	1,42
0,15	0,18	0,49	0,41	0,69	0,73	1,95	1,98
0,23	0,23	0,33	0,35	1,48	1,29	2,23	2,37
0,35	0,35	0,52	0,50	0,89	1,10	2,62	2,51
3,56	3,57	7,04	7,05	0,32	0,32	14,85	14,82
1,93	1,94	1,74	1,77	4,49	4,39	10,50	10,45
2,34	2,32	2,31	2,29	5,75	5,87	13,64	13,70

Кроме того, из приведенных исследований видно, что процесс пылеобразования в промышленных печах не может характеризоваться однозначно только скоростью газового потока или влажностью материала, а является функцией многих параметров процесса обжига. Обнаруженные нами взаимосвязи параметров хорошо согласуются с физической картиной процессов, протекающих во вращающейся печи.

Результаты корреляционного и регрессионного анализа позволяют дать количественную оценку влияния отдельных параметров, их совокупного воздействия на процесс пылеобразования и могут быть использованы для целей управления и оптимизации процесса обжига клинкера.

Часть II

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ
МАТЕРИАЛОВ ЦЕМЕНТНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ**



6. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

6.1. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Одной из наиболее весомых статей затрат в себестоимости цемента является расход тепла на обжиг клинкера. При снижении удельного расхода топлива дополнительно улучшаются и другие показатели: производительность печи и стойкость футеровки, пылеунос и степень загрязнения окружающей среды. Для определения рациональных способов экономии топлива необходимо осуществить теплотехнические исследования с выявлением закономерностей влияния отдельных факторов на удельный расход тепла на получение клинкера.

Расход топлива зависит от эффективности процессов, происходящих при получении клинкера. Определяющим процессом при термообработке цементных сырьевых смесей, обжига и охлаждения клинкера является процесс передачи тепла между материалом и теплоносителем, складывающийся из двух стадий:

- теплоотдача между поверхностью материала и теплоносителем (которым обычно является газовая среда);
- теплопередача внутри материала.

Обычно для цементных печей и аппаратов точно рассчитывается первая стадия теплообмена, вторая не учитывается или рассчитывается с использованием приближенных констант. Но в ряде устройств (цепные завесы, теплообменные устройства циклонного типа, реакторы кипящего и взвешенного слоя, колосниковые и планетарные холодильники) вторая стадия превалирует и оказывает решающее влияние на ход суммарного теплообмена.

Согласно работе [147] (рис. 6.1), разница в коэффициенте теплопроводности на $0,325 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ приводит к изменению температуры газового и материального потока в печи сухого способа на величину до $200 \text{ }^\circ\text{C}$, причем различие наиболее сильно в зонах декарбонизации и подогрева.

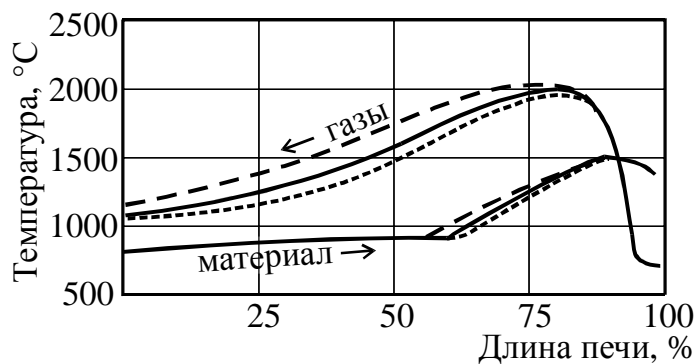


Рис. 6.1. Влияние коэффициента теплопроводности материала на температуру газа и материала во вращающейся печи:

— — — — $\lambda = 0,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
 ————— $\lambda = 0,25 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$;
 ······ $\lambda = 0,125 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$

Эффективность работы клинкерного холодильника зависит от условий теплообмена между потоком воздухом и слоем клинкерных гранул. Из результатов моделирования, методика которого описана в работах [148, 149], видно, что при изменении теплопроводности клинкера с 0,8 до 1,28 Вт/м·К тепловой КПД холодильника изменяется на 2% (рис. 6.2), что соответствует изменению количества тепла, передаваемого в печь с горячим вторичным воздухом, на величину 1 кг/т кл. Необходимо отметить, что теплопроводность оказывает наиболее сильное влияние на теплообмен в горячей части печи. Оптимизация теплообмена в ней, согласно расчетам Эйгена [98], приводит к снижению расхода топлива, в несколько раз превышающую величину сэкономленного тепла.

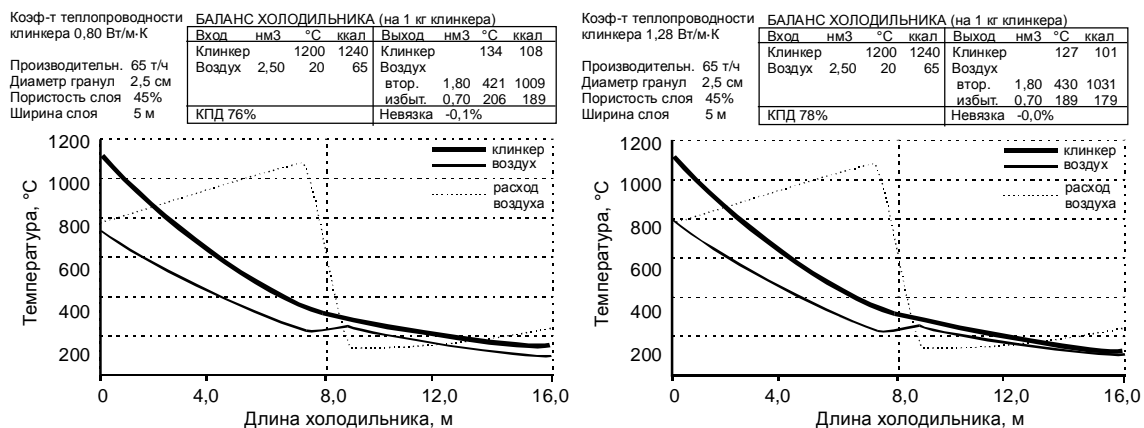


Рис. 6.2. Моделирование теплообмена в колосниковом холодильнике

На основании приведенных данных можно заключить, что теплопроводность обрабатываемого материала оказывает значительное влияние на процессы теплообмена при получении клин-

кера. Уточнение коэффициентов теплопроводности материалов цементной технологии позволит более точно производить теплотехнические расчеты и определять оптимальные технологические параметры работающих и проектируемых теплотехнических агрегатов цементной технологии.

6.2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ЦЕМЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Значения коэффициентов теплопроводности материалов цементной технологии практически отсутствуют, имеются лишь разрозненные данные для отдельных материалов (klinkера и об-мазки) и материалов, изготовленных на основе цемента [150, 151]. Коэффициенты теплопроводности сырьевой смеси и обра-батываемого материала не определялись, за исключением работы [152], согласно которой теплопроводность смеси, прошедшей термообработку до 900°С, в 4–5 раз выше теплопроводности ис-ходной смеси, причем характер изменения этой величины явно нелинейный. Известна теплопроводность компонентов сырьевой смеси (табл. 6.1), причем, как показано далее, при изменении температуры от 0 до 1000°С теплопроводность сырья может ме-няться в 2–3 раза. В связи с измельчением и усреднением, струк-тура смеси отличается от исходных природных материалов, а те-плопроводность смеси веществ не является аддитивным свойст-вом [153]. Поэтому на основании известных коэффициентов теп-лопроводности исходных сырьевых компонентов коэффициент теплопроводности их смеси на разных стадиях термообработки определить невозможно.

Таблица 6.1

Коэффициенты теплопроводности материалов [154, 155]

Материал	λ , Вт/м·К	Материал	λ , Вт/м·К
Бетон сухой	0,8...1,2	Мел	0,93
Железобетон	1,5	Известняк	0,45...0,90
Гипс обожженный	0,28	Песок сухой	0,326
Гипс	0,4	Глиногипс	0,25...0,80
Глина	0,6...0,9	Шлак	0,28...0,50

В работе [150] коэффициент теплопроводности клинкера принят 1,28 Вт/м·К. В работе М. А. Соколинской [151] установлено, что коэффициент теплопроводности клинкерной обмазки, образующейся в цементных вращающихся печах, изменяется в пределах от 0,4 до 1,4 Вт/м·К. Этим же автором получена зависимость коэффициента теплопроводности обмазки от ее кажущейся плотности $\rho_{\text{каж}}$, кг/м³:

$$\lambda = 8,1 \cdot 10^{-6} \rho_{\text{каж}}^{1,5} \quad (6.1)$$

Можно предположить, что выражение (6.1) учитывает пористость обмазки, а не ее состав, так как кажущаяся плотность является функцией от пористости.

Из изложенного выше можно сделать заключение, что коэффициент теплопроводности материалов цементной технологии изменяется в широких пределах и зависит от их состава, температуры и пористости. Поэтому необходимо определение коэффициентов теплопроводности этих материалов, уточнение и систематизация имеющихся данных.

6.3. КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТЕКЛА И ОГНЕУПОРОВ

Технология производства цемента, стекла и огнеупоров имеет общую основу, изучает похожие химические и физические процессы, которые происходят при превращении сырьевых компонентов в готовый продукт. В связи с этим можно предположить, что зависимости теплопроводности этих материалов от химического состава и температуры имеют однотипный характер. Следовательно, полученные для стекла и огнеупоров зависимости могут служить основой в получении подобных зависимостей для материалов цементной технологии.

Теплопроводность различных стекол согласно работам [154, 156] изменяется от 0,7 до 0,9 Вт/м·К. В табл. 6.2 представлены коэффициенты теплопроводности клинкера различного состава, рассчитанному по методу, применяемому для стекол. Из таб. 6.2 видно, что различие теплопроводности составляет до 40%.

Таблица 6.2

**Коэффициент теплопроводности клинкера,
рассчитанный по методу Русса, применяемому для стекол**

Состав, мас. %				Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	
67	24	4	5	1,13
67	24	7	2	2,36
67	24	6,5	2,5	1,96
67	21	7	5	1,12
64	24	7	5	1,13

Линейные выражения, описывающие зависимость коэффициентов теплопроводности огнеупоров от температуры приведены в табл. 6.3. Экспериментально полученные зависимости теплопроводности от температуры для ряда огнеупоров, кальцита и оксидов приведены на рис. 6.3 и 6.4.

В табл. 6.4 показан коэффициент вариации теплопроводности материалов при их нагреве, рассчитанный на основании приведенных данных. Из табл. 6.4 видно, что теплопроводность в интервале температур 100...1000°C может изменяться на величину от 11 до 135%.

Таблица 6.3

Характеристики стекла и огнеупорных материалов [157]

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Плотность ρ , кг/м ³	Температура применения $T_{\text{прим}}$, °C	Значение λ при $T_{\text{прим}}$, Вт/(м·К)
Динас	$0,815 + 0,00067 \cdot t$	1900...2000	1620	1,90
Шамот	$0,7 + 0,00064 \cdot t$	1800...2000	1300	1,53
Магнезит	$6,28 - 0,0027 \cdot t$	2600...2800	1580	2,01
Хромомagneзит	$2,8 - 0,00087 \cdot t$	2700...2850	1520	1,48
Магнезитохромит	$4,1 - 0,0016 \cdot t$	2800...2900	1500	1,70
Стекло	$0,64 + 0,001 \cdot t$	2500	—	—
Стекло молибденовое	$0,70 - 0,001 \cdot t$	—	—	—

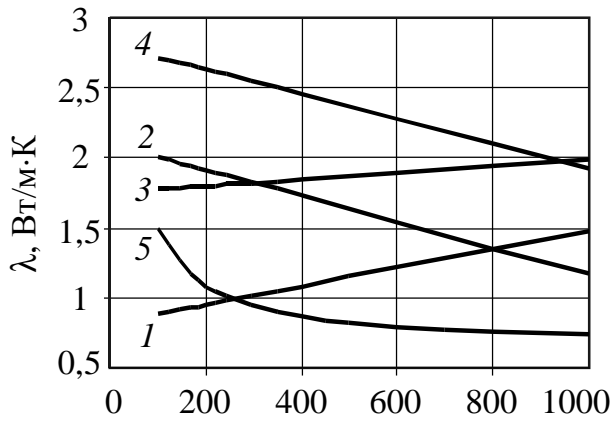


Рис. 6.3. Зависимость теплопроводности от температуры для огнеупоров и кальцита [158]:
 1 – динас; 2 – циркон;
 3 – кирпич ВГО–62;
 4 – хромомагnezит; 5 – CaCO₃

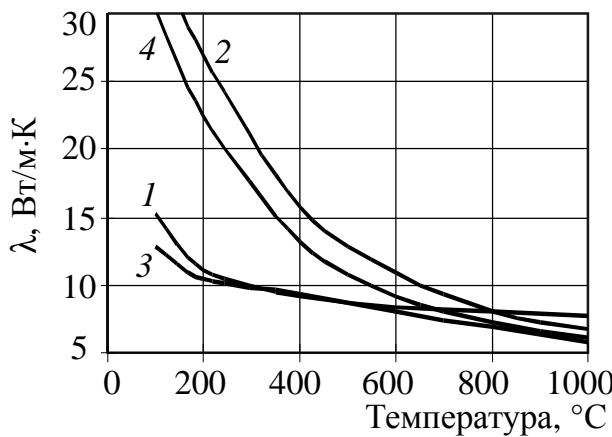


Рис. 6.4. Зависимость теплопроводности от температуры для оксидов с нулевой пористостью [158]:
 1 – CaO; 2 – MgO;
 3 – SiO₂ (кварц); 4 – Al₂O₃

Таблица 6.4

Изменение коэффициента теплопроводности при нагреве от 100 до 1000°С

Материал	Вариация, %	Материал	Вариация, %
Динас	51	Оксид магния	135
Кирпич ВГО-72	11	Кварц	75
Хромомагnezит	34	Оксид алюминия	132
Кальцит	67	Стекло	75
Оксид кальция	65	Стекло молибденовое	72

При росте пористости теплопроводность уменьшается, что связано с появлением дополнительного термического сопротивления в материале. Для силикатных материалов эта зависимость близка к линейной (рис. 6.5).

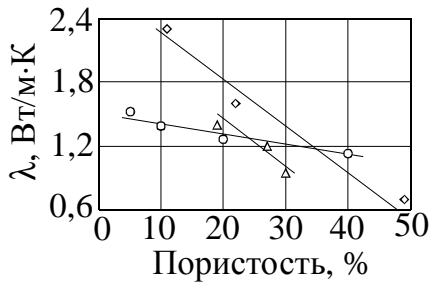


Рис. 6.5. Зависимость теплопроводности от пористости по данным работы [154]:

◇ – шамот; △ – каолиновый кирпич; ○ – шихта мартеновской печи

Среди экспериментально-статистических моделей расчета коэффициента теплопроводности смеси веществ можно выделить две группы, в которых факторами является содержание компонентов в смеси [156, 159] или коэффициент теплопроводности основного материала и количество примесей [160]. Методики расчета теплофизических свойств стекла, являющегося силикатным материалом и близкого по составу к цементному клинкеру, представлены в табл. 6.5. При расчете теплопроводности в зависимости от состава для стекол используются аддитивные формулы, но с использованием не свойств компонентов, а экспериментально определенных коэффициентов.

Таблица 6.5

Расчетные методы определения теплофизических свойств [156, 161]

Свойство	Автор	Формула	Примечания
1	2	3	4
Теплофизические свойства	Винкельман и Шотт	$k = \sum k_i P_i$	k – свойство; P_i – содержание составляющей (весовое, объемное, молярное); k_i – коэффициент (не равный свойству составляющей в свободном состоянии)
То же	Аппен	$k = \frac{\sum k'_i \mu_i}{\sum \mu_i}$	μ_i – молярное содержание составляющей; k'_i – усредненные коэффициенты, близкие к свойствам составляющей в свободном состоянии
» »	Л. И. Демкина	$k = \frac{\sum k_i P_i / S_i}{\sum P_i / S_i}$	S_i – коэффициент, обычно соответствующий молекулярному весу составляющей

1	2	3	4
Теплофизические свойства	Хаггинс	$k = \sum k_{0i} R_i m_i$	R_i – отношение числа атомов кислорода в оксиде к его молекулярному весу; m_i – весовая доля оксида; k_{0i} – свойство составляющей в свободном состоянии
То же	Жирар и Дибрюль	$k = \sum (a_i P_i + b_i P_i^2)$	a_i, b_i – коэффициенты
Удельная теплоемкость	Винкельман	$c = \sum c_i m_i$	c – удельная теплоемкость; c_i – удельная теплоемкость составляющей в свободном состоянии;
То же	Шарп и Гинтер	$c = \frac{\sum p_i (a_i t + b_i)}{0,00149 t + 1}$	t – температура; a_i, b_i – коэффициенты
» »	Они же	$c = \frac{at^2 + 2bt + c_0}{(0,00149 t + 1)^2}$	a, b – коэффициенты; c_0 – удельная теплоемкость при нормальных условиях
Коэффициент теплопроводности	Русс	$\frac{1}{\lambda} = \sum \frac{v_i}{k_i}$	λ – коэффициент теплопроводности; v_i – объемное содержание составляющей
То же	Шарп	$\lambda = \frac{\sum S_i P_i}{\sum R_i P_i}$	S_i, R_i – коэффициенты

Из рассмотренного выше можно сделать вывод, что теплопроводность силикатных материалов в значительной степени зависит от их состава, температуры и пористости. Для материалов цементной технологии аналогичные зависимости в настоящее время не определены, а для цементного клинкера в качестве коэффициента теплопроводности используется константа 1,28 Вт/м·К. Расчет теплофизических свойств строительных материалов основан на экспериментально-статистических методах, устанавливающих зависимость свойств от состава материала и температуры на основании данных экспериментальных исследований. Такой подход может быть применен и при исследовании теплопроводности материалов цементной технологии.

6.4. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Методы определения коэффициента теплопроводности веществ делятся на две группы – стационарные и нестационарные [157]. Стационарные методы основаны на исследовании неизменных во времени температурных полей. В настоящее время эти методы разработаны наиболее полно. Самыми распространенными среди них являются методы плоского и цилиндрического слоев, где через материал создается тепловой поток и по его величине, разности температур в двух точках и расстоянию между этими точками определяется коэффициент теплопроводности.

Метод плоского слоя используется для определения теплопроводности веществ в любом фазовом состоянии. Погрешность результатов могут вызвать места заделки спаев термопар и термические сопротивления в местах контактов поверхностей образца с поверхностями нагревателя и холодильника [157]. Метод цилиндрического слоя в настоящее время применяется для исследования теплопроводности теплоизоляционных материалов, имеющих вид твердых колец. Длина установок больше их диаметра примерно в 30 раз. Преимущество этого метода заключается в более высокой равномерности теплового потока, крайне малой доле тепла, идущего вне материала, что позволяет не использовать охранные нагреватели. Оба метода позволяют исследовать материал при температурах не выше 300°C.

Нестационарные методы [162, 163] основаны на исследовании температурных полей, меняющихся во времени. Они более сложны в реализации, основная трудность связана с приближением численного решения дифференциального уравнения нестационарного теплообмена к реальным условиям эксперимента. Однако нестационарные методы позволяют не только измерять теплопроводность вещества, но и получать информацию о его температуропроводности и теплоемкости. Кроме того, они позволяют получить значение коэффициента теплопроводности при значительно более высоких температурах, чем стационарные.

В основе нестационарных методов лежит решение обратной задачи теплопроводности, что производится с использованием теоремы Дюамеля, методов конечных разностей, конечных эле-

ментов и контрольных объемов [162]. При использовании теоремы Дюамеля, определяющей аналитическое решение уравнения, алгоритмы решения применимы только к линейным обратным задачам теплопроводности, в то время как остальные методы позволяют анализировать и нелинейные задачи [164–167].

По временной области методы классифицируются следующим образом.

1. Метод Штольца [168], в котором в расчетах используются данные, полученные только до текущего момента времени. Это позволяет получить точное соответствие вычисленных и измеренных температур, но метод чувствителен к погрешностям измерений.

2. «Последовательные» алгоритмы – используются данные до текущего момента и дополнительно несколько следующих шагов по времени или вся временная область эксперимента. Это существенно уменьшает чувствительность к погрешностям измерений и уменьшает допустимый шаг по времени.

Для оценки качества методов решения обратных задач теплопроводности в работе [169] предложены критерии, основными из которых являются:

- воспроизводимость температур и тепловых потоков при высокой точности измерений;
- устойчивость при малых шагах по времени, что характеризует точность учета нестационарных граничных условий;
- отсутствие использования в алгоритмах временной точки начала действия теплового потока на поверхности;
- учет зависимости теплофизических свойств от температуры.

Таким образом, изучение теплопроводности гранулированного материала при высоких температурах наиболее перспективно осуществить методом, основанным на решении нестационарной обратной задачи теплопроводности; для заводских сыпучих материалов, которые можно отобрать в произвольных количествах, при температурах до 400°C наиболее применим стационарный метод цилиндрического слоя; для изучения зависимости теплопроводности от состава в связи с ограничениями по количеству материала, получаемому в лабораторных условиях, и необходимостью высокой точности измерений – метод плоского слоя.

7. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

7.1. ПРОЦЕСС ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Коэффициент теплопроводности зависит от температуры, состава и состояния материала. В высокотемпературных печах эти параметры материала значительно изменяются, поэтому при исследовании теплопроводности их необходимо обязательно учитывать. Но на практике в качестве коэффициента теплопроводности цементных сырьевых смесей и клинкера используют усредненные константы [135, 170] или методики расчета теплопроводности силикатных материалов (стекла, теплоизоляции и др.). Поэтому экспериментальное исследование теплопроводности материалов цементной технологии и разработка методов ее расчета в зависимости от состава и температуры представляют собой актуальную задачу.

В связи со сложностью описания процесса переноса в неоднородных средах все имеющиеся в настоящее время модели теплопроводности в твердых телах и их смесях построены на основании экспериментально-статистических зависимостей. В большинстве из них обобщенный коэффициент теплопроводности имеет аддитивный вид. Хотя согласно теоретическим работам теплопроводность смесей аддитивному закону не подчиняется [171–173], в известных методах расчета теплопроводности используется экспериментально-аналитический метод, в котором общий вид уравнения теплопроводности основывается на аддитивном принципе, а коэффициенты уравнения определяются экспериментальным путем. Так как к настоящему времени накоплен обширный материал по теплопроводности отдельных соединений, входящих в цементное сырье и клинкер, представляется целесообразным определять коэффициент теплопроводности многокомпонентных материалов на основании этих данных, не проводя непосредственно экспериментального исследования. Такой подход обладает универсальностью, достигаемой за счет невысокой точности результатов. Но в условиях цементной технологии он вполне оправдан, так как проведение комплексного экспери-

ментального исследования материалов конкретного производства затруднено в связи с многообразием природного и техногенного сырья, видов цемента и условий его получения.

В работе для исследования теплопроводности материалов цементной технологии используется обобщенная модель теплопроводности, предложенная в работах [153, 174], этапы разработки которой представлены на рис. 7.1.

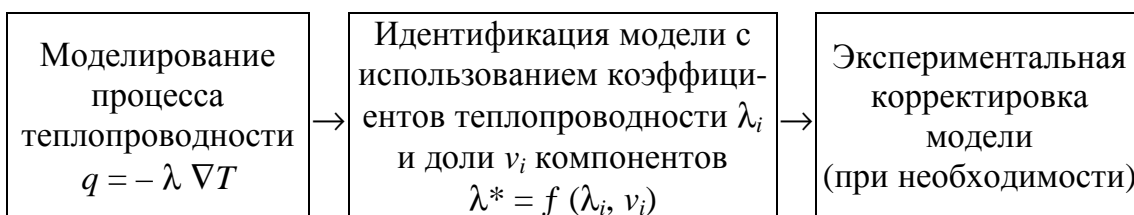


Рис. 7.1. Этапы разработки модели

Предлагаемая модель использует два способа расчета теплопроводности – экспериментально-статистический метод [159, 175] и введение в коэффициент теплопроводности поправок, учитывающих отклонение состава материала от исходных условий [160].

Так как процесс передачи теплоты внутри статических твердых тел происходит на микроуровне и связан с передачей кинетической энергии между молекулами, предполагается, что теплопроводность смеси твердых веществ зависит от теплопроводности компонентов. Предлагается использовать функциональные выражения, включающие коэффициенты теплопроводности компонентов. Функции при этом будут учитывать неравномерность теплового потока вследствие разного термического сопротивления составляющих и изменение их свойств в смеси. Предлагаемый подход позволяет учитывать состав цементных материалов и зависимость теплопроводности от температуры при имеющихся аналогичных зависимостях для компонентов.

Для обоснования предлагаемой модели рассмотрим однородный тепловой поток, идущий через два плоских слоя, характеризующихся коэффициентами теплопроводности λ_1, λ_2 и толщиной l_1 и l_2 (рис. 7.2).

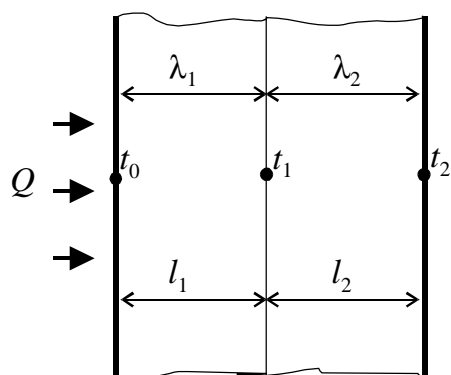


Рис. 7.2. Теплопроводность двухслойного материала

Согласно закону сохранения энергии, плотность тепловых потоков в слоях одинакова:

$$\frac{\lambda_1}{l_1} (t_0 - t_1) = \frac{\lambda_2}{l_2} (t_1 - t_2) = q. \quad (7.1)$$

Усредненный коэффициент теплопередачи λ^* двухслойной стенки имеет вид

$$\lambda^* = \frac{(l_1 + l_2) q}{t_0 - t_2}. \quad (7.2)$$

На основании уравнений (7.1) и (7.2), заменяя толщины на объем, имеем

$$\lambda^* = \left(\frac{v_1}{\lambda_1} + \frac{v_2}{\lambda_2} \right)^{-1}, \quad (7.3)$$

где v – объемная доля слоя в материале.

По аналогии усредненный коэффициент теплопроводности многослойного материала имеет вид

$$\lambda^* = \left(\sum \frac{v_i}{\lambda_i} \right)^{-1}, \quad (7.4)$$

или при использовании массовой доли компонента в смеси m_i и плотности компонентов ρ_i

$$\lambda^* = \left(\rho_0 \sum \frac{m_i}{\rho_i \lambda_i} \right)^{-1}, \quad (7.5)$$

где ρ_0 – теоретическая плотность материала, кг/м³.

Для обоснования возможности применения формулы (7.5) проведено исследование процесса теплопроводности в двухкомпонентном материале на основании численного решения дифференциального уравнения стационарной теплопроводности в двумерных координатах:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0. \quad (7.6)$$

Уравнение дискретизировалось на двумерной сетке, количество узлов по осям x и y составляло N_x и N_y . На левой границе области задавались граничные условия первого рода — температура T_{cp} . На правой границе задавались граничные условия третьего рода, коэффициент теплоотдачи α при этом определялся из критериального уравнения свободной конвекции в гравитационном поле [157]:

$$Nu = 0,8 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \left[1 + \left(\frac{1}{\sqrt{Pr}} \right)^2 \right] \quad (7.7)$$

и включал температуру среды T_{cp} . На верхней и нижней границах области задавалась изотермическая стенка, что выражается в равенстве нулю теплового потока в граничных условиях второго рода.

Для каждого узла сетки выделен прямоугольный элементарный объем и записано уравнение сохранения энергии для тепловых потоков через грани объема с заменой дифференциалов на приращение [176]. Тепловой баланс элементарных объемов для узлов, лежащих на границе области, учитывал передачу тепла че-

рез грани объема, совпадающие с границей, а также изменение размеров граничных элементарных объемов.

В результате получен дискретный аналог:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1(T_{x+1y} - T_{xy}) - k_2(T_{xy} - T_{x-1y}) + \\ + k_3(T_{xy+1} - T_{xy}) - k_4(T_{xy} - T_{xy-1}) \end{array} \middle| x = 2 \dots N_x, y = 1 \dots N_y \right\};$$

$$k'_1 = \frac{\lambda_{x+1y} + \lambda_{xy}}{2\Delta x^2}; k'_2 = \frac{\lambda_{x-1y} + \lambda_{xy}}{2\Delta x^2}; k'_3 = \frac{\lambda_{xy+1} + \lambda_{xy}}{2\Delta y^2}; k'_4 = \frac{\lambda_{xy-1} + \lambda_{xy}}{2\Delta y^2};$$

$$\Delta x = (N_x - 1)^{-1}; \Delta y = (N_y - 1)^{-1};$$

$$\{k_1 = k'_1, k_2 = k'_2, k_3 = k'_3, k_4 = k'_4, d = 0 \mid x = 2 \dots N_x - 1, y = 2 \dots N_y - 1\};$$

$$\{k_1 = \frac{a_y}{\Delta x}, k_2 = k'_2, k_3 = \frac{k'_3}{2}, k_4 = \frac{k'_4}{2}, d = k_1 \cdot T_{cp} \mid x = N_x, y = 1 \dots N_y - 1\};$$

$$\{k_1 = \frac{k'_1}{2}, k_2 = \frac{k'_2}{2}, d = 0 \mid x = 2 \dots N_x - 1, y = 1, N_y\};$$

$$\{k_3 = k'_3, k_4 = 0 \mid x = 2 \dots N_x, y = 1\};$$

$$\{k_3 = 0, k_4 = k'_4 \mid x = 2 \dots N_x, y = N_y\};$$

$$\{T_{xy} = 0; \lambda_{xy} = 0 \mid x = N_{x+1}; y = 1 \dots N_y\};$$

$$\{T_{xy} = 0; \lambda_{xy} = 0 \mid x = 2 \dots N_x; y = 0, N_{y+1}\};$$

$$\{T_{xy} = T_{cp} \mid x = 1; y = 1 \dots N_y\};$$

$$\alpha_{y=0,8} \lambda(T) \left(\frac{g \beta(T) (T_{N_x} - T_{cp})}{v(T) a(T)} \right)^{0,25} \left[1 + \left(1 + \sqrt{\frac{a(T)}{v(T)}} \right)^2 \right]; t = \frac{T_{N_x y} + T_{cp}}{2},$$

где $\beta(T)$, $\nu(T)$, $a(T)$, $\lambda(T)$ – соответственно коэффициент температурного расширения, кинематическая вязкость, коэффициент температуропроводности и коэффициент теплопроводности воздуха при температуре T .

Для решения в каждом уравнении выделена температура T_{xy} как функция от температуры в четырех соседних узлах. Система уравнений решалась методом Гаусса–Зейделя с применением верхней релаксации для ускорения сходимости.

Содержание компонентов задавалось матрицей коэффициентов теплопроводности. Алгоритм и программа предусматривали возможность инициализации этой матрицы для следующих включений второго компонента:

- 1) включения нет;
- 2) равномерные включения в виде горизонтальных полос;
- 3) равномерные включения в виде вертикальных полос;
- 4) шахматное расположение;
- 5) квадратные включения второго компонента;
- 6) круглые включения второго компонента.

Для вариантов 2–6 задавались размеры включений, а для вариантов 5, 6 – концентрация второго компонента.

Результаты расчета включали (рис. 7.3):

– графическое изображение расположения компонент и линий изотерм, полученных при моделировании;

– заданные коэффициенты теплопроводности первого и второго материала (обозначенные на рис. 7.3 как $L1$ и $L2$);

– объемное содержание первого ν_1 и второго ν_2 компонентов (обозначенные $V1$ и $V2$);

– полученный усредненный коэффициент теплопроводности двухкомпонентного материала λ^* (обозначенный $\langle L \rangle$).

Моделирование показало, что значение коэффициента теплопроводности двухкомпонентного материала определяется направлением теплового потока, изменяющегося в зависимости от неравномерности распределения компонентов по осям x и y . Максимальная теплопроводность наблюдается при включении второго компонента в виде горизонтальных полос, минимальная — при его включении в виде вертикальных полос (рис. 7.3).

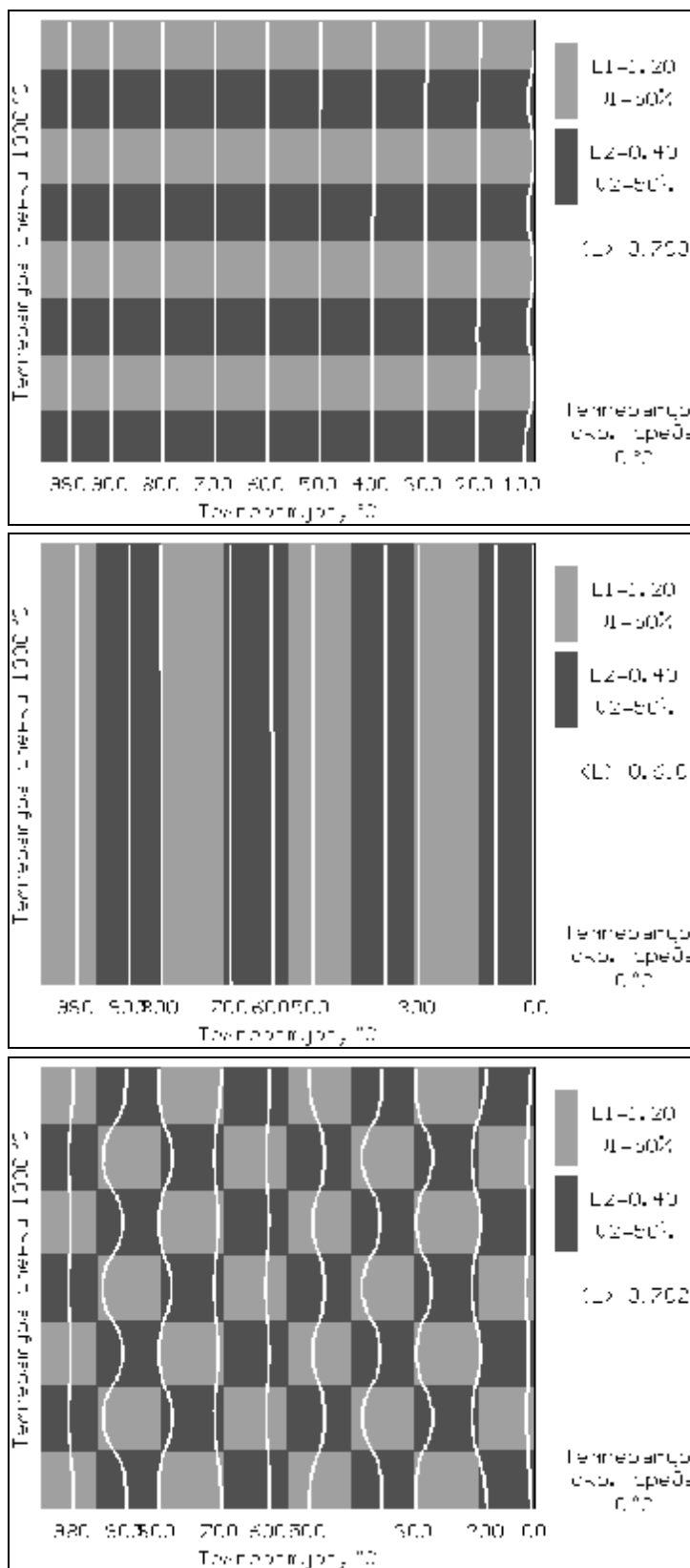


Рис. 7.3. Температурное поле двухкомпонентного материала

При равномерном распределении компонентов по осям x и y вид и размер включений второго компонента на усредненный ко-

эффицент теплопроводности λ^* влияния не оказывают. Так, на рис. 7.4 представлены зависимости λ^* от содержания второго компонента для круглых включений диаметром 3 и 10 мм и квадратных включений размером 3 и 10 мм (линии 1, 2, 3, 4 соответственно) при коэффициенте теплопроводности первого компонента $\lambda_1 = 1,2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

В материалах цементной технологии компоненты в смеси или системе распределены равномерно. Поэтому можно сделать вывод, что усредненный коэффициент теплопроводности для них зависит только от теплопроводности и концентрации компонентов, что подтверждается результатами моделирования, приведенными на рис. 7.5.

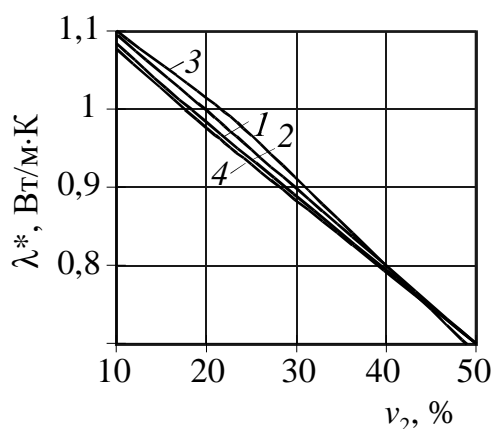


Рис. 7.4. Зависимость усредненного коэффициента теплопроводности λ^* от содержания второго компонента v_2 :

1, 2 – круглые включения диаметром 3 и 10 мм; 3, 4 – квадратные включения размером 3 и 10 мм

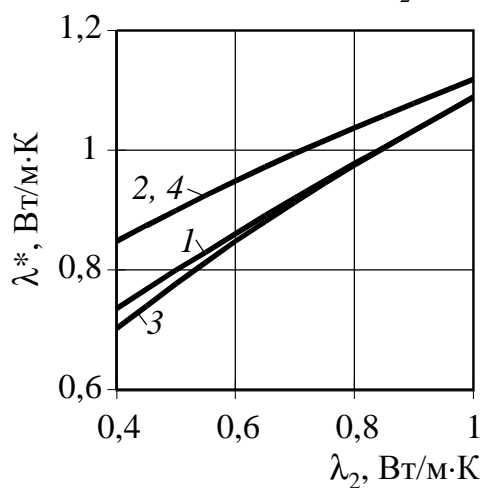


Рис. 7.5. Зависимость усредненного коэффициента теплопроводности от теплопроводности второго компонента:

1, 2 – круглые включения диаметром 3 и 10 мм; 3, 4 – квадратные включения размером 3 и 10 мм

На основании исследования модели предлагается усредненный коэффициент теплопроводности двухкомпонентного материала представить в следующем виде:

$$\lambda^* = 100 \left(\frac{v_1}{k_1} + \frac{v_2}{k_2} \right)^{-1}, \quad (7.8)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты.

Если принять в качестве коэффициента k_1 теплопроводность первого компонента, то коэффициент k_2 будет равен:

$$k_2 = v_2 \left(\frac{100}{\lambda^*} + \frac{v_1}{k_1} \right)^{-1}. \quad (7.9)$$

Между коэффициентами k_2 и λ_2 выявлена связь, близкая к линейной, которая представлена на рис. 7.6.

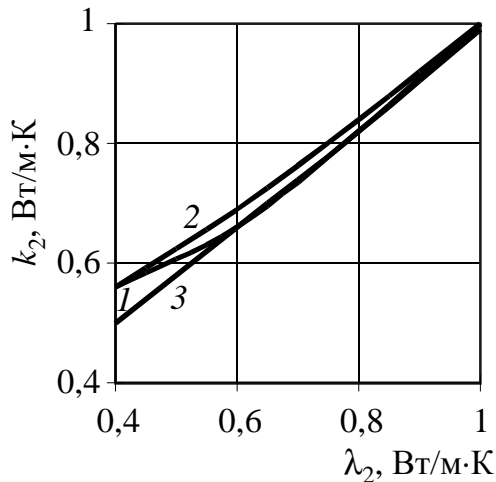


Рис. 7.6. Зависимость между коэффициентами в модели теплопроводности:

1 – прямоугольные включения второго компонента с концентрацией 50%;
2 – то же, с концентрацией 36%;
3 – шахматное расположение

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что выражение (7.8) применимо к многокомпонентным смесям и материалам при соблюдении условий:

- 1) материал разделяется на фазы, состоящие из отдельных компонентов;
- 2) распределение фаз в материале равномерно;
- 3) граница разделения фаз не имеет термического сопротивления;
- 4) размеры фаз находятся на макроуровне.

Для цементных сырьевых смесей и клинкера перечисленные условия соблюдаются. Смесей состоят из природных материалов,

представляющих минералы или химические соединения, технологическая схема приготовления смеси обеспечивает получение частиц материала порядка 0,001...0,020 мм и высокую степень усреднения, термическое сопротивление на границах разделения частиц может возникать только при наличии пор, что учитывается отдельно. Клинкер также разделяется на ряд отдельных фаз. Погрешность при использовании аддитивной формулы вызывается изменением направления градиента теплового потока, что может быть учтено вводимыми поправками.

Таким образом модель процесса теплопроводности в многокомпонентном материале можно представить в виде:

$$\lambda^* = \left(\rho_0 \sum \frac{m_i}{\rho_i \cdot f_i(\lambda_i)} \right)^{-1}, \quad (7.10)$$

где $f_i(\lambda_i)$ – функция от коэффициента теплопроводности i -го компонента, характеризующая изменение свойств компонентов на элементарном уровне и неравномерность теплового потока внутри материала.

Для учета состояния, в котором компоненты находятся в смеси, выражение (7.10) может быть представлено в виде

$$\lambda^* = \left(\sum k_i m_i \right) \left(\sum \frac{m_i}{f_i(\lambda_i)} \right)^{-1}, \quad (7.11)$$

где k_i – коэффициенты, учитывающие плотность и размеры частиц компонентов, то есть технологию приготовления сырьевой смеси (или условия получения системы).

В заключение необходимо отметить, что в диапазоне температур 0...400°C погрешность поверочного прибора для измерения теплопроводности согласно стандарту [177] составляет 5%; а промышленных приборов – 10%. Измерения при более высоких температурах дают погрешность 10...25%. Приведенная точность измерений определяет точность оценки коэффициента теплопроводности в 10...25%. Так, предложенный в работе [155] метод расчета теплопроводности цементного камня имеет среднюю погрешность от 8,5 до 16...26%.

7.2. ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ ДЛЯ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В разделе на основании предложенной модели процесса теплопроводности производится расчет теплопроводности огнеупорных материалов, близких по составу и технологии получения к клинкеру и клинкерной обмазке (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Данные для расчета теплопроводности

Материал	Динас	Магнезит завода «Магнезит»	Магнезит завода УПОО	Магнезит	Муллит	Формтерит	Шамот
	№ п/п						
	1	2	3	4	5	6	7
Источник данных	[178]	[178]	[178]	[179]	[180]	[180]	[180]
Пористость, %	52,7	25,3	4,9	17,8	0	0	59,3
Химический состав, мас. %							
SiO ₂	62,2	89,76	2,1	3,22	3,28	28,2	41
MgO	0,7	0,22	94,1	90,23	85,6	0	59
Al ₂ O ₃	31,2	2	1,8	2,24	4,99	71,	0
Fe ₂ O ₃	1,62	2,58	1,5	2,1	3,73	0	0
CaO	0,55	4,96	1,4	1,5	2,06	0	0

Для расчета коэффициентов теплопроводности компонентов огнеупорных материалов использовались экспериментальные данные для чистых спеченных окислов в диапазоне температур, характерных для эксплуатации огнеупоров. По табличным данным получены уравнения зависимости теплопроводности компонентов от температуры (табл. 7.2). Для расчета теплопроводности стекловидной фазы выбран метод Винкельмана–Шотта [156, 161], погрешность которого менее 2%.

В уравнении (7.11) коэффициенты k_i приняты равными 1, в качестве функций $f_i(\lambda_i)$ использован полином первой степени:

$$f_i(\lambda_i) = a_{i0} + a_{i1} \cdot \lambda_i. \quad (7.12)$$

Таблица 7.2

Зависимость теплопроводности веществ от температуры

Вещество	Библиографический источник	Зависимость $\lambda = f(t)$, Вт/м·К	Интервал температур, °С	Средняя погрешность, %
CaO	[171]	$6,98 + 828/t$	100...1000	0,6
	[171]	15,20	<100	–
Al ₂ O ₃	[171]	$\exp(3,69 - 3,14 \times 10^{-3} t + 1,23 \times 10^{-6} t^2)$	100...1800	1,2
	[171]	30,3	<100	–
SiO ₂	[171]	$0,35 + 0,0026 \cdot t$	0...1100	0,6
MgO	[171]	$\exp(3,90 - 3,18 \times 10^{-3} t + 1,21 \times 10^{-6} t^2)$	100...1600	0,9
	[171]	36,0	<100	–
Fe ₂ O ₃	[156]	$0,796 - 7,1 \times 10^{-4} t$	100...800	2,3
H ₂ O(ж)	[157]	$\exp(4,01 - 4,35 \times 10^{-3} t + 2,28 \times 10^{-5} t^2)$	0...100	2,1
		68,0	<100	–
CaCO ₃	[154]	$0,656 + 83,2/t$	100...1000	1,3
	[154]	1,36	<100	–
MgCO ₃	[154]	$2,74 - 0,002 t$	0...1000	0,7

Оценка коэффициентов a_{i0} и a_{i1} уравнения (7.12) производилась двумя способами. В первом варианте коэффициенты подбирались отдельно для каждого вещества; в этом случае для одинаковых компонентов разных веществ они были различными. Во втором варианте коэффициенты для каждого компонента принимались одинаковыми для всех веществ. Среднее отклонение коэффициентов теплопроводности из литературных источников, от значений, рассчитанных по уравнению (7.12), дано в табл. 7.3, а коэффициенты уравнения (7.12) – в табл. 7.4. Так как в огнеупорах содержалось малое количество CaO, коэффициенты для этого оксида были уточнены по данным работы [151].

Исходные данные и теплопроводность, рассчитанная по уравнению (7.12), показаны на рис. 7.7. Для сравнения там же приведена теплопроводность, рассчитанная «по формуле (7.5).

Таблица 7.3

Среднее относительное отклонение регрессионных уравнений, %

Номер материала (табл. 7.1)	1	2	3	4	5	6	7
С индивидуальными коэффициентами	7,2	6,6	17,2	0,8	2,6	1,0	7,9
С общими коэффициентами	22,2	18,5	27,8	3,0	25,5	25,0	53,5

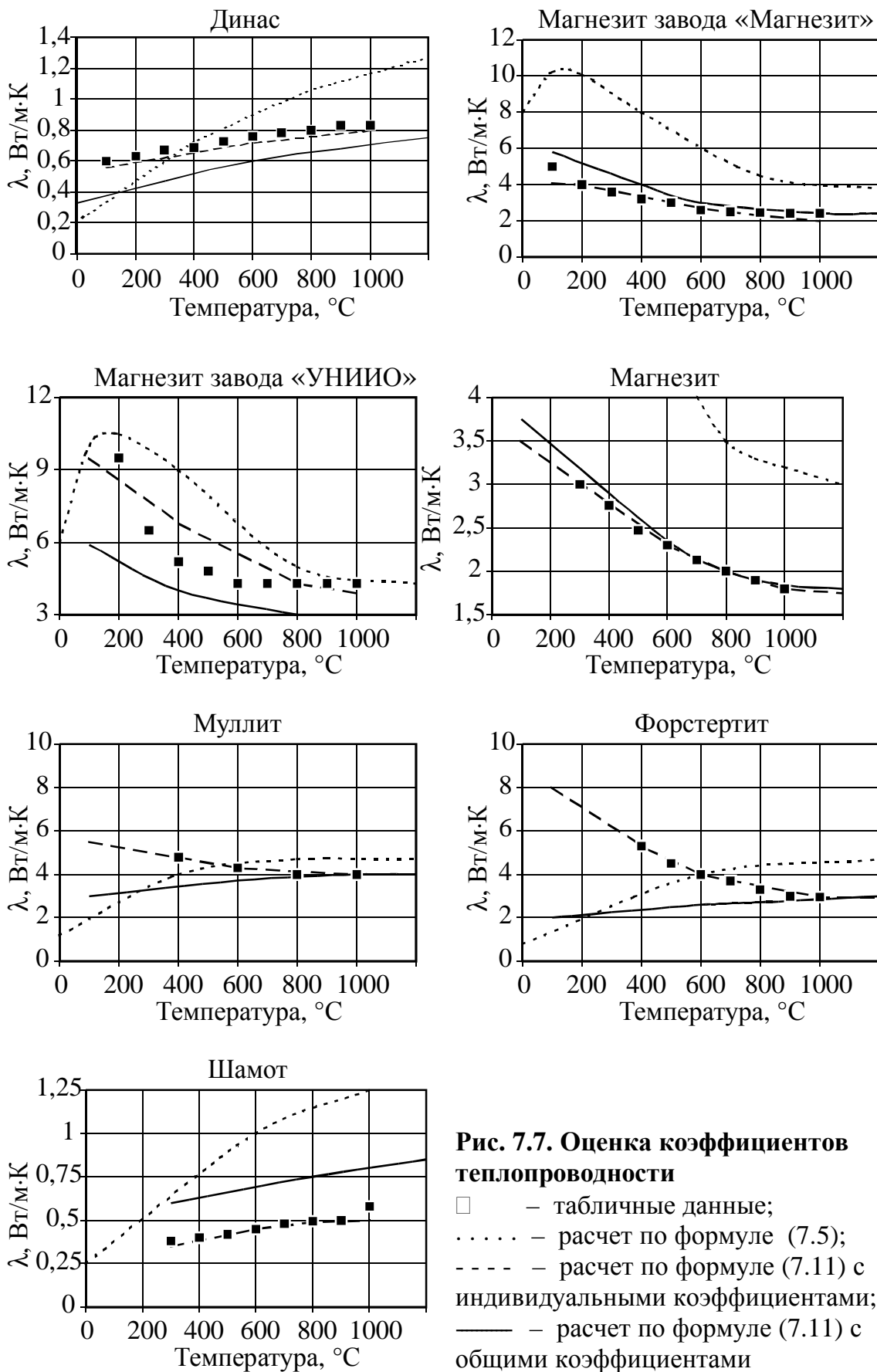


Рис. 7.7. Оценка коэффициентов теплопроводности

- — табличные данные;
- — расчет по формуле (7.5);
- — расчет по формуле (7.11) с индивидуальными коэффициентами;
- — расчет по формуле (7.11) с общими коэффициентами

Таблица 7.4

Оценка коэффициентов функции $\lambda_i(l_i)$

Номер материала (табл. 7.1)	Коэффициенты уравнения (7.12) для различных соединений									
	SiO ₂		MgO		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		CaO	
	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1	a_0	a_1
Индивидуальные коэффициенты										
1	0,963	0,304	0,000	1,000	0,000	1,000	0,051	1,007	0,000	1,000
2	0,164	0,011	0,635	0,454	0,000	0,984	0,840	0,376	-0,004	0,960
3	0,570	0,320	0,635	0,520	0,000	0,984	0,860	0,395	-0,004	0,924
4	0,234	0,126	0,830	0,230	-0,060	0,882	1,055	-0,544	-0,005	0,924
5	1,975	0,350	0,830	0,230	2,505	0,355	1,055	-0,544	-0,005	0,924
6	5,720	0,145	0,270	0,270	2,505	0,356	1,055	-0,544	-0,005	0,924
7	1,970	0,000	0,235	-0,542	0,875	-0,03	0,823	-1,134	-0,049	0,576
Общие коэффициенты										
–	0,54	0,44	1,27	0,46	1,62	0,90	0,08	0,16	0,00 (5,13)*	0,98 (-0,5)*

* Уточненные коэффициенты согласно работе [151].

Результаты аппроксимации (см. табл. 7.3, рис. 7.7) показывают, что формула (7.11) отражает качественную зависимость изменения коэффициента теплопроводности от температуры и обеспечивает получение результатов с допустимой степенью погрешности.

Полученные коэффициенты уравнения 9.5, представленные в табл. 7.5, могут быть использованы при расчете коэффициента теплопроводности огнеупоров.

Таблица 7.5

Коэффициенты функции $\lambda_i(l_i)$

Коэффициенты	Соединение				
	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
a_0	0,54	1,27	1,62	0,08	3,02
a_1	0,44	0,46	0,90	0,16	-0,10

С определенной степенью погрешности коэффициенты могут быть применены для расчета коэффициента теплопроводности цементных сырьевых смесей на различных стадиях термообработки и клинкера с условием представления минералов и других соединений, отсутствующих в табл. 7.5, как смеси оксидов. Это позволит учесть в расчете состав и температуру материалов.

7.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДЕЛИ ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ *

В разделе предложенная модель процесса теплопроводности применяется для обобщения экспериментальных данных, полученных при исследовании теплопроводности сырьевых компонентов и цементных сырьевых смесей. Для исследования зависимости теплопроводности сырьевых смесей разного состава применялись сырьевые материалы ОАО «Осколцемент»: мел, глина, огарки и их различные соотношения в пропорциях, характерных для технологии цемента (табл. 7.6).

Таблица 7.6

Химический состав сырьевых материалов

№	Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Прочие	ППП
1	Мел	2,69	0,33	0,22	53,65	0,96	42,15
2	Глина	66,04	14,37	5,83	1,17	10,69	6,7
3	Огарки	18,74	2,98	72,79	1,72	1,47	2,30
4	Мел, глина (70:30%)	21,70	4,54	1,90	37,91	3,88	31,52
5	Мел, глина (50:50%)	34,37	7,35	3,03	27,41	5,83	24,43
6	Мел, глина, огарки (63:27:10%)	21,4	4,38	8,99	34,29	2,34	28,6
7	Мел, глина, огарки (66,5:28,5:5%)	21,55	4,46	5,45	36,10	3,76	30,05

Исследуемые сырьевые компоненты и смеси сначала были разведены в воде и усреднены, затем высушены, измельчены и пропущены через сито для обеспечения однородного фракционного состава. Для исследования использовалась специально созданная установка измерения теплопроводности методом стационарного теплового потока в плоском слое [181]. Исследуемый сыпучий материал засыпался в установку и трамбовался. Поэтому характеристики слоя для всех материалов были одинаковы и пористость в результатах не учитывалась.

* Работа выполнена совместно с инженером Ю. К. Хутяевым.

Для каждого материала проводилось не менее двух опытов до обеспечения повторяемости результатов. В каждом опыте теплопроводность определялась при трех–пяти разных значениях мощности нагревателя, что соответствовало средней температуре слоя 200...500° С.

В результате проведенных экспериментов для каждого исследуемого материала была определена зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. На рис. 7.8 для смеси мел, глина, огарки (66,5:28,5:5%) приведена зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

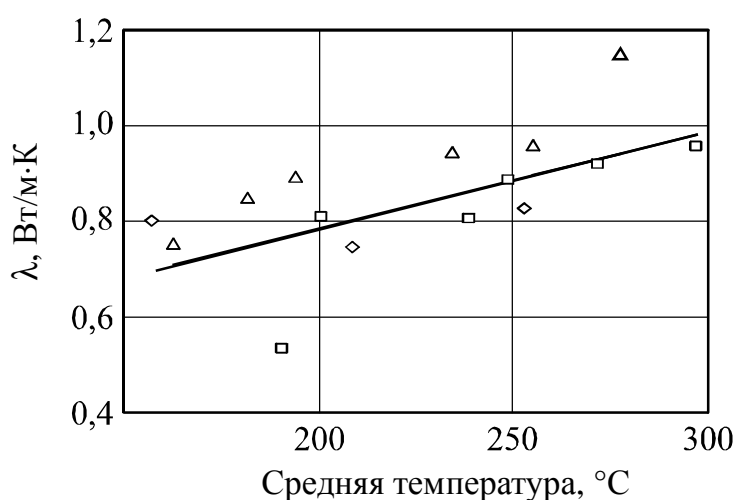


Рис. 7.8. Коэффициент теплопроводности смеси мел, глина, огарки (66,5:28,5:5%):

□ – опыт №1; ◇ – опыт № 2; △ – опыт № 3

Такая же линейная зависимость характерная и для всех остальных материалов, поэтому для усреднения выбрано линейное регрессионное уравнение $\lambda = a + bt$, коэффициент a которого можно с приближением, определяемым экстраполяцией, считать теплопроводностью материала при нулевой температуре, а коэффициент b – интенсивностью изменения теплопроводности при изменении температуры. Коэффициенты регрессионного уравнения оценивались по экспериментальным данным методом наименьших квадратов. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 7.7 и на рис. 7.9, средняя погрешность полученных уравнений составляла от 4 до 20%.

**Зависимость коэффициента теплопроводности сырьевых материалов
от средней температуры**

№	Материал	Средняя зависимость $\lambda=f(t)$	Температурный интервал
Сырьевые компоненты			
1	Мел	$1,590 - 0,00283t$	130...350
2	Глина	$0,286 + 0,00182t$	170...410
3	Огарки	$0,074 + 0,00373t$	210...290
Сырьевые смеси			
4	Мел, глина (85:15%)	$0,052 + 0,00098t$	210...330
5	Мел, глина (70:30%)	$0,085 + 0,00123t$	200...340
6	Мел, глина (50:50%)	$0,012 + 0,00214t$	230...380
7	Мел, глина, огарки (63:27:10%)	$0,368 + 0,00205t$	210...360
8	Мел, глина, огарки (28,5:66,5:5%)	$0,250 + 0,00300t$	150...300

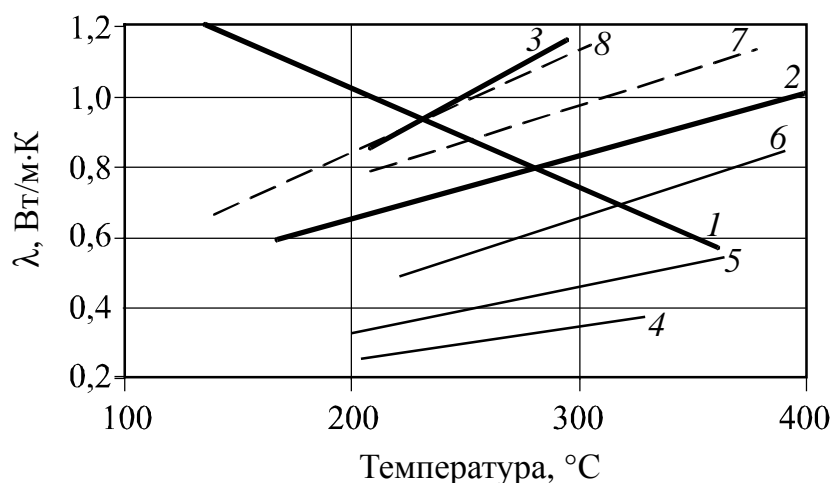


Рис. 7.9. Усредненный коэффициент теплопроводности сырьевых компонентов и смесей (номера материалов согласно табл. 7.7)

Для расчета коэффициента теплопроводности смеси использовалось уравнение (7.11)

$$\lambda^* = \frac{\sum k_i x_i}{\sum \frac{x_i}{k_{0i} + k_{1i} \lambda_i}} = \frac{\sum k_i x_i}{\sum \frac{x_i}{k_{0i} + k_{1i}(a_i + b_i t)}}, \quad (7.13)$$

где λ^* – коэффициент теплопроводности смеси; x_i – массовая доля i -го компонента в материале; λ_i – коэффициент теплопроводности i -го компонента при температуре t , Вт/м·К; k_i – коэффициент, учитывающий форму нахождения компонента в смеси; k_{0i} , k_{1i} – коэффициенты обобщенного уравнения проводимости для i -го компонента; a_i , b_i – коэффициенты регрессионного уравнения теплопроводности i -го компонента (см. табл. 7.7); t – температура, °С.

Коэффициенты уравнения (7.13) для сырьевых смесей оценивались на основании экспериментальных данных с использованием коэффициентов теплопроводности сырьевых компонентов. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для исследованных смесей представлены в табл. 7.8, а полученные коэффициенты – в табл. 7.9.

Таблица 7.8

Теплопроводность сырьевых смесей

Компонент	Массовые доли компонентов x_i								
	Мел	1	0	0	0,85	0,7	0,5	0,665	0,63
Глина	0	1	0	0,15	0,3	0,5	0,285	0,27	
Огарки	0	0	1	0	0	0	0,05	0,1	
t , °С	Экспериментальные значения коэффициента теплопроводности компонентов и сырьевых смесей, рассчитанные по табл. 7.7								
	200	1,02	0,65	0,82	0,25	0,33	0,44	0,78	0,85
	220	0,97	0,69	0,89	0,27	0,36	0,48	0,82	0,91
	240	0,91	0,72	0,97	0,29	0,38	0,53	0,86	0,97
	260	0,85	0,76	1,04	0,31	0,40	0,57	0,90	1,03
	280	0,80	0,80	1,12	0,33	0,43	0,61	0,94	1,09
	300	0,74	0,83	1,19	0,35	0,45	0,65	0,98	1,15
	t , °С	Коэффициенты теплопроводности сырьевых смесей, рассчитанные по уравнению (7.13)							
200		–	–	–	0,25	0,33	0,45	0,76	0,86
220		–	–	–	0,27	0,35	0,49	0,81	0,91
240		–	–	–	0,29	0,38	0,53	0,86	0,97
260		–	–	–	0,30	0,41	0,57	0,91	1,02
280		–	–	–	0,32	0,43	0,61	0,96	1,07
300		–	–	–	0,34	0,46	0,66	1,01	1,12

Коэффициенты уравнения для цементных сырьевых смесей

Компонент	Коэффициенты		
	k_i	k_{0i}	k_{1i}
Мел	0,143	2,800	-1,504
Глина	0,438	-3,070	7,779
Огарки	24,070	0,016	0,031

Как видно из рис. 7.9, для всех сырьевых компонентов и смесей, кроме мела, наблюдается повышение теплопроводности при увеличении температуры с близкой интенсивностью. Теплопроводность смесей из мела и глины ниже, чем теплопроводность отдельных компонентов, и растет при повышении содержания глины. С вводом в смесь огарков теплопроводность возрастает.

При сравнении экспериментальных значений с результатами расчета коэффициента теплопроводности по уравнению (7.13), в котором использовались коэффициенты табл. 7.9, получена погрешность менее 2,3%. Из этого можно сделать вывод, что предложенное уравнение теплопроводности смесей (7.13) описывает свойства сырьевых смесей, характерных для цементной технологии. С учетом коэффициентов, полученных экспериментальным путем и представленных в табл. 7.9, предложенное уравнение может применяться для оценки теплопроводности цементных сырьевых смесей.

7.4. ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВЛАЖНОСТИ И ПОРИСТОСТИ

Пористость p , определяемая в объемных процентах, может быть выражена через теоретическую плотность материала ρ_T (определенную для чистого однофазного идеально плотного материала) и действительную плотность ρ :

$$p = \frac{\rho_T - \rho}{\rho_T} 100\%. \quad (7.14)$$

Теоретическая плотность смеси определяется из теоретических плотностей ее составляющих с учетом температурного рас-

ширения a , для расчета которого согласно табличным данным работы [158] получены уравнения, представленные в табл 7.10.

Таблица 7.10

Данные для расчета пористости сырьевых материалов

Вещество	Теоретическая плотность при 20°C, кг/м ³ [158]	Коэффициент температурного расширения		
		Линейная регрессия $a=f(t) \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹	Интервал температур, °С	Средняя погрешность, %
Al ₂ O ₃	3970	$5,40 + 2,80 \times 10^{-3} t$	0...1500	0,6
Fe ₂ O ₃	5240	$11,7 + 3,50 \times 10^{-3} t$	0...1500	0,9
CaO	3320	$12,19 + 1,09 \times 10^{-3} t$	0...2100	1,1
SiO ₂	2650	0,5	0...1250	–
MgO	3580	$0,06 + 2,33 \times 10^{-3} t$	0...900	0,8
CaCO ₃	2700	$8,60 + 7,70 \times 10^{-3} t$	100...1000	0,9

Влияние пор на теплопроводность не поддается теоретическому описанию, так как совокупность трех видов теплообмена невозможно строго описать для хаотического расположения пор, а методы усреднения не дают необходимой степени точности [174]. На основании литературных данных работ [158, 171] для пятнадцати веществ при различных температурах (что дало 146 точек) была изучена зависимость между пористостью и отношением коэффициента теплопроводности пористого материала λ_p к коэффициенту теплопроводности идеально плотного материала λ_0 (табл. 7.11). Экспериментальные данные работ [171] и [158] не совпали по части значений коэффициента теплопроводности для одинаковых веществ, что показывает их независимость.

В результате анализа (рис. 7.10) установлена линейная зависимость, отклонение от которой для всех веществ, кроме кварца, сопоставимо с погрешностью исходных данных. Выпадение данных по кварцу можно объяснить анизотропностью его кристалла, что для материалов цементной технологии, как показано выше, не характерно.

Зависимость теплопроводности веществ от их пористости

Вещество	Данные	Интервал температур, °С	Количество точек	Пористость p , %	$\frac{\lambda_{п}}{\lambda_0}$, %	Среднее отклонение от линейной регрессии, %
CaO	[158]	100...1000	6	8,75	91,3	0,39
Кварц	»	100...1200	7	5...6	69,1	–
MgO	»	100...1600	9	2,8...8	95,7	–
NiO	»	100...1000	6	25,7	73,5	1,18
Th ₂ O	»	400...100	6	16,75	83,2	0,10
UO ₂	»	400...1000	5	26,7	74,7	1,76
ZrO ²	»	100...1400	4	12,3...14,6	86,2	–
Al ₂ O ₃	[171]	100...1160	8	4,5...7,3	95,6	–
CaO	»	100...1000	9	8,75	91,4	0,50
Mg ₂ SiO ₄	»	100...1200	6	31,1	68,9	0,27
MgO	»	100...1600	7	7,8...8,1	95,5	–
Al ₆ Si ₂ O ₁₂	»	100...1200	9	11,4	88,4	0,06
NiO	»	100...1000	7	25,7	73,5	1,18
MgAl ₂ O ₄	»	100...1200	6	7,65	91,1	1,01
BeO	»	100...1600	7	4,67...9,95	95,3	–
UO ₂	»	200...1000	9	26,7	74,6	1,63
TiO ₂	»	100...1200	5	3,5	96,2	0,13
ThO ₂	»	100...1200	7	16,5	83,2	5,09
ZrSiO ₄	»	200...1400	7	18,6	80,8	0,63
ZnO	»	400...800	7	34,0	65,9	0,53
ZrO ₂	»	100...1400	3	12,3...14,4	85,9	–
Al ₆ Si ₂ O ₁₂	»	200...1400	8	29,8	70,1	0,36

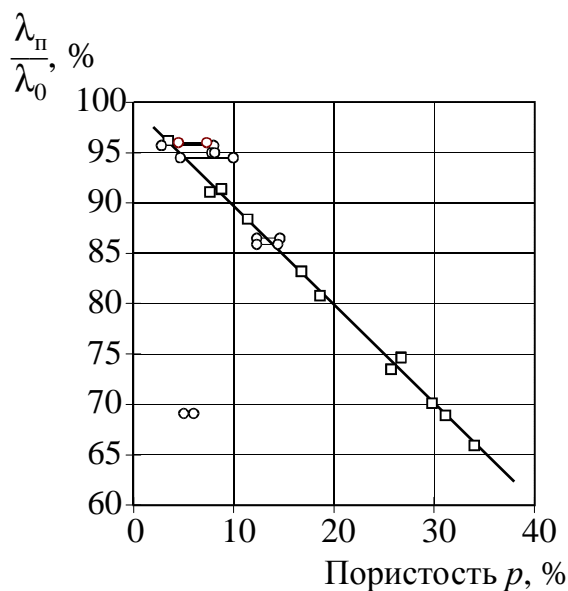


Рис. 7.10. Зависимость отношения теплопроводности пористого материала к теплопроводности идеального плотного материала от величины пористости

Таким образом, зависимость теплопроводности от пористости для веществ и температур, характерных для цементной технологии, при значениях пористости не превышающей 30 ... 40%, имеет вид:

$$\lambda_{п} = (0,995 - 0,00978p)\lambda_0, \quad (7.15)$$

или

$$\lambda_{п} \approx \frac{100 - p}{100} \lambda_0. \quad (7.16)$$

При увлажнении материала в нем происходит интенсификация теплопереноса [155, 172, 182]. В работе [182] предложена модель теплопроводности капиллярно-пористого тела, которая может быть применена для расчета теплопроводности во влажных сырьевых смесях. Исследование теплопроводности материалов при различной влажности согласно этой модели и данным работ [155, 171, 183] показало, что зависимость описывается многочленом второй степени, при этом коэффициент теплопроводности влажного материала $\lambda_{вл}$, Вт/м·К, выражается через коэффициенты теплопроводности сухого материала λ_0 , влаги λ_W и влажности W , мас. %:

$$\lambda_{вл} = \lambda_0 + 0,0267 \cdot W + (\lambda_W - \lambda_0 - 2,67) (0,01W)^2. \quad (7.17)$$

Необходимо также отметить взаимосвязь влажности W и пористости p , что позволит частично учесть улучшение тепловых контактов в пористом теле. В первом приближении можно принять, что при $W < p$ влага заполняет часть пор материала, при достижении $W = p$ все поры заполнены и пористость материала становится равной нулю. Более точную зависимость необходимо устанавливать на основании структуры материала, в частности отношения объемов микро- и макропор и степени заполнения влагой микропор.

7.5. МЕТОД РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ И КЛИНКЕРА

На основании рассмотренных положений предлагается метод расчета коэффициента теплопроводности цементных сырьевых смесей.

1. Определяется массовый состав сырьевой смеси, выраженной в следующих статьях: MgO, CaO, CaCO₃, MgCO₃, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, влажность W .

2. Рассчитываются объемные доли компонентов v_i и плотности смеси – идеальная ρ_T (для плотного материала) и действительная ρ . Эти величины взаимосвязаны и определяются в результате итерационного расчета согласно алгоритму:

а) задается пористость сухой смеси p или действительная плотность смеси ρ , неизвестная величина при этом будет рассчитана по заданной. Пористость для участка до зоны спекания принимается исходя из свойств и состава компонентов сырьевой смеси, в зоне спекания принимаются опытные данные [101, 184];

б) задается начальное приближение величины ρ_T ;

в) если задана реальная плотность ρ , пористость p рассчитывается по формуле

$$p = \rho_0 / \rho \cdot 100\%. \quad (7.18)$$

Если известна пористость сухой смеси p_0 , то пористость p с учетом заполнения пор влагой рассчитывается следующим образом, в об. %:

$$\rho = \begin{cases} \rho_0, & \text{при } W = 0; \\ \rho_0 - W, & \text{при } W < p_0; \\ 0, & \text{при } W \geq p_0, \end{cases} \quad (7.19)$$

где W – общая (физическая и гидратная) влажность сырьевой смеси, об. %;

г) рассчитывается объемный состав компонентов:

$$v_i = m_i \cdot \rho_0 / \rho_i, \quad (7.20)$$

где m_i – массовое процентное содержание соединения в смеси;
 ρ_i – плотность соединения при данной температуре;

д) определяется идеальная плотность:

$$\rho_0 = \sum \rho_i \cdot v_i; \quad (7.21)$$

е) значение ρ_t сравнивается с ранее принятым, расчет заканчивается при достижении заданной точности или повторяется с пункта б).

3. По данным табл. 7.2 рассчитываются коэффициенты теплопроводности веществ, составляющих смесь при данной температуре.

4. Оценивается количество стекловидной массы в смеси $v_{ст}$, об. %, на основе формулы Ли и Паркера:

а) при $t < 1340^\circ\text{C}$ стекловидной массы в материале нет;

б) при $t = 1340 \dots 1400^\circ\text{C}$ ее объемное содержание при допуске на линейный характер зависимости от температуры имеет вид

$$v_{ст} = \left[1 - \left(23,3 - \frac{t}{60} \right) \right] \frac{6,1 \text{ Fe}_2\text{O}_3 \rho_t^{\text{Fe}_2\text{O}_3} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rho_t^{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\sum \rho_i v_i}; \quad (7.22)$$

в) при $t > 1400^\circ\text{C}$:

$$v_{ст} = \frac{6,1 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \rho_t^{\text{Fe}_2\text{O}_3} + \text{Al}_2\text{O}_3 \rho_t^{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\sum \rho_i v_i}; \quad (7.23)$$

где Fe_2O_3 , Al_2O_3 – объемное содержание оксидов в смеси; $\rho_t^{\text{Fe}_2\text{O}_3}$, $\rho_t^{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – плотность оксидов железа и алюминия; v_i , ρ_i – объемные доли и плотности компонентов материала.

При наличии стекловидной массы рассчитывается ее коэффициент теплопроводности согласно работе [161], также производится пересчет на новый состав с вычетом оксидов, связанных в стекловидной массе. Далее последняя рассматривается как одна из составляющих смеси.

5. Согласно выражениям (7.10), (7.11), (7.12) и табл. 7.5 рассчитывается коэффициент теплопроводности сухой плотной смеси.

6. По формуле 7.1 и методике работы [182] учитывается влажность и пористость.

В общем виде алгоритм расчета представлен на рис. 7.11.

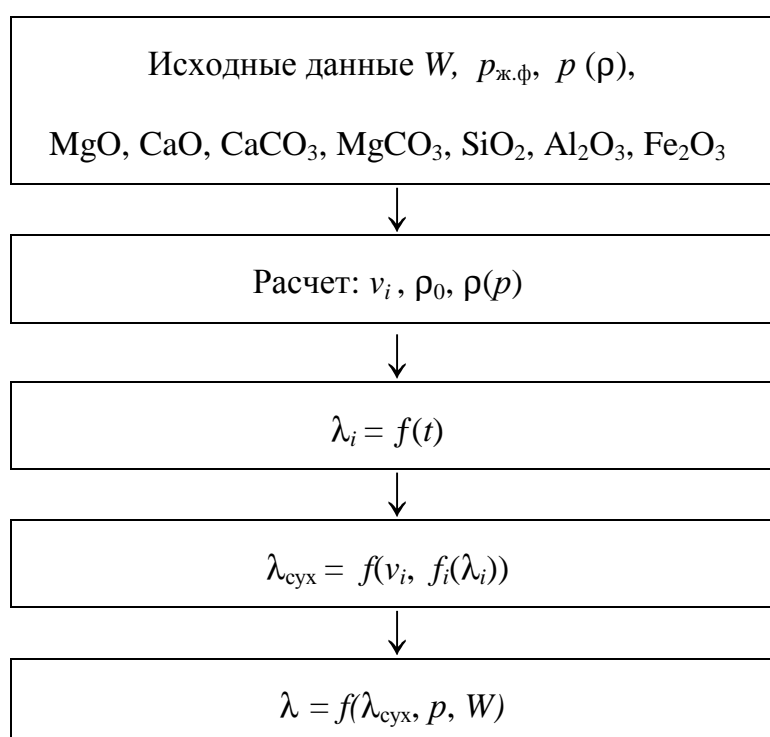


Рис. 7.11. Алгоритм расчета коэффициента теплопроводности цементных сырьевых смесей

При расчете теплопроводности клинкера необходимо учитывать, что основная масса клинкера составляет спекшийся обожженный материал. Для него можно принять приведенную выше методику с расчетом количества стекловидной массы по формуле (7.23) вне зависимости от температуры.

7.6. ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО ТЕРМООБРАБОТКЕ В ПЕЧИ

Теплофизические свойства цементных сырьевых смесей непрерывно изменяются в процессе их обжига, что вызвано изменением температуры и химическими превращениями. Но в настоящее время для теплофизических свойств сырья и клинкера используются константы, не зависящие от их состава, а для теплопроводности — и от температуры [150, 185].

В разделе приводятся результаты расчета коэффициента теплопроводности цементных сырьевых смесей в процессе их тепловой обработки с использованием предложенной в предыдущем разделе методики.

Расчет теплопроводности проводился для смесей различного состава, соответствующих вершинам области существования портландцементного клинкера (табл. 7.12). Содержание соединений определялось по химическому составу в зависимости от температуры согласно кинетическим закономерностям химических реакций.

Таблица 7.12

Состав получаемого клинкера

Оксид	Номер											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CaO	62	62	63	65,5	65,7	66,5	67	67	67	67	67	67
SiO ₂	21	24	20	20	22,4	24	20	21	23,1	24	24	24
Al ₂ O ₃	7	4	7	7	5,6	7	7	7	5,53	4	4	6,5
Fe ₂ O ₃	5	5	5	2,5	3,8	2,5	5	5	3,06	5	2,5	2,5
MgO	5	5	5	5	2,55	0	1	0	1,32	0	2,5	0

При расчете коэффициента теплопроводности λ использовалась модель процесса теплопроводности в многокомпонентном веществе, предложенная в предыдущем разделе. В зависимости от температуры по заданным составам получаемого клинкера определялся состав материала. Принималось, что исходное сырье состоит из карбонатов CaCO₃ и MgCO₃, каолинита AS₂H₂, α -кварца SiO₂ и Fe₂O₃. В процессе нагрева материала рассмат-

ривались реакции дегидратации, декарбонизации и образования клинкерных минералов из оксидов.

Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К, в интервале температур 0...1500 °С представлен на рис. 7.12. На участке до зоны декарбонизации теплопроводность в основном определяется содержанием известкового компонента, резкое возрастание коэффициента теплопроводности на участке 700...1000 °С вызывается изменением состава материала при декарбонизации. До завершения процессов декарбонизации коэффициенты теплопроводности для разных смесей близки, в дальнейшем разброс возрастает до 0,4...0,5 Вт/м·К. Значение λ зависит от содержания трех оксидов, оно растет при увеличении доли СаО и уменьшении доли Fe₂O₃ и MgO.

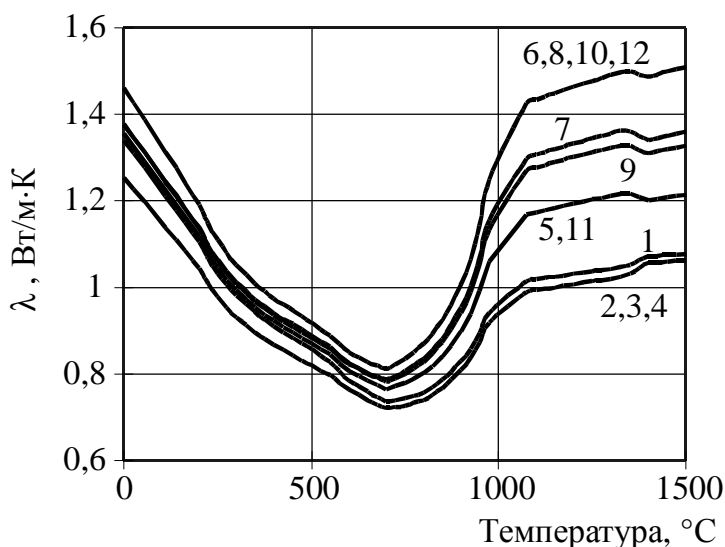


Рис. 7.12. Коэффициент теплопроводности сухого материала в процессе обжига (при пористости 0%)

Проверка адекватности результатов расчета проводилась с использованием литературных данных. Принятый в теплотехнических расчетах λ клинкера, равный 1,28 Вт/м·К [150], совпадает со средним значением рассчитанного коэффициента теплопроводности клинкера. Рассчитанные значения λ клинкерной обмазки находятся в пределах изменения значения, приведенного в работе [151] и равного 0,4...1,6 Вт/м·К. Рассчитанный коэффициент теплопроводности клинкерной обмазки Спасского и Пикалевского заводов сравнивался с экспериментальными данными работы [151], при этом отклонения находились в пределах экспериментальных погрешностей (рис. 7.13).

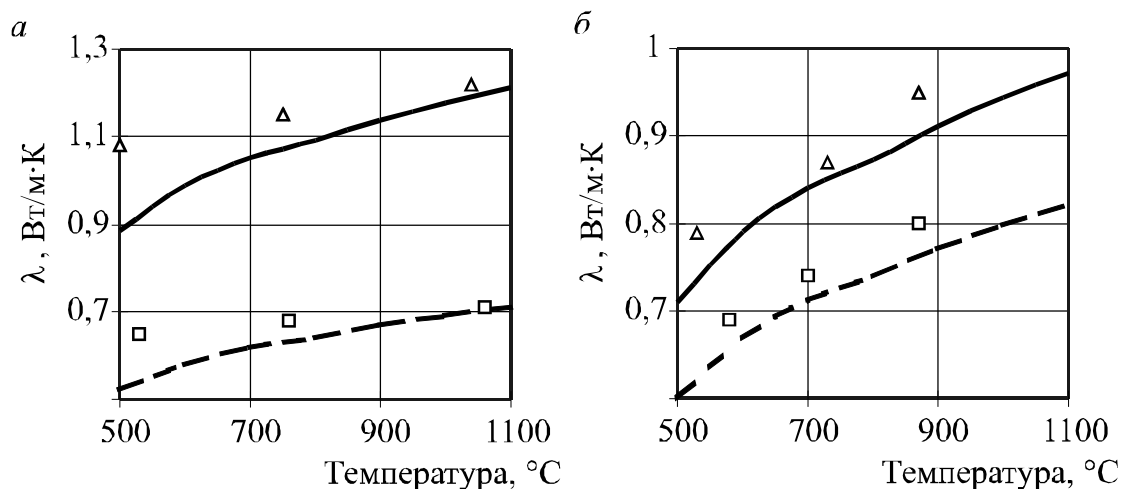


Рис. 7.13. Коэффициент теплопроводности клинкерной обмазки:
а – Спасский завод (— — 11 м, $\rho = 1970 \text{ кг/м}^3$; --- — 22 м, $\rho = 2800 \text{ кг/м}^3$);
б – Пикалевский завод (— — 6 м, $\rho = 2280 \text{ кг/м}^3$; --- — 10 м, $\rho = 2450 \text{ кг/м}^3$);
 □, Δ - соответствующие экспериментальные значения

На основании проведенного моделирования можно сделать вывод, что коэффициент теплопроводности обжигаемого материала изменяется в пределах $0,7 \dots 1,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Наибольшее различие свойств материала разного состава наблюдается при температурах свыше $700 \text{ }^\circ\text{C}$ и составляет до $20 \dots 25\%$. Установлено, что коэффициент теплопроводности материала зависит в основном от содержания оксидов CaO , Fe_2O_3 , MgO .

7.7. МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Согласно результатам ряда работ – моделирования охлаждения клинкера в колосниковом холодильнике, нагрева сырьевых частиц в потоке топочных газов, моделирования распределения температур по толщине обмазки и футеровки, – можно сделать вывод, что на точность расчетов интенсивного теплообмена значительное влияние оказывают методики расчета теплофизических свойств цементных материалов. Для обычного портландцементного клинкера имеются усредненные данные, но они не могут быть использованы при обжиге клинкера с применением техногенных продуктов и добавок в связи со значительным изменением состава сырья и клинкера. Выбор оптимального состава сырья и клинкера с точки зрения их теплофизических свойств в

рамках технологических требований к клинкеру позволит добиться заметного повышения эффективности теплообменных процессов цементного производства. Поэтому представляется целесообразным разработать обобщенные характеристики для оценки теплофизических свойств материала в процессе обжига.

В процессе тепловой обработки сырьевой смеси меняется ее состав, поэтому при расчете свойств материала в процессе обжига он устанавливается в зависимости от заданной температуры. Согласно работам [150, 186], на стадии испарения физической влаги, гидратации, декарбонизации и клинкерообразования лимитирующими являются именно эти процессы, таким образом, расчет свойств материала необходимо производить для материалов с постоянным химическим составом:

- 1) влажной непрокаленной сырьевой смеси;
- 2) сухой непрокаленной сырьевой смеси;
- 3) дегидратированного сырья;
- 4) дегидратированного и декарбонизированного сырья;
- 5) обжигаемого материала, имеющего жидкую фазу;
- 6) клинкера, характеризующегося завершенностью реакций клинкерообразования и застывшей жидкой фазой.

В связи с тем, что испарение влаги и дегидратация происходят на широком температурном промежутке, интервал $0...500^{\circ}\text{C}$ исключается из рассмотрения. Рассматриваемые в дальнейшем модификации представлены в табл. 7.13, при этом температурный интервал существования принят в соответствии с технологическими зонами [150], состав – согласно предположениям, изложенным в работе [185].

Таблица 7.13

Модификации цементных сырьевых смесей

№	Температурный интервал	Состав
3	$500...700^{\circ}\text{C}$	$\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3, \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$
4	$900...1300^{\circ}\text{C}$	$\text{CaO}, \text{MgO}, \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$
5	свыше 1300°C	$\text{CaO}, \text{MgO}, \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$, жидкая фаза

Статистический анализ показал линейность зависимости коэффициента теплопроводности и теплоемкости от температуры для отдельных модификаций материала, так как коэффициенты линейных уравнений $\lambda = a + b \cdot x$, определенные для 12 составов (см табл. 7.12) каждой модификации, имеют сильную степень корреляции (квадрат выборочного коэффициента корреляции между коэффициентами a и b для модификаций 3, 4, 5 соответственно равен 0,725; 0,878; 0,666).

Таким образом влияние, температуры на характер зависимости коэффициента теплопроводности и теплоемкости от химического состава материала не оказывает существенного влияния и при разработке характеристик этот фактор может не учитываться.

Разработка характеристики цементных сырьевых материалов производилась на основании статистического моделирования с использованием полученных в предыдущем разделе зависимостей свойств от состава материала при различных температурах. Применение линейной модели для коэффициента теплопроводности не позволило получить адекватную модель, таким образом в качестве модели использовалась нелинейная зависимость, представляющая обобщенное выражение для модульных характеристик цементных сырьевых смесей и клинкера:

$$M = \frac{a^C \cdot \text{CaO} + a^S \cdot \text{SiO}_2 + a^A \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + a^F \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + a^M \cdot \text{MgO}}{b^C \cdot \text{CaO} + b^S \cdot \text{SiO}_2 + b^A \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + b^F \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + b^M \cdot \text{MgO}}, \quad (7.24)$$

где $a^C, a^S, a^A, a^F, a^M, b^C, b^S, b^A, b^F, b^M$ – коэффициенты; CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ – химический состав, мас. %.

Рассматривались четыре вида материалов:

- модификация 1 (сухое дегидратированное сырье) при температуре 600°C;
- модификация 2 (сухое прокаленное сырье) при температуре 1200°C;
- модификация 3 (прокаленное сырье с жидкой фазой) при температуре 1400°C;
- сырьевая смесь, модифицируемая в процессе обжига, температура 600...1400°C.

В качестве контролируемых факторов использовался химический состав материала согласно разработанному плану эксперимента (см. табл. 7.12). Имеющейся матрице значений свойства y_i была сопоставлена матрица значений y_i^r , полученная с помощью уравнения (7.24). Степень адекватности матриц характеризовали среднее квадратичное отклонение S и остаточная дисперсия s^2 . Коэффициенты уравнения находились путем минимизации s^2 , задача многомерной экстремальной оптимизации решалась методом Ньютона [187]. В связи с коррелированностью факторов и нелинейностью модели значимость коэффициентов оценивалась на основе метода поочередной оценки [5] и сравнения статистических моделей, полученных на одинаковых выборках [188]. Адекватность уравнения оценивалась по остаточной дисперсии $s_{\text{ост}}^2$ и критерию Фишера F , дисперсия воспроизводимости рассчитывалась по погрешности значений свойства y_i . Погрешность при расчете коэффициента теплопроводности рассматривалась ранее и составила 20%. Погрешность расчета удельной теплоемкости определяется точностью коэффициентов уравнения $c_p = f(t)$, которые в таблицах термодинамических свойств приводятся с тремя значащими цифрами, таким образом, она равна 0,05...0,5%, при анализе задавалась погрешность 1%. Погрешность расчета коэффициента температуропроводности определяется погрешностью величин, по которым он рассчитывается, и составляет 15%. Адекватность оценивалась только для свойств сырьевой смеси, для модификаций 3, 4, 5 не оценивалась в связи с малой степенью свободы.

Результаты статистического анализа представлены в табл. 7.14 – 7.16. Полученные уравнения вида (7.24) с использованием коэффициентов из этих таблиц могут быть применены для расчета усредненных значений свойств материала на соответствующих этапах термообработки.

На основании регрессионных моделей зависимости свойств от состава для цементной сырьевой смеси в интервале температур 600...1400 °С возможно создание характеристик цементных сырьевых смесей – модуля теплопроводности M_λ и температуропроводности M_a . Теплоемкость для материала разного состава меняется незначительно, не более чем на 5%, поэтому в качестве характеристики она не рассматривалась.

Таблица 7.14

Зависимость теплопроводности от состава материала

Статистические характеристики	Номер модификации			Сырьевая смесь
	1	2	3	
Значимые коэффициенты:				
числитель: a^C	1,000	1,000	1,000	1,000
знаменатель: b^C	1,196	0,822	0,689	0,866
b^F	-0,205	-0,243	-0,181	-0,251
b^M	1,386	3,424	3,450	3,311
Число точек плана n	12	12	12	108
Число степеней свободы f	8	8	8	104
Остаточная дисперсия s^2	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$8,78 \cdot 10^{-4}$	$4,75 \cdot 10^{-2}$
Критерий Фишера F	–	–	–	1,076
Критерий Фишера критический $F^{кр}$	–	–	–	1,091

Таблица 7.15

Зависимость удельной теплоемкости c от состава материала

Статистические характеристики	Номер модификации			Сырьевая смесь
	1	2	3	
Значимые коэффициенты:				
числитель: a^C	1,000	1,000	1,000	1,000
a^S	1,000	1,000	1,000	1,000
знаменатель: b^C	0,830	0,947	0,958	0,889
b^S	0,663	0,569	0,498	0,609
b^A	0,020	-0,172	-0,246	-0,104
Число точек плана n	12	12	12	84
Число степеней свободы f	7	7	7	79
Остаточная дисперсия s^2	$1,94 \cdot 10^{-05}$	$1,99 \cdot 10^{-06}$	$1,08 \cdot 10^{-05}$	$1,10 \cdot 10^{-03}$
Критерий Фишера F	–	–	–	1,077
Критерий Фишера критический $F^{кр}$	–	–	–	1,117

Модуль теплопроводности

$$M_{\lambda} = \frac{\text{CaO}}{0,87 \cdot \text{CaO} - 0,25 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3,31 \cdot \text{MgO}} \quad (7.25)$$

характеризует скорость прохождения тепла внутри материала при его нагреве или охлаждении. Он влияет на скорость нагрева и охлаждения материала, влияние возрастает при увеличении размера гранул материала. Применительно к цементным сырьевым смесям

может принимать значения в пределах 0,8...1,2. Для интенсификации теплообмена модуль M_λ необходимо максимизировать.

Таблица 7.16

Зависимость температуропроводности от состава материала

Статистические характеристики	Номер модификации			Сырьевая смесь
	1	2	3	
Значимые коэффициенты:				
числитель: a^C	1,000	1,000	1,000	1,000
a^A	0,000	0,000	0,000	0,290
a^M	-1,174	-3,348	-3,996	-3,193
знаменатель: b^C	0,369	0,283	0,254	0,308
b^F	-0,058	-0,110	-0,135	-0,123
Число точек плана n	12	12	12	108
Число степеней свободы f	7	7	7	103
Остаточная дисперсия s^2	$1,69 \cdot 10^{-04}$	$2,49 \cdot 10^{-03}$	$5,72 \cdot 10^{-03}$	$2,46 \cdot 10^{-01}$
Критерий Фишера F	0,001	0,011	0,025	1,067
Критерий Фишера критический $F^{кр}$	1,720	1,720	1,720	1,092

Модуль температуропроводности (тепловой инерции)

$$M_a = \frac{\text{CaO} + 0,29 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 3,2 \cdot \text{MgO}}{0,31 \cdot \text{CaO} - 0,123 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_2} \quad (7.26)$$

характеризует скорость нагрева или охлаждения материала. Применительно к цементным сырьевым смесям может принимать значения в пределах 2,5...3,5. Для интенсификации теплообмена модуль M_a необходимо максимизировать.

Возможность использования модулей M_λ и M_a подтверждает их независимость от других характеристик состава (табл. 7.17).

Таблица 7.17

Корреляционная зависимость между характеристиками цементной сырьевой смеси и клинкера

Модули	Химический состав				Модульные характеристики			Минералогический состав			
	C	S	A	F	КН	n	p	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
M_λ	0,30	-0,12	0,32	0,20	-0,34	0,04	-0,44	-0,04	0,38	-0,39	0,48
M_a	0,29	-0,11	0,31	0,20	-0,35	0,03	-0,41	-0,06	0,39	-0,36	0,46

Наиболее эффективно модульные характеристики теплопроводности M_λ и температуропроводности M_a влияют на обжиг и охлаждение материалов в аппаратах интенсивного теплообмена (кипящего или взвешенного слоя и др.). Но из-за отсутствия достаточных для статистических обобщений данных об эксплуатации таких аппаратов влияние характеристик на процесс обжига рассматривается на примере получения клинкера во вращающихся цементных печах мокрого способа производства.

На основании анализа данных по 27 ведущим отечественным заводам, приведенным в работах [189] и [190], зависимость эффективности процесса обжига и качества клинкера от рассматриваемых модулей не выявлена. Это можно объяснить значительным различием производственных условий, в связи с чем необходимо проводить изучение влияния характеристики на эффективность получения клинкера в условиях конкретного производства.

Для исследования были взяты данные теплотехнических испытаний двух печей, проводившихся на Белгородском цементном заводе в 1994 – 1995 годах, на основании которых установлено наличие зависимости расхода топлива от модуля M_a с коэффициентом корреляции – 0,85 (рис. 7.14).

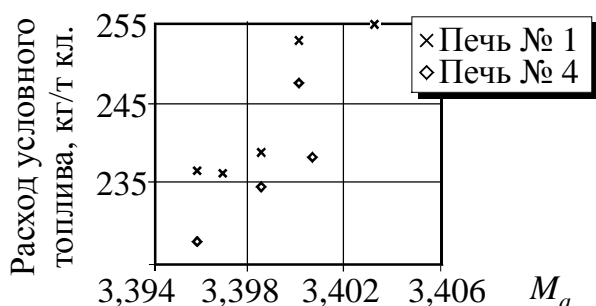


Рис. 7.14. Зависимость расхода топлива на обжиг от модуля температуропроводности

Таким образом, наиболее эффективно теплофизические свойства сырья характеризуют модуль температуропроводности.

Предлагаемые модульные характеристики предназначены для оценки свойств цементных сырьевых смесей с точки зрения интенсификации теплообменных процессов при обжиге. Они могут быть использованы в информационных технологиях исследования, управления и автоматизации цементного производства, при оценке состава цементных сырьевых смесей и клинкеров.

8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КЛИНКЕРНЫХ ГРАНУЛ МЕТОДОМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ*

8.1. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Описание методики

Стационарные методы исследования теплопроводности в настоящее время разработаны наиболее полно, но они характеризуются низкими рабочими температурами, сложностью экспериментальных установок и значительным временем проведения эксперимента [157, 181]. Нестационарные методы и методы неравновесной термодинамики основаны на исследовании меняющихся во времени температурных полей [162, 191]. Основная трудность их реализации состоит в приближении используемой математической модели к реальным экспериментальным условиям. Однако эти методы позволяют не только измерять теплопроводность вещества при высоких температурах, но и получать информацию о температуропроводности и теплоемкости.

В разделе предлагается метод определения зависимости коэффициента теплопроводности гранулированного материала от температуры, основанный на решении нестационарной обратной задачи теплопроводности. Принцип метода заключается в экспериментальном определении температур в двух точках гранулы при ее нагреве или охлаждении и моделировании температурного поля гранулы с использованием этих данных. По изменению поля температуры производится расчет теплового потока, который равен изменению теплосодержания гранулы за определенный промежуток времени, и расчет коэффициента теплопроводности исследуемого материала.

Необходимо отметить отличие предлагаемого метода от классической обратной задачи. Приведение в соответствие результатов численного моделирования и экспериментальных данных

* Работа выполнена совместно с инженерами А. С. Ивановым и А. А. Петровым

путем изменения коэффициента теплопроводности для рассматриваемой задачи невозможно, так как найденные коэффициенты будут содержать значительную погрешность, связанную с неточностью определения параметров модели (радиуса и условий теплоотдачи на поверхности) из-за неправильной формы гранулы. В предлагаемой методике моделирование служит для точного расчета количества тепла, теряемого гранулой, по которому и определяется коэффициент теплопроводности.

Исследование теплопроводности по предлагаемой методике состоит из следующих этапов.

1. Исследование материала гранулы, определение истинной и кажущейся плотности, эквивалентного диаметра.

2. Экспериментальное определение температур в двух точках гранулы $t_0^э$ и $t_k^э$, измеряемых с помощью двух термопар (рис. 8.1), при ее:

а) нагреве в муфельной печи до 1000°C ;

б) охлаждении в естественных условиях от 1000 до $200\dots 300^\circ\text{C}$.

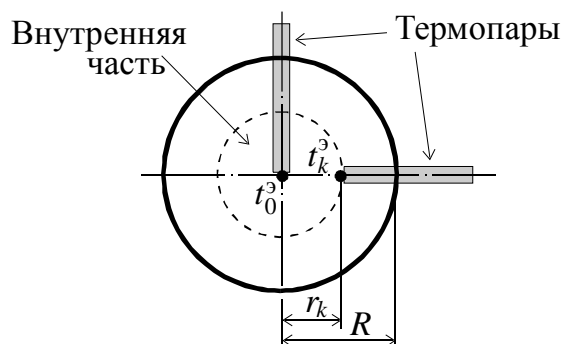


Рис. 8.1. Закладка термопар при экспериментальном измерении температуры гранулы

3. Приближение температур, определенных в эксперименте $t_0^э$ и $t_k^э$ и рассчитанных по модели теплопроводности $t_0^м$ и $t_k^м$ (рис. 8.2), выполняемое путем изменения граничных условий модели и других параметров, измерение которых связано с погрешностью.

4. Расчет коэффициента теплопроводности для каждого момента замера температуры, выполняемый по тепловому потоку Q , проходящему через сферу радиусом r_k , ограничивающую внутреннюю часть гранулы, площади поверхности сферы и разнице температуры в малом объеме у ее поверхности (рис. 8.2).

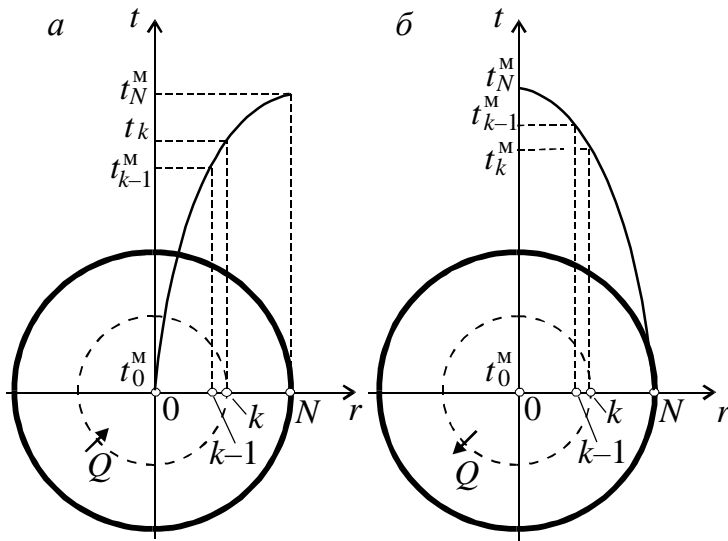


Рис. 8.2. Расчетное температурное поле гранулы:

a – нагрев;

б – охлаждение

5. Определение по полученной табличной зависимости коэффициента теплопроводности λ от температуры t регрессионного уравнения $\lambda=f(t)$ и итерационное уточнение зависимости.

Построение дискретного аналога

Температурное поле шарообразной гранулы определяется путем решения уравнения нестационарной одномерной теплопроводности в сферических координатах:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, r = 0; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_{\text{ср}} - T), r = R, \quad (8.1)$$

где ρ – плотность; c – теплоемкость; τ – время; r – координата; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; α – коэффициент теплоотдачи на поверхности гранулы; $T_{\text{ср}}$ – температура среды; R – радиус гранулы.

Дискретизация уравнения (8.1) произведена по методике, изложенной в работе [176]. Начало координат было расположено в центре гранулы, расчетная область разделена сеткой, содержащей $N+1$ узлов. Узел с номером 0 расположен в центре гранулы, с номером N – на ее поверхности (рис. 8.3). Около каждого узла выделен контрольный объем, представляющий шаровой слой, границами которого являются сферы с радиусами r_i . Каждый из узлов равноудален от границ соответствующего ему объема.

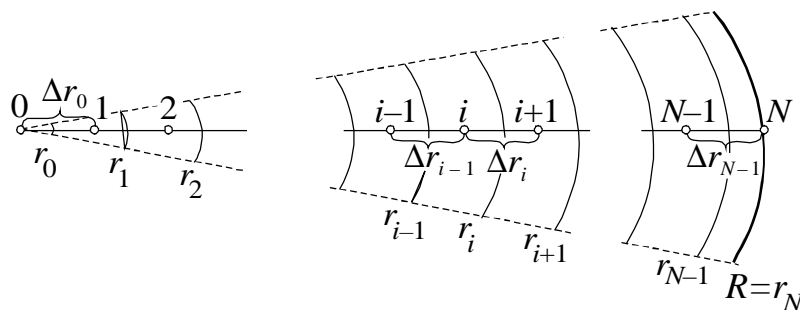


Рис. 8.3. Контрольные объемы для внутренних и граничных точек в сферических координатах

Для обеспечения равенства масс, содержащихся в каждом контрольном объеме, применена неравномерная сетка. По условиям эксперимента одна из точек модели должна совпадать с местом закладки термопары, это сечение задается номером k и радиусом r_k , задающим расстояние от точки до центра, по которому определяется радиус r'_k для границы контрольного объема. Сетка составляется с условием равенства между собой объемов, находящихся относительно этой границы снаружи и внутри гранулы. Границы разбиений рассчитываются следующим образом:

$$r_i = \frac{r'_k}{\sqrt[3]{\frac{k+1}{i+1}}}, \quad i \leq k;$$

$$r_i = \sqrt[3]{(r'_k)^3 + (R^3 - (r'_k)^3) \frac{i-k}{N-k}}, \quad i > k; \quad (8.2)$$

$$r'_k = \frac{2r_k}{1 + \sqrt[3]{\frac{k}{k+1}}}.$$

Пример такой сетки для 11 точек приведен на рис. 8.4, но в работе использовалась сетка из 75...200 точек.

В связи с симметрией области для левой границы (центра гранулы) задавалось граничное условие второго рода, заключающееся в равенстве нулю теплового потока.

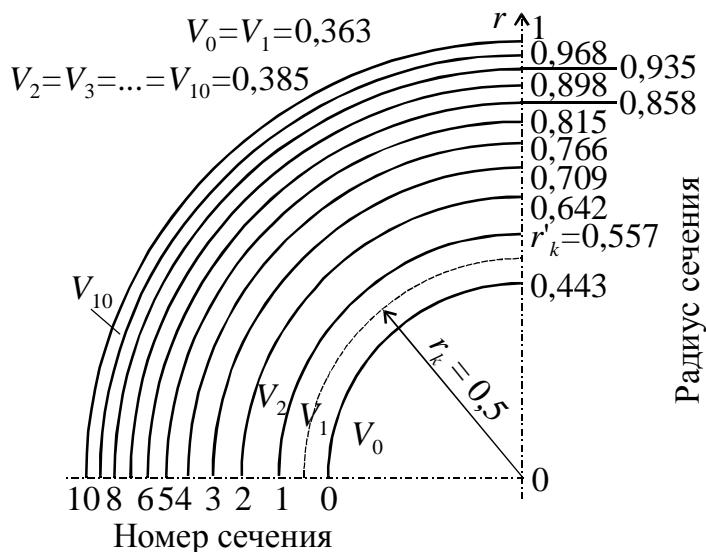


Рис. 8.4. Неравномерная сетка в сферических координатах при $N = 10$; $R = 1$; $r_k = 0,05$ и $k = 1$

Для правой границы (поверхности гранулы) задавалось граничное условие третьего рода:

$$\alpha = k_\alpha (\alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{изл}}), \quad (8.3)$$

где α , $\alpha_{\text{конв}}$, $\alpha_{\text{изл}}$ – коэффициенты теплоотдачи суммарный, конвекцией и излучением; k_α – коэффициент, учитывающий несферичность поверхности исследуемой гранулы.

Как показали результаты экспериментального измерения температуры внутри исследуемых нагреваемых или охлаждаемых клинкерных гранул, изменение температур в исследуемых точках во времени близко к линейному (рис. 8.5).

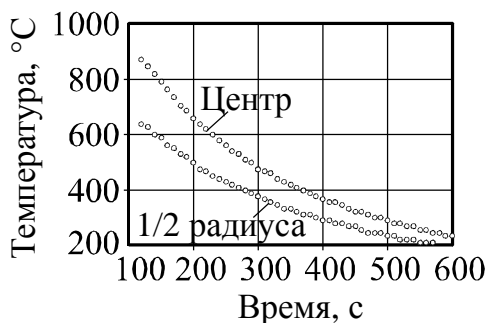


Рис. 8.5. Пример результатов измерения температуры клинкерной гранулы при ее охлаждении

Поэтому наибольшую точность при дискретизации дифференциального уравнения должна обеспечить схема Кранка–Николсона. Но недостатком этой схемы является колебание решения при недостаточно малых значениях шагов по времени. В рассматриваемом случае колебание происходило для точки, лежащей на поверхности гранулы (рис. 8.6). Неявная схема свободна от этого недостатка, но обладает большей погрешностью результатов, приводящей к более быстрому охлаждению (см. рис. 8.6).

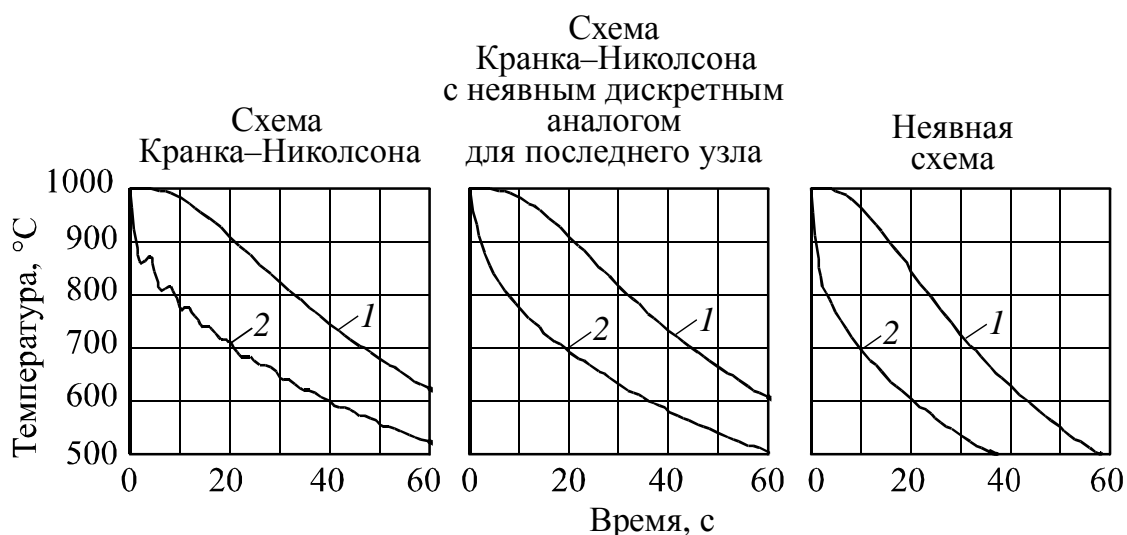


Рис. 8.6. Результаты моделирования охлаждения гранулы диаметром 1 см с использованием различных схем дискретизации:
 1 – температура центра гранулы; 2 – температура поверхности

Для обеспечения требуемой точности и приемлемого времени расчета предлагается дискретизировать уравнения во всех узлах сетки по схеме Кранка–Николсона, а для последнего узла, расположенного на поверхности гранулы, использовать неявную схему. В результате сохраняется точность решения при увеличении шага по времени и ликвидируется колебание значений температур в граничной точке (см. рис. 8.6).

В результате дискретизации уравнения (8.1) на сетке, приведенной на рис. 8.3, получается система, содержащая $n + 1$ уравнение:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{\rho c_0}{\Delta \tau} \frac{r_0^3}{3} (T_0^1 - T_0^0) = r_0^2 \frac{\lambda_0}{\Delta r_0} \left(\frac{T_1^1 + T_1^0}{2} - \frac{T_0^1 + T_0^0}{2} \right); \\
\dots\dots\dots \\
\frac{\rho c_i}{\Delta \tau} \frac{r_i^3 - r_{i-1}^3}{3} (T_i^1 - T_i^0) = \\
= r_i^2 \frac{\lambda_i}{\Delta r_i} \left(\frac{T_{i+1}^1 + T_{i+1}^0}{2} - \frac{T_i^1 + T_i^0}{2} \right) - \\
- r_{i-1}^2 \frac{\lambda_{i-1}}{\Delta r_{i-1}} \left(\frac{T_i^1 + T_i^0}{2} - \frac{T_{i-1}^1 + T_{i-1}^0}{2} \right), \quad i = 1 \dots N-1; \\
\dots\dots\dots \\
\frac{\rho c_N}{\Delta \tau} \frac{R^3 - r_{N-1}^3}{3} (T_N^1 - T_N^0) = \\
= R^2 \alpha (T_{cp} - T_N^1) - r_{N-1}^2 \frac{\lambda_{N-1}}{\Delta r_{N-1}} (T_N^1 - T_{N-1}^1),
\end{array} \right. \quad (8.4)$$

где r_i - расстояние от центра шарообразной гранулы до левой границы контрольного объема точки с номером i ; T^1 - температура в соответствующей точке в текущий момент времени; T^0 - температура в соответствующей точке в момент времени предыдущей итерации; $\Delta \tau$ - интервал итерации по времени;

или

$$\left\{ \begin{array}{l}
K_0 (T_0^1 - T_0^0) = k_0 (T_1^1 + T_1^0 - T_0^1 - T_0^0); \\
\dots\dots\dots \\
K_i (T_i^1 - T_i^0) = k_i (T_{i+1}^1 + T_{i+1}^0 - T_i^1 - T_i^0) - \\
- k_{i-1} (T_i^1 + T_i^0 - T_{i-1}^1 - T_{i-1}^0), \quad i = 1 \dots N-1; \\
\dots\dots\dots \\
K_N (T_N^1 - T_{N-1}^0) = k_{гр} (T_{cp} - T_N^1) - 2k_{N-1} (T_N^1 - T_{N-1}^1),
\end{array} \right. \quad (8.5)$$

где

$$K_i = \frac{\rho c_i}{\Delta \tau} \frac{r_i^3 - r_{i-1}^3}{3}, \quad i = 1 \dots N-1;$$

$$k_i = \frac{r_i^2}{2} \frac{\lambda_i}{\Delta r_i}, \quad i = 0 \dots N;$$

$$K_0 = \frac{\rho c_0}{\Delta \tau} \frac{r_0^3}{3}; \quad K_N = \frac{\rho c_N}{\Delta \tau} \frac{R^3 - r_{N-1}^3}{3}; \quad k_{\text{гр}} = \alpha R^2;$$

$$\lambda_i = f \left(\frac{T_{i+1}^1 + T_{i+1}^0 + T_i^1 + T_i^0}{4} \right); \quad c_i = f \left(\frac{T_i^1 + T_i^0}{2} \right);$$

$$\Delta r_i = 0,5(r_{i+1} - r_{i-1}), \quad i = 1 \dots N-2;$$

$$\Delta r_0 = 0,5(r_1 + r_0); \quad \Delta r_{N-1} = R - 0,5(r_{N-1} + r_{N-2}).$$

Для решения методом прогонки система (8.5) представляется в стандартном виде:

$$\begin{cases} a_0 T_1^1 + b_0 T_0^1 + d_0 = 0; \\ \dots \\ a_i T_{i+1}^1 + b_i T_i^1 + c_i T_{i-1}^1 + d_i = 0, \quad i = 1 \dots N-1; \\ \dots \\ b_N T_N^1 + c_N T_{N-1}^1 + d_N = 0, \end{cases} \quad (8.6)$$

где

$$a_0 = -k_0; \quad b_0 = K_0 + k_0; \quad d_0 = (k_0 - K_0)T_0^0 - k_0 T_1^0;$$

$$a_i = -k_i; \quad b_i = K_i + k_{i-1} + k_i; \quad c_i = -k_{i-1};$$

$$d_i = (k_i + k_{i-1} - K_i)T_i^0 - k_i T_{i+1}^0 - k_{i-1} T_{i-1}^0;$$

$$b_N = K_N + k_{\text{гр}} + 2k_{N-1}; \quad c_N = -2k_{N-1}; \quad d_N = -K_N T_{N-1}^0 - k_{\text{гр}} T_{\text{ср}}.$$

Граничные условия модели

Рассмотрим определение коэффициентов теплоотдачи при нагреве и охлаждении гранулы.

При нагреве гранула находится внутри замкнутого пространства печи с температурой среды и стенок 1000°C , при этом преобладает теплоотдача излучением, а конвективная теплоотдача составляет 3...5% от общей. Вследствие этого конвективная составляющая теплоотдачи при нагреве не учитывалась.

Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{изл}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$, определяется из плотности теплового потока и разности температур поверхности и окружающей среды:

$$\alpha_{\text{изл}} = E_{1,2} \frac{(0,01T_{\text{cp}})^4 - (0,01T_N)^4}{T_{\text{cp}} - T_N}, \quad (8.7)$$

где T_N , T_{cp} – абсолютная температура поверхности клинкерной гранулы и среды, К; $E_{1,2}$ – приведённый коэффициент поглощения для системы тел [192]:

$$E_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{\text{гр}}} + \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{ст}}} + \frac{1}{5,67} \right) \frac{F_{\text{гр}}}{F_{\text{ст}}}}, \quad (8.8)$$

где $\epsilon_{\text{гр}}$ – степень черноты гранулы; $\epsilon_{\text{ст}}$ – степень черноты внутренней стенки печи, на 50 % состоящей из шамотного огнеупора и на 50 % – из окисленной металлической поверхности нагревателей; $F_{\text{гр}}$, $F_{\text{ст}}$ – площадь поверхности гранулы и стенки печи соответственно. Приняты следующие степени черноты: $\epsilon_{\text{гр}} = 0,95$; $\epsilon_{\text{ст}} = 0,9$. Используя их, а также среднюю площадь поверхности гранулы ($0,00126 \text{ м}^2$) и объем муфельной печи ($0,2054 \text{ м}^3$), получаем $E_{1,2} = 0,955$.

Для условий охлаждения используется уравнение излучения в неограниченном объеме

$$\alpha_{\text{изл}} = \epsilon\sigma \frac{(0,01 \cdot T_N)^4 - (0,01 \cdot T_{\text{cp}})^4}{T_N - T_{\text{cp}}} \quad (8.9)$$

и критериальное уравнение процесса свободной термогравитационной конвекции от шара в бесконечном объеме при условиях $5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7$ [193]

$$\alpha_{\text{конв}} = A \left(\frac{T_N - T_{\text{ср}}}{r} \right)^{0,25}, \quad (8.10)$$

где ε – степень черноты поверхности гранулы (0,95); A – коэффициент, зависящий от температуры.

Расчет коэффициента теплопроводности

Результатом экспериментального измерения температур гранулы при ее нагреве или охлаждении является N_3 значений температур в центре гранулы (точка 0) и на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса от него (точка k), измеряемых через промежутки времени $\Delta\tau_3 = 10$ с:

$$t_{0,m}^3 \text{ и } t_{k,m}^3, \quad m = 1 \dots N_3.$$

В связи с затратами времени на извлечение гранулы из муфельной печи (или установки ее в печь) и подключение термопар время первого замера τ_0 не соответствует времени начала охлаждения (нагрева), то есть $\tau_0 > 0$.

Для исключения ошибок эксперимента и ступенчатости графика, вызванной градуацией шкалы электронного милливольтметра в 0,1 В (что наблюдается при использовании термопар типа ПП с небольшой термо-ЭДС), экспериментальные данные сглаживаются путем их аппроксимации полиномом 2, 3 или 4-й степени, в результате получают N_3 значений температур:

$$t_{0,m}^a \text{ и } t_{k,m}^a, \quad m = 1 \dots N_3.$$

Результатом решения системы уравнений дискретного аналога уравнения теплопроводности является распределение температур в грануле через заданные промежутки времени:

$$t_{i,j}^M, \quad i = 0 \dots N, \quad j = 0 \dots N_M.$$

При численном моделировании количество точек сетки задавалось равным $N = 75$, а шаг по времени $\Delta\tau_m = 0,1$ с. Число шагов по времени N_m выбиралось из условия:

– для охлаждения

$$\left(t_{0, N_m}^M \leq t_{0, N_3}^a \right) \vee \left(t_{k, N_m}^M \leq t_{k, N_3}^a \right) \vee (N_m \rightarrow \min);$$

– для нагрева

$$\left(t_{0, N_m}^M \geq t_{0, N_3}^a \right) \vee \left(t_{k, N_m}^M \geq t_{k, N_3}^a \right) \vee (N_m \rightarrow \min).$$

Из полученного распределения температур модели выбирались температуры в точках с номерами 0 и k , соответствующие времени экспериментальных замеров (рис. 8.7), в результате получены N_3 точек:

$$t_{0, m}^M \text{ и } t_{k, m}^M, \quad m = 1 \dots N_3.$$

Для определения коэффициента теплопроводности необходимо произвести приближение температур эксперимента $t_{0, m}^a, t_{k, m}^a$ и модели $t_{0, m}^M, t_{k, m}^M$. Критерием отклонения расчетных и экспериментальных температур является сумма квадратов разностей отклонений температур в каждой из точек и отклонений разностей температур центра и точки с номером k :

$$S = \sum_{m=1}^{N_3} \left[(t_{0, m}^M - t_{0, m}^a)^2 + (t_{k, m}^M - t_{k, m}^a)^2 + [(t_{0, m}^M - t_{k, m}^M) - (t_{0, m}^a - t_{k, m}^a)]^2 \right]. \quad (8.11)$$

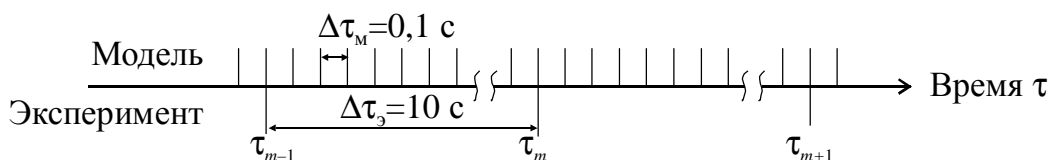


Рис. 8.7. Соответствие временного шага в модели и экспериментальных замерах

Основным способом минимизации значения S является изменение коэффициента k_α уравнения (8.3). Возможно уточнение и других параметров модели, измерение которых связано с определенной погрешностью: начальной температуры гранулы при охлаждении или температуры среды в муфельном шкафу при нагреве гранулы; промежутка времени до начала замеров τ_0 ; радиуса гранулы R .

Так как даже после минимизации абсолютного совпадения температур эксперимента и модели добиться не удастся, особенно в первых итерациях, для расчета коэффициента теплопроводности используется расчетное поле температур, совпадающее с температурой эксперимента в точках 0 и k и соответствующее характеру изменения температуры по радиусу гранулы в модели для остальных точек:

$$t_{i,m} = t_{0,m}^a - (t_{0,m}^M - t_{i,m}^M) \frac{t_{0,m}^a - t_{k,m}^a}{t_{0,m}^M - t_{k,m}^M}, \quad i = 0 \dots k; m = 1 \dots N_s. \quad (8.12)$$

Расчет коэффициентов теплопроводности λ_m для каждого момента времени экспериментальных замеров производится по количеству тепла, теряемого или получаемого внутренней частью гранулы:

$$\lambda_m = \frac{(Q_{m-1} - Q_m) \cdot (r_k - r_{k-1})}{2S_k \Delta t_m (\tau_m - \tau_{m-1})}, \quad t_m = \frac{t_{k-1} + t_k}{2}, \quad m = 1 \dots N_s, \quad (8.13)$$

где Q_{m-1} , Q_m – количество тепла, содержащееся во внутренней части гранулы (см. рис. 8.1) в моменты времени двух замеров τ_{m-1} и τ_m ; r_k и r_{k-1} – радиус точек, между которыми берется разность температур Δt ; S_k – площадь поверхности, ограничивающая внутреннюю часть гранулы; t_m – температура, соответствующая полученному коэффициенту λ_m .

Разность температур Δt для расчета коэффициента теплопроводности берется в двух соседних точках расчетной сетки модели, одной из которых является точка с номером k , соответствующая месту закладки термопары, второй – соседняя с ней точка.

Так как разность температур в точках k и $k-1$ за время $\Delta\tau$, изменяется, Δt рассчитывается как логарифмическое среднее между промежутками времени τ_{m-1} и τ_m :

$$\Delta t = \frac{(t_{k-1, m} - t_{k, m}) - (t_{k-1, m-1} - t_{k, m-1})}{\ln \frac{t_{k-1, m} - t_{k, m}}{t_{k-1, m-1} - t_{k, m-1}}}. \quad (8.14)$$

Теплосодержание внутренней части гранулы определяется по ее температурному полю:

$$Q_m = \sum_{i=1}^n \rho \frac{4}{3} \pi (r_i^3 - r_{i-1}^3) c t_{i, m}, \quad (8.15)$$

где ρ – кажущаяся плотность; c – теплоемкость, рассчитываемая в зависимости от температуры по данным работы [185].

После определения коэффициента теплопроводности в каждый момент времени по полученной табличной зависимости $\lambda_m(t_m)$, $m = 1 \dots N_3$, оцениваются коэффициенты линейной или квадратичной зависимости:

$$\lambda = a_0 + a_1 t \quad \vee \quad \lambda = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad (8.16)$$

где a_0 , a_1 , a_2 – коэффициенты.

Так как при моделировании охлаждения в уравнении (8.1) используется коэффициент теплопроводности материала, расчет производится итерационно с использованием полученной в предыдущей итерации зависимости (8.16).

Согласно изложенной методике, разработано программное обеспечение для моделирования температурного поля гранулы, обработки результатов эксперимента и определения коэффициентов зависимости коэффициента теплопроводности от температуры (рис. 8.8).

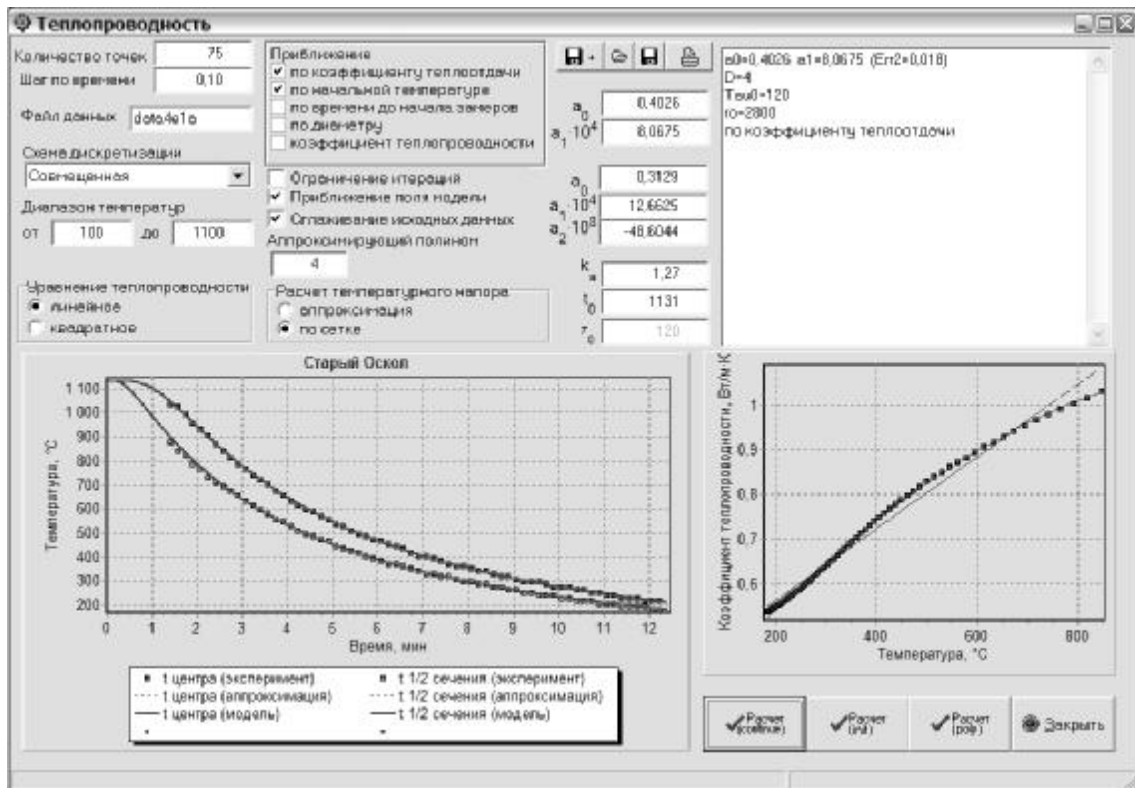
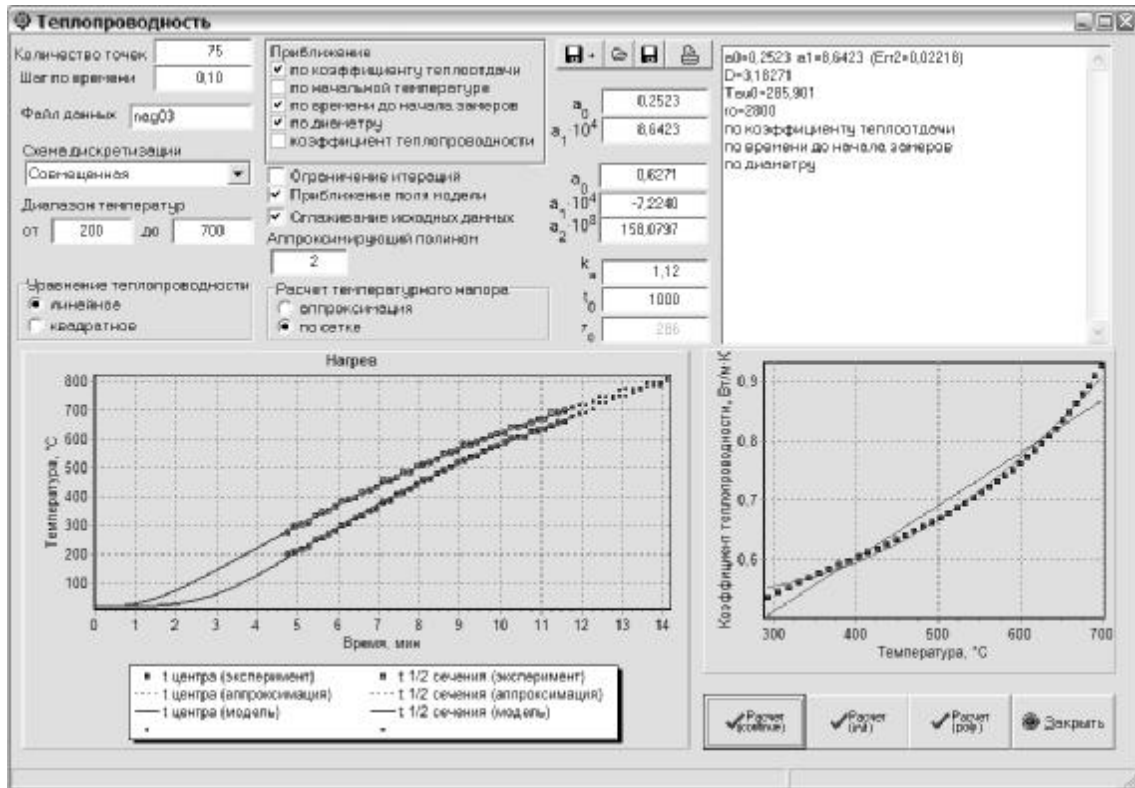


Рис. 8.8. Пример расчета коэффициента теплопроводности при нагреве и охлаждении гранулы

В программе реализованы следующие возможности:

- выбор количества точек сетки N и шага по времени в модели $\Delta\tau_m$;
- выбор вида регрессионного уравнения $\lambda=f(t)$, используемого в модели теплопроводности, которым может быть полином 2-й или 3-й степени;
- выбор наличия или отсутствия сглаживания исходных экспериментальных данных и степени сглаживающего полинома (от 2-й до 4-й);
- задание диапазона температур экспериментальных данных для исключения вносящих заметную погрешность начального участка, на который оказывает влияние процесс извлечения гранулы из муфельной печи или помещения гранулы в нее, и конечного участка, когда температуры мало изменяются по времени и по радиусу;
- выбор схемы дискретизации: Кранка–Николсона, неявной и совмещенной (предложенной в работе);
- выбор способа приближения расчетных и экспериментальных путем изменения следующих параметров: коэффициента k_α уравнения (8.3); времени до начала замеров $\Delta\tau_0$; начальной температуры гранулы при охлаждении или температуры в муфельной печи при нагреве; диаметра R . Для перечисленных способов возможно установление их активности или неактивности и очередности применения, которая задается перемещением способа в списке на экране;
- выбор между использованием для вычисления коэффициента теплопроводности поля температур, рассчитанного по уравнению (8.12), или поля температур модели;
- расчет температурного напора Δt для уравнения (8.13) по двум соседним узлам сетки с номерами k и $k-1$ или по двум точкам, с номером k и лежащей рядом с ней на заданном малом расстоянии $\Delta r \ll r_k - r_{k-1}$, температура во второй точке при этом определяется аппроксимацией полиномом Лагранжа температурного поля $t_{i,m}$;
- задание начальных значений для коэффициентов, используемых при приближении;

– наглядное представление хода расчета в виде демонстрации в реальном времени в графическом виде экспериментальных точек, температур, полученных в результате моделирования, полученной зависимости для коэффициента теплопроводности.

Алгоритм работы программы представлен на рис. 8.9.

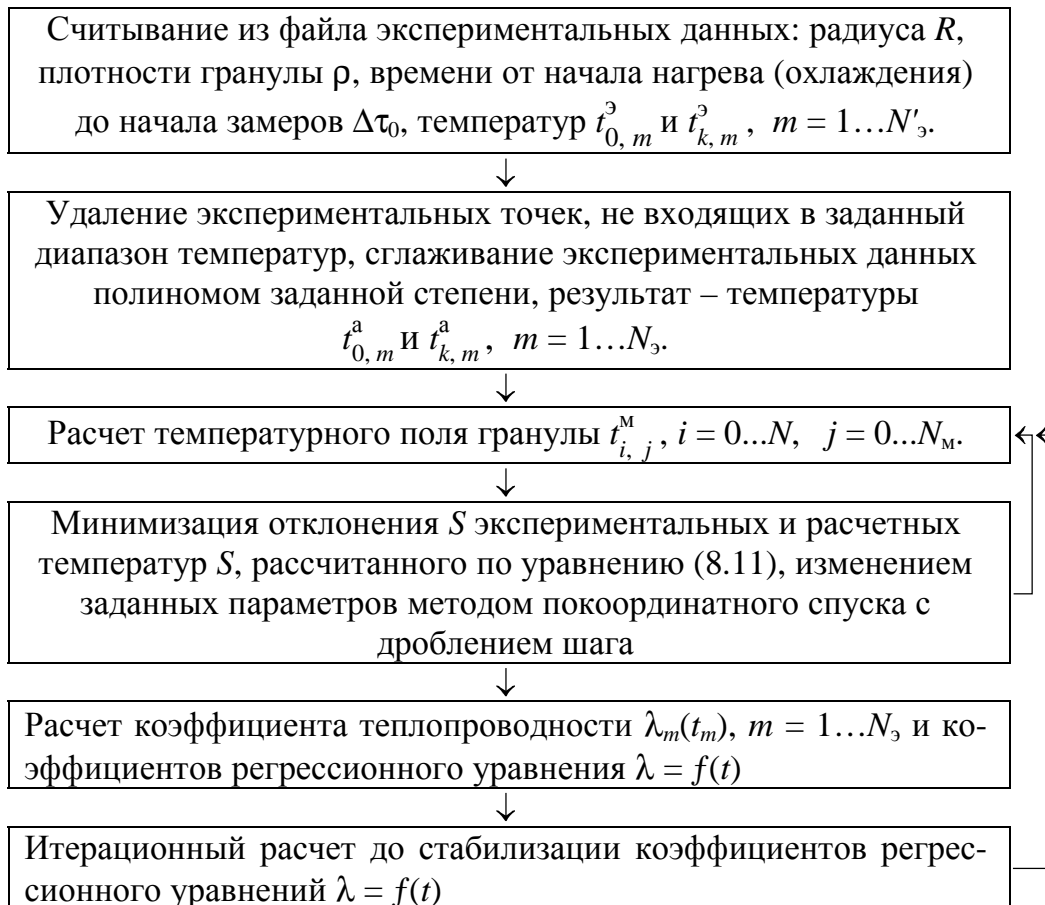


Рис. 8.9. Алгоритм расчета коэффициента теплопроводности

Графический интерфейс программы позволяет визуально оценивать точность аппроксимации экспериментальных данных полиномом, степень приближения температур модели и эксперимента, вид получаемой зависимости для коэффициента теплопроводности, дает возможность изменением исходных данных подбирать наиболее удачный вариант расчета. Использование графического диалогового интерфейса и наглядного представления хода и результатов расчета оказало также большую помощь при разработке и отладке алгоритма программы.

Для тестирования программы в качестве исходных данных задавалось распределение температур, полученное аналитическим решением уравнения нестационарной теплопроводности [192]. Результаты расчета коэффициента теплопроводности при различных вариантах параметров процесса (плотности, теплоемкости, коэффициента теплоотдачи) не отличались от задаваемого при аналитическом решении более чем на 0,5%.

8.2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения теплопроводности использовались заводские клинкерные гранулы АО «Белгородский цемент» (БЦЗ), АО «Осколцемент» (СОЦЗ) и гранулы, полученные в лабораторных условиях обжигом в высокотемпературной печи (Л).

Критерии отбора заводских гранул были следующими: форма, наиболее близкая к шару; диаметр 30 мм или более. В отобранных гранулах просверливались два отверстия диаметром 3 или 4 мм, одно – до центра гранулы, другое – на глубину, равную половине радиуса (данное расстояние выбрано для предотвращения влияния канала термопары на процесс теплопроводности в ней). В полученные отверстия вставлялись термопары типа «ПП», помещенные в керамические трубки. Точное местоположение спаев термопар определялось графическим построением проекции гранулы и термопар на плоскость.

Лабораторные гранулы (рис. 8.10) приготовлены из заводской сырьевой смеси АО «Белгородский цемент», в части из них сырьевая смесь была скорректирована известковым, глинистым, железистым компонентами для увеличения или уменьшения коэффициента насыщения при сохранении постоянными глиноземного и кремнеземного модулей.

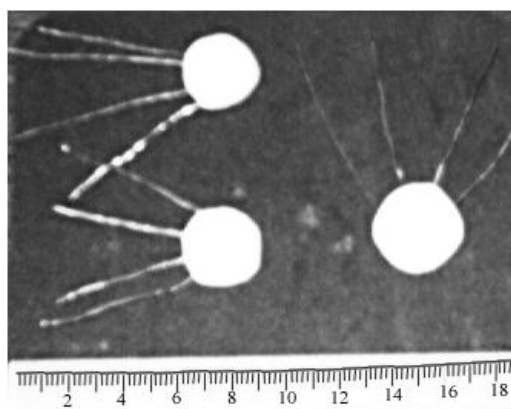


Рис. 8.10. Лабораторные гранулы

Методика приготовления лабораторных гранул следующая:

1. Из влажного шлама готовились гранулы шарообразной формы и сушились до влажности, при которой еще сохраняется их форма и пластичность.

2. Гранулы разделялись на две равные части. По поверхности среза определялся диаметр гранулы и ее центр, затем в центр гранулы и в точку на расстоянии $\frac{1}{2}$ радиуса помещались горячие спаи термопар типа «ПП», рабочая температура которых 1600 °С.

3. Части гранулы соединялись, она высушивалась и обжигалась при температуре 1450°С. По окончании обжига клинкерные гранулы охлаждались в естественных условиях при температуре помещения.

Характеристики исследованных гранул представлены в табл. 8.1 и 8.2, методика исследования процесса нагрева и охлаждения клинкерных гранул – в табл. 8.3.

Таблица 8.1

Характеристики клинкерных гранул

Обозначение и номера гранул	Химический состав				Фазовый состав*			Характеристики		
	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A+C ₄ AF	КН	n	p
БЦЗ-1 (№ 1, 7–14)	67,89	23,13	5,06	3,83	61,52 –	19,89 –	6,89+11,66 –	0,9	2,6	1,32
БЦЗ-2 (№ 2–6)	66,55	4,34	4,43	22,9	61,39 69,2	19,36 21,4	4,01+13,48 9,4	0,9	2,61	1,41
СОЦЗ-1 (№ 15)	67,94	5,84	4,15	22,07	63,68 66,00	15,26 21,00	8,45+12,63 13	0,92	2,21	1,41
СОЦЗ-2 (№16)	68,13	5,74	3,89	22,24	64,21 65,00	15,35 18,00	8,63+11,84 17	0,92	2,31	1,42
Л-1 (№17–22)	67,98	4,47	4,09	23,46	62,57 52,00	20,08 29,00	4,93+12,45 19	0,9	2,74	1,09
Л-2 (№23–24)	68,38	15,94	4,89	12,24	66,89 –	15,94 –	4,89+12,24 –	0,92	2,74	1,1
Л-3 (№25)	67,54	23,78	4,55	4,13	57,83 –	54,54 –	5,02+12,56 –	0,88	2,74	1,1

* Числитель – расчет по химическому составу, знаменатель – петрография.

Таблица 8.2

Свойства клинкерных гранул

Обозначение гранул	Плотность, кг/м ³			Пористость, % (расчет по кажущейся и истинной плотности)	
	Кажущаяся	Истинная			
		Пикнометрический способ (а)	Расчет по минералогическому составу* (б)	(а)	(б)
	БЦЗ-1	2800	3100	3130	9,7
БЦЗ-2	2800	–	3130	–	11,0
СОЦЗ-1	2800	3000	3140	6,7	10,8
СОЦЗ-2	2800	3000	3130	6,7	10,5
Л-1	2600	3200	3140	18,8	17,2
Л-2	2600	–	3130	–	17,0
Л-3	2600	–	3140	–	17,2

* Плотности клинкерных фаз: C_3S – 3,13; C_2S – 3,26; промежуточная – 3,00 кг/м³.

Таблица 8.3

Методика проведения эксперимента

№	Нагрев (а)	Охлаждение (б)
1.	Определяется объем и кажущаяся плотность гранулы	
2.	Гранула помещается в лабораторную печь, нагретую до 1000...1200°С. Гранула выдерживается в печи до того момента, когда температура всех слоев гранулы не будет равна температуре, поддерживаемой в печи	Гранула помещается в лабораторную печь, нагретую до 1000...1200°С. К холодным концам термопар подсоединяются электронные милливольтметры, измеряющие термо-ЭДС термопар
	По истечении времени выдержки запускается секундомер, гранула извлекается из печи и помещается на огнеупорный кирпич, где она охлаждается в естественных условиях при комнатной температуре. К холодным концам термопар подсоединяются электронные милливольтметры, измеряющие термо-ЭДС термопар	

3.	В лабораторный журнал заносятся показания обоих милливольтметров и время с момента начала нагрева гранулы. Измерения производят через каждые 10 с и заканчивают при достижении равенства показаний в двух измеряемых точках
4.	По термо-ЭДС определяют температуру в двух точках гранулы
5.	На основании полученных результатов создается файл данных, содержащий температуру печи (<i>a</i>) или температуру, до которой была нагрета гранула (<i>b</i>), эквивалентный радиус и плотность гранулы, время от начала охлаждения гранулы до первого замера в секундах, температуры в двух исследуемых точках гранулы в различные моменты времени. Далее производится расчет, в результате которого определяется коэффициент теплопроводности в виде полинома 2-й или 3-й степени
6.	Эксперимент дублируется от двух до четырех раз (при целостности гранул). После измерений производится петрографический анализ гранул и определение их истинной плотности пикнометрическим методом

Обработка экспериментальных данных производится по методике, описанной в разд. 8.1.

8.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ГРАНУЛ

Зависимости коэффициента теплопроводности от температуры, полученные в результате исследования, представлены в в табл. 8.4 и рис. 8.11, 8.12.

Таблица 8.4

Зависимость коэффициента теплопроводности клинкерных гранул от температуры

Наименование и номер гранулы	Диаметр, см	Коэффициенты уравнения $\lambda = a_0 + a_1 t$		Диапазон температур, °С	Среднее квадратичное отклонение
		a_0	$a_1 \cdot 10^4$		
1	2	3	4	5	6
Клинкер АО «Белгородский цемент» (БЦЗ), охлаждение					
БЦЗ–1 (гранула № 1)	4,0	0,50	2,26	410...530	0,0635
БЦЗ–1 (гранула № 1)	4,0	0,60	–	200...560	0,0942
БЦЗ–1 (гранула № 1)	4,0	0,58	0,78	300...570	0,0316

Продолжение табл. 8.4

1	2	3	4	5	6
БЦЗ–1 (гранула № 1)	4,0	0,46	0,09	250...550	0,0124
БЦЗ–1 (гранула № 1)	4,0	0,45	0,34	300...520	0,0160
БЦЗ–1 (гранула № 1)	4,0	0,40	4,91	300...600	0,0246
БЦЗ–2 (гранула № 2)	4,4	0,55	14,58	400...920	0,0308
БЦЗ–2 (гранула № 2)	4,4	0,47	15,15	400...920	0,0467
БЦЗ–2 (гранула № 2)	4,4	0,14	16,99	550...950	0,0245
БЦЗ–2 (гранула № 2)	3,6	0,79	4,81	500...900	0,0069
БЦЗ–2 (гранула № 3)	3,6	0,78	5,87	500...1000	0,0128
БЦЗ–2 (гранула № 4)	3,8	0,33	4,25	400...730	0,0022
БЦЗ–2 (гранула № 4)	3,8	0,19	7,72	300...900	0,0465
БЦЗ–2 (гранула № 5)	4,6	–0,01	7,51	400...820	0,0045
БЦЗ–2 (гранула № 5)	4,6	0,06	5,16	400...760	0,0014
БЦЗ–2 (гранула № 6)	3,96	0,19	5,03	350...820	0,0090
БЦЗ–2 (гранула № 6)	3,96	0,28	2,59	300...620	0,0026
Средние значения	–	0,40	5,77	–	–
Коэффициент вариации	–	48%	38%	–	–
Клинкер АО «Белгородский цемент» (БЦЗ), нагрев					
БЦЗ-1 (гранула № 7)	3,16	0,25	8,64	300...700	0,0187
БЦЗ-1 (гранула № 8)	5,1	0,46	4,35	400...800	0,0128
БЦЗ-1 (гранула № 8)	5,1	0,72	2,96	400...800	0,0341
БЦЗ-1 (гранула № 9)	4,58	0,65	3,59	450...850	0,1168
БЦЗ-1 (гранула № 10)	5,23	0,33	7,45	450...800	0,0056
БЦЗ-1 (гранула № 11)	4,14	0,46	3,03	550...900	0,0088
БЦЗ-1 (гранула № 12)	4,7	0,49	6,31	400...900	0,0089
БЦЗ-1 (гранула № 13)	5,03	0,46	7,08	400...800	0,0351
БЦЗ-1 (гранула № 14)	4,25	0,86	0,40	500...900	0,0131
Средние значения	–	0,52	4,87	–	–
Коэффициент вариации	–	29%	46%	–	–
Клинкер АО «Осколцемент» (СОЦЗ), охлаждение					
СОЦЗ-1 (гранула № 15)	4,0	1,17	2,69	300...700	0,0023
СОЦЗ-1 (гранула № 15)	4,0	0,40	8,07	200...850	0,0139
СОЦЗ-2 (гранула № 16)	3,8	0,34	4,23	300...900	0,0068
СОЦЗ-2 (гранула № 16)	3,8	0,16	6,64	300...900	0,0098
Средние значения	–	0,52	5,40	–	–
Коэффициент вариации	–	63%	32%	–	–

1	2	3	4	5	6
Лабораторный клинкер (Л), охлаждение					
Л-1 (гранула № 17)	2,6	0,35	0,73	300...500	0,0018
Л-1 (гранула № 17)	2,6	0,23	1,76	300...420	0,0027
Л-1 (гранула № 18)	4,14	0,76	3,42	400...670	0,0066
Л-1 (гранула № 19)	3,6	-0,05	6,99	350...900	0,0375
Л-1 (гранула № 19)	3,6	0,47	7,20	430...750	0,0185
Л-1 (гранула № 20)	3,2	0,05	7,88	300...800	0,0184
Л-1 (гранула № 21)	3,76	0,17	5,30	400...900	0,0065
Л-1 (гранула № 22)	2,98	0,18	7,91	390...450	0,0056
Л-2 (гранула № 23)	2,6	0,81	5,57	300...500	0,1228
Л-2 (гранула № 23)	2,6	0,77	1,07	250...550	0,0422
Л-2 (гранула № 24)	2,9	0,27	1,49	350...550	0,0092
Л-2 (гранула № 24)	2,9	0,27	1,43	300...700	0,0044
Л-3 (гранула № 25)	3,0	0,34	3,97	400...550	0,0059
Средние значения	–	0,36	4,21	–	–
Коэффициент вариации	–	60%	57%	–	–

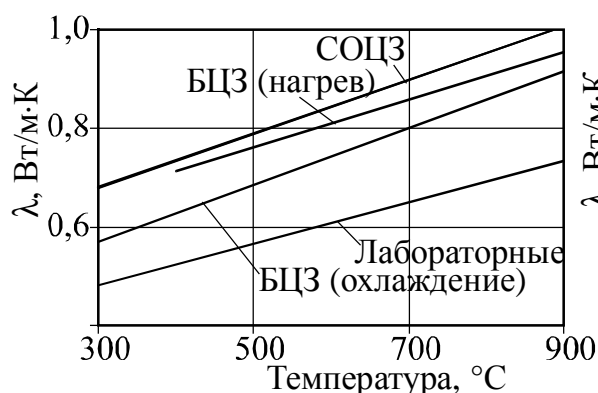


Рис. 8.11. Средняя теплопроводность клинкерных гранул

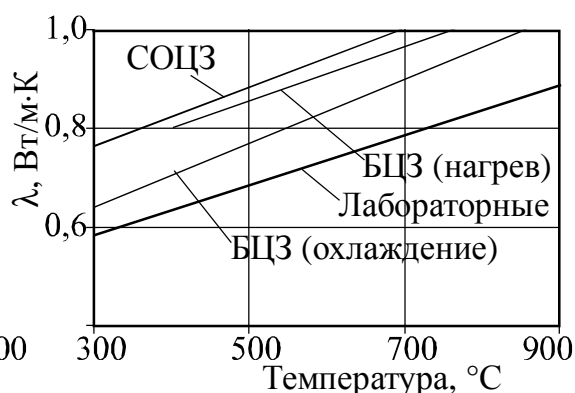


Рис. 8.12. Средняя расчетная теплопроводность идеально плотного клинкера

Для всех гранул наблюдается рост коэффициента теплопроводности с увеличением температуры. Теплопроводность гранул СОЦЗ выше, чем БЦЗ, а лабораторных ниже, чем заводских. Это связано с различной пористостью гранул. Анализ полученных зависимостей приведен в табл. 8.5.

**Теплопроводность клинкерных гранул
в интервале температур 300...900°С, Вт/м·К**

Наименование гранул	Диапазон изменения, Вт/м·К	Среднее значение λ_c , Вт/м·К	Изменение λ при увеличении температуры на 100°С ($100a_1$), Вт/м·К	$\frac{a_1}{\lambda_c}$ 100%	Корреляция между коэффициентами a_0 и a_1
БЦЗ	0,6...0,95	0,80	0,053	6,6	-0,56
СОЦЗ	0,7...1,0	0,84	0,054	6,4	-0,72
Лабораторные	0,5...0,75	0,60	0,042	7,0	-0,33

Для исследуемых гранул выявлена зависимость роста коэффициента теплопроводности на 0,04...0,05 Вт/м·К при росте температуры на 100 °С. Несмотря на различие в абсолютных значениях коэффициента теплопроводности, отношение коэффициента a_1 к среднему значению коэффициента теплопроводности для исследованных гранул одинаково. Следовательно, у исследованных гранул наблюдается одинаковый относительный рост коэффициента теплопроводности при увеличении температуры.

Между коэффициентами a_0 и a_1 имеется обратная корреляция. Это можно объяснить погрешностью эксперимента, которая вызывает поворот регрессионной прямой с центром вращения в середине диапазона температур, при которых определялся коэффициент теплопроводности. Но усреднение коэффициентов регрессионного уравнения позволяет избавиться от этой погрешности. Так, несмотря на довольно большой разброс в коэффициентах для гранул одного вида, средние значения коэффициентов близки между собой.

Лабораторные гранулы имели разный коэффициент насыщения. Их средний коэффициент теплопроводности при средней температуре экспериментов (500°С) составил:

Л-3 (КН=0,88, 1 эксперимент) 0,53 Вт/м·К;

Л-1 (КН=0,9, 5 гранул, 8 экспериментов) 0,53 Вт/м·К;

Л-2 (КН=0,92, 2 гранулы, 4 эксперимента) 0,65 Вт/м·К.

Так как для клинкера Л–3 исследована всего одна гранула, результаты для нее не являются статистически достоверными. На основании результатов, полученных для клинкера Л–1 и Л–2 можно сделать вывод, что при увеличении коэффициента насыщения коэффициент теплопроводности клинкера растет.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что разработанные алгоритм расчета коэффициента теплопроводности и программное обеспечение позволяют с высокой степенью точности при условии достаточного количества дублирования экспериментов определять коэффициент теплопроводности гранулированного материала при температурах до 1000°С.

9. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ОБЖИГА

9.1. ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ В УСТАНОВКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ*

Стационарные методы исследования теплопроводности в настоящее время разработаны наиболее полно. Их недостаток – низкие рабочие температуры и значительное время проведения эксперимента [181].

Измерение теплопроводности слоя сыпучего материала проводилось в установке цилиндрического слоя (рис. 9.1). К достоинствам установки можно отнести простоту конструкции, отсутствие охранных нагревателей и вследствие этого небольшое время проведения эксперимента. Недостатками являются большие размеры, значительное количество материала для исследования (около 1,5 кг), необходимость точной центровки осевого нагревателя.

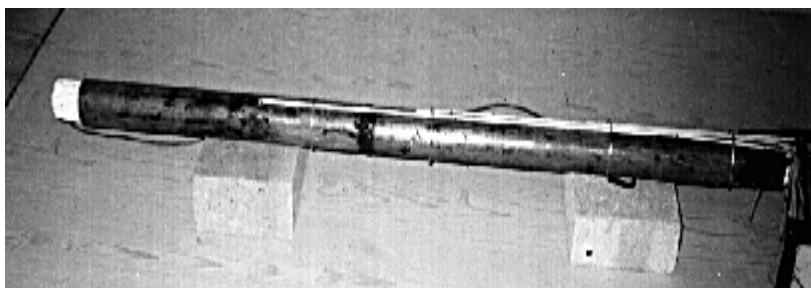


Рис. 9.1. Экспериментальная установка измерения теплопроводности материала методом цилиндрического слоя

Установка состоит (рис. 9.2) из двух труб, изготовленных из нержавеющей стали, длиной 1100 мм и диаметром 48×2 и 25×2 мм, помещенных одна в другую. Внутри трубы меньшего диаметра находится электрический нагреватель мощностью 1 кВт, подключаемый через автотрансформатор.

Для исключения утечки тепла торцы установки изолируют. В трубу большего диаметра для фиксации внутренней трубы на

* Работа выполнена совместно с инженером А. С. Ивановым

расстоянии 50 мм от края вварено кольцо, отверстие в котором соответствует диаметру фаски, нарезанной на конце внутренней трубы. Фиксация второго конца внутренней трубы осуществляется теплоизолирующей вставкой, имеющей вид цилиндрической пробки с выемкой для вставки трубы. Также внутри этой вставки проделано отверстие для вывода проводов нагревателя и холодных концов внутренних термопар.

Исследуемый материал засыпается в межтрубное пространство. Разность температур на внутреннем и внешнем слоях материала фиксируется шестью термопарами типа «ХК», помещенными в центре установки и на расстоянии 1/4 от ее торцов. Холодные концы трех термопар внешней и внутренней трубы соединяются последовательно, к свободным концам двух полученных батарейных термопар подсоединяются электронные мультиметры.

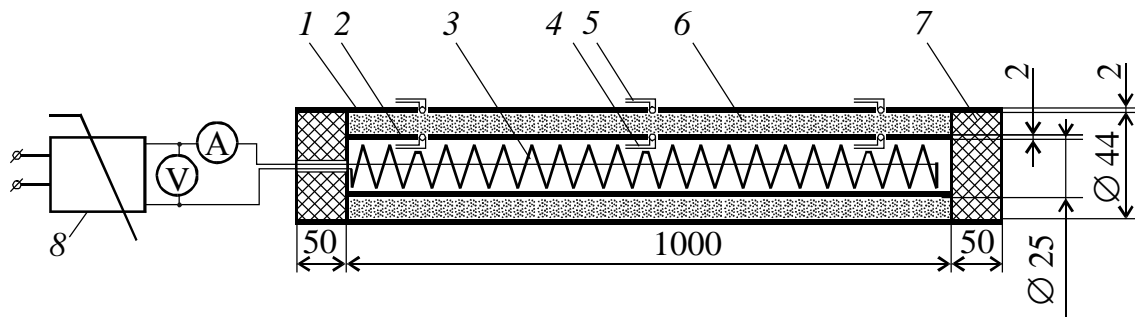


Рис. 9.2. Схема экспериментальной установки:

1 – внешняя труба; 2 – внутренняя труба; 3 – нагреватель; 4 – термопары внутреннего слоя ($T_{\text{внутр}}$); 5 – термопары внешнего слоя ($T_{\text{внеш}}$); 6 – исследуемый материал; 7 – тепловая изоляция; 8 – автотрансформатор

Коэффициент теплопроводности определялся по градиенту температуры в материале и мощности теплового потока:

$$\lambda = \frac{U J \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2\pi l (t_{\text{внутр}} - t_{\text{внешн}})}, \quad (9.1)$$

где U , J – напряжение и сила тока, потребляемого нагревателем; D , d – внешний и внутренний радиус слоя материала; $t_{\text{внутр}}$, $t_{\text{внешн}}$ – средняя температура внутреннего и внешнего слоя материала, определенная батарейной термопарой.

В установке исследовались клинкер Белгородского (БЦЗ) и Себряковского (СЦЗ) цементных заводов, отобранный на БЦЗ материал после цепей, и декарбонизированная в лабораторных условиях сырьевая смесь БЦЗ (табл. 9.1). Все клинкеры имели стандартный фазовый состав без свободного оксида кальция и продуктов гидратации. Материал после цепей собой представлял сухое сырье с грануляцией 1...3 мм. Декарбонизированная сырьевая смесь БЦЗ имел в своем составе фазы CaCO_3 , CaO , C_2F , C_3A , C_2S , CS , $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Таблица 9.1

Состав исследуемых материалов

Материал	Химический состав					Фазовый состав				Характеристики		
	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	ППП	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	КН	<i>n</i>	<i>p</i>
Клинкер БЦЗ	66,55	4,34	4,43	22,9	–	61,39	19,36	4,01	13,48	0,9	2,61	1,41
Клинкер СЦЗ	67,43	5,34	5,19	22,03	–	63,92	15,46	5,15	15,46	0,92	2,10	1,00
Материал за цепями	43,99	2,89	2,65	15,18	35,28	–	–	–	–	0,9	2,61	1,41
Декарбонизированный материал	66,55	4,34	4,43	22,9	–	–	–	–	–	0,9	2,61	1,41

Таким образом, для исследования были отобраны материалы, наиболее характерные для процесса обжига.

В установке исследовался слой пористого материала, частицы которого, в свою очередь, имеют внутренние поры. Поэтому различалась пористость слоя $p_{\text{сл}}$, пористость материала $p_{\text{м}}$ и общая пористость p , являющаяся суммой двух предыдущих значений.

Одной из целей исследования являлось определение зависимости теплопроводности материалов цементной технологии от пористости. Так, согласно работам [153, 194], теплопроводность веществ обратно пропорциональна их пористости. Но в работе [173] указывается, что теплопроводность материала частиц не оказывает существенного влияния на теплопроводность засыпок.

В результате проведенных экспериментов получены значения коэффициентов теплопроводности сыпучих материалов при различной пористости слоя, достигаемой разной степенью измельчения материала (табл. 9.2, рис. 9.3).

Таблица 9.2

Теплопроводность материалов

Материал	Пористость, %		Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К
	суммарная p	слоя $p_{сл}$		
Клинкер БЦЗ	50	40	420	0,47
	40	30	420	0,56
	29	19	420	0,68
Клинкер СЦЗ	45	35	430	0,42
	39	29	430	0,47
Материал за цепями БЦЗ	38	–	480	0,25
	31	–	480	0,27
Декарбонизированная сырьевая смесь БЦЗ	61	–	490	0,23

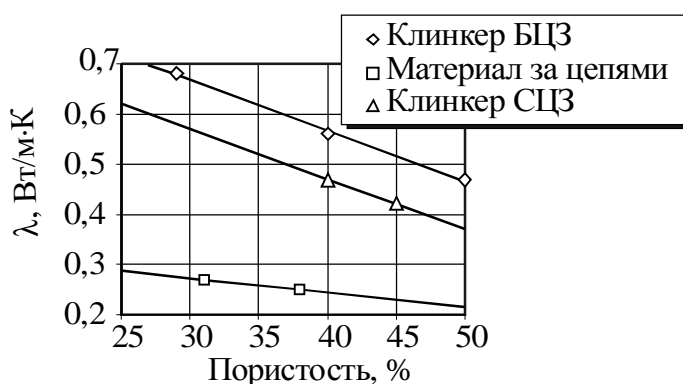


Рис. 9.3. Зависимость теплопроводности от суммарной пористости

Линейную зависимость между пористостью p , %, и коэффициентом теплопроводности пористого материала $\lambda_{п}$, Вт/м·К, представим в виде

$$\lambda_{п} = \lambda_0 + b \cdot p, \quad (9.2)$$

где λ_0 – прогнозируемый коэффициент теплопроводности материала с нулевой пористостью, Вт/м·К; b – коэффициент интенсивности роста коэффициента теплопроводности.

Коэффициенты этой зависимости, полученные в результате обработки экспериментальных данных, представлены в табл. 9.3. Коэффициент b в полученном уравнении (9.2) обладает высокой степенью корреляции со значением λ_0 . Отношение b/λ_0 можно принять постоянным (табл. 9.4).

Таблица 9.3

Зависимость коэффициента теплопроводности от пористости		
Материал	Зависимость $\lambda=f(p)$, Вт/м К	
	для суммарной пористости (слоя и материала)	для пористости слоя
Клинкер БЦЗ	$0,967 - 1,002 \cdot 10^{-2} p$	$0,867 - 1,002 \cdot 10^{-2} p_{сл}$
Клинкер СЦЗ	$0,870 - 1,001 \cdot 10^{-2} p$	$0,770 - 1,001 \cdot 10^{-2} p_{сл}$
Материал за цепями	$0,359 - 0,286 \cdot 10^{-2} p$	–

Таблица 9.4

Зависимость теплопроводности от пористости					
Материал	Коэффициенты уравнения (9.2)				
	λ_0		b	b/λ_0	
	для суммарной пористости	для пористости слоя		для суммарной пористости	для пористости слоя
Клинкер БЦЗ	0,967	0,867	-1,002	-1,04	-1,15
Клинкер СЦЗ	0,870	0,770	-1,001	-1,15	-1,30
Материал за цепями	0,359	–	-0,286	-0,80	–
Среднее значение	0,632	0,82	-0,763	-1,00	1,23
Вариация, %	30	6	41	13	6

Поэтому зависимость (9.2) можно представить в виде

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_{п}}{1 - 0,01 \cdot p} \quad (9.3)$$

Это подтверждает, что материалы цементной технологии и за- сыпки из них подчиняются линейной зависимости теплопроводности от пористости.

9.2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА В УСТАНОВКЕ ПЛОСКОГО СЛОЯ*

Измерение теплопроводности клинкера производилось методом стационарного потока в установке плоского слоя, описанной в разд. 7.3. Образцы исследуемого клинкера были взяты на АО «Осколцемент» и получены в лабораторных условиях. Состав клинкера приведен в табл. 9.5, его характеристики – в табл. 9.6.

Таблица 9.5

Состав исследуемого клинкера

Наименование	Химический состав, мас. %				Модульные характеристики			Минералогический состав, мас. %			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	КН	<i>n</i>	<i>p</i>	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Клинкер АО «Осколцемент»											
ССПЦ500 Д20	22,41	4,50	4,59	65,71	0,91	2,43	0,98	62,0	28,0	4,2	14,0
Дорожный	21,00	5,88	5,68	64,89	0,90	1,82	1,04	57,0	17,2	6,0	17,3
ССПЦ400Д20	22,99	4,23	4,49	65,35	0,88	2,60	0,94	58,0	21,0	3,6	14,0
Клинкер лабораторный											
КН = 0,9	22,89	5,02	4,5	66,28	0,90	1,08	2,5	55,7	23,6	5,7	13,7
КН = 0,7	25,78	5,22	4,02	60,56	0,70	2,78	1,3	9,8	66,5	7,0	12,2

Таблица 9.6

Характеристики исследуемого клинкера

Материал	Кажущаяся плотность ρ , кг/см ³	Истинная плотность ρ_0 , кг/м ³	Пористость, %
Клинкер ССПЦ500 Д20	2 354	3 142	25,1
Клинкер дорожный СЦЗ	2 492	3 122	20,2
Клинкер ССПЦ400Д20	2 377	3 135	24,2
Клинкер КН = 0,9	2 414	3 135	23,0
Клинкер КН = 0,7	2 307	3 194	27,8

Для исследования клинкер измельчался, при загрузке материалов в установку он прессовался. Измерения проводились

* Работа выполнена совместно с инженерами А. А. Петровым и Ю. К. Хутяевым.

при разной мощности нагревателя, что позволило получить теплопроводность в интервале температур 150...350°C. Результаты исследований приведены в табл. 9.7 и на рис. 9.4, 9.5.

Таблица 9.7

Теплопроводность засыпки из цементного клинкера

№	Наименование	Количество точек	Коэффициенты регрессионного уравнения $\lambda = a_0 + a_1 t$		Диапазон температур, °С		Среднее квадратичное отклонение
			a_0	$a_1 \cdot 10^4$			
Клинкер АО «Осколцемент»							
1.	ССПЦ500 Д20	5	0,01	31,38	200	270	0,066
2.	Дорожный	9	0,41	16,77	160	310	0,026
3.	ССПЦ400Д20	4	0,26	14,76	220	280	0,020
Клинкер лабораторный							
4.	КН = 0,85	9	0,14	24,86	240	350	0,041
5.	КН = 0,70	9	0,14	24,86	160	270	0,051
6.	Средние значения	–	0,19	22,5	–	–	–

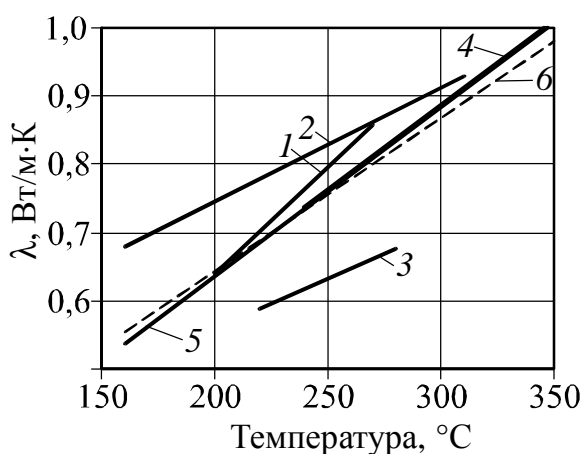


Рис. 9.4. Теплопроводность засыпки из измельченного цементного клинкера
(номера соответствуют табл. 9.7)

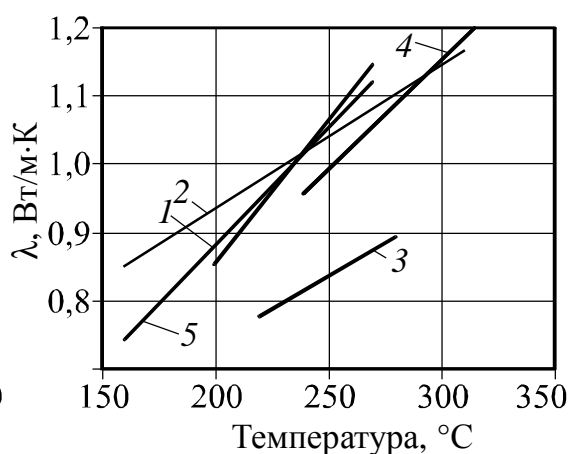


Рис. 9.5. Теплопроводность цементного клинкера при нулевой пористости
(номера соответствуют табл. 9.7)

Так же, как и в опытах с гранулами, теплопроводность клинкера при увеличении температуры возрастает, но со значительно более высокой интенсивностью. Это можно объяснить малым температурным интервалом, в котором получены результаты, и следовательно, большой погрешностью в определении коэффициента a_1 . Поэтому из результатов экспериментов статистической достоверностью обладают и в дальнейшем могут быть использованы только средние значения коэффициента теплопроводности (табл. 9.8).

Таблица 9.8

Средняя теплопроводность цементного клинкера

№	Наименование	Средняя температура, °С	Средний коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	
			Пористый материал (эксперимент)	Идеально плотный материал (расчет)
Клинкер АО «Осколцемент»				
1.	ССПЦ500 Д20	270	0,77	1,03
2.	Дорожный	250	0,82	1,03
3.	ССПЦ400Д20	330	0,64	0,84
Клинкер лабораторный				
4.	КН = 0,85	290	0,71	0,92
5.	КН = 0,70	210	0,66	0,91

По результатам экспериментов можно оценить зависимость теплопроводности от состава клинкера (табл. 9.9). Зависимость наблюдается только от количества промежуточной фазы клинкера, которую характеризуют сумма минералов $C_3A + C_4AF$ и оксиды Al_2O_3 и Fe_2O_3 . Такие же выводы были сделаны и в подразд. 7.6 на основании предложенной методики расчета коэффициента теплопроводности.

Коэффициент корреляции между теплопроводностью и составом

Характеристики состава	Коэффициенты регрессионного уравнения		Коэффициент теплопроводности при 200°С
	a_0	a_1	
КН	0,13	-0,09	0,11
n	-0,17	-0,01	-0,38
p	-0,22	0,24	0,00
C_3S	0,13	-0,13	0,02
C_2S	-0,38	0,36	-0,13
C_3A	0,15	0,12	0,57
C_4AF	0,74	-0,47	0,69
C_3A+C_4AF	0,71	-0,32	0,94
SiO_2	-0,45	0,27	-0,46
Al_2O_3	0,56	-0,17	0,91
Fe_2O_3	0,72	-0,42	0,75
CaO	0,03	-0,05	-0,05

В заключение необходимо отметить, что полученные результаты подтверждают адекватность предложенной методики расчета коэффициента теплопроводности и позволяют судить о теплопроводности цементного клинкера при низких температурах.

9.3. ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ОБЖИГА

Для обобщения приведенных в главе результатов, полученных с использованием теоретической модели теплопроводности, экспериментальных результатов исследования теплопроводности клинкерных гранул, материалов в установках плоского и цилиндрического слоев рассчитана теплопроводность материалов при одинаковой пористости (табл. 9.10). Из табл. 9.10 видна повторяемость результатов при исследовании теплопроводности различными методами, лежащая в пределах стандартной ошибки теплотехнических измерений 20%.

Сравнение теплопроводности материалов цементной технологии

Исследуемый материал	Источник данных ¹⁾	Пористость исследуемого материала	Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К		
				слоя (засыпки)	пористого материала, гранулы	плотного материала ($p = 0\%$)
Клинкер:						
средний состав	М	–	1000	–	–	1...1,4
СОЦЗ	Г	10,6	1000	–	1,1	1,23 ²⁾
БЦЗ	Г	11	1000	–	1,0	1,12 ²⁾
лабораторный	Г	17,1	1000	–	0,78	0,94 ²⁾
Клинкер:						
средний состав	М	–	400	–	–	0,8...1,2
СОЦЗ	Г	10,6	400	–	0,74	0,83 ²⁾
СОЦЗ	УПС	20...25	250...330	0,64...0,82	–	0,84...1,03 ²⁾
СЦЗ	УЦС	39...45	420	0,42...0,47	0,78 ³⁾	0,87 ⁴⁾
БЦЗ	Г	11	400	–	0,67	0,75 ²⁾
БЦЗ	УЦС	29...50	420	0,47...0,68	0,87 ³⁾	0,97 ⁴⁾
лабораторный	Г	17,1	400	–	0,53	0,64 ²⁾
лабораторный	УПС	23...28	210...290	0,66...0,71	–	0,91...0,92
Материал декарбонизированный:						
средний состав	М	–	400	–	–	0,70
БЦЗ	УЦС	61	420	0,23	0,53 ²⁾	0,59 ²⁾
Материал за цепями:						
средний состав	М	–	500	–	–	0,85
БЦЗ	УЦС	31...38	480	0,25...0,27	0,53 ³⁾	0,59 ⁴⁾
Сухая сырьевая смесь:						
средний состав	М	–	200	–	–	1,1...1,2
лабораторные	УПС	25	200	0,8...0,9	–	1,1...1,2

¹⁾ М – методика расчета теплопроводности (подразд. 7.6); Г – исследование процесса охлаждения и нагрева гранул (подразд. 8.3); УПС – измерение теплопроводности в установке плоского слоя (подразд. 7.3, 9.2); УЦС – измерение теплопроводности в установке цилиндрического слоя (подразд. 9.1).

²⁾ Рассчитано по зависимости $\lambda_o = \lambda_n / (1 - 0,01p)$.

³⁾ Рассчитано по данным табл. 9.3 при пористости 10%.

⁴⁾ Рассчитано по данным табл. 9.3 при пористости 0%.

В результате экспериментов с гранулами установлена зависимость теплопроводности клинкера от температуры при высоких температурах. В установке цилиндрического слоя получена теплопроводность материалов различного состава и пористости. В установке плоского слоя определена теплопроводность клинкера при низких температурах и теплопроводность сырьевых компонентов и их смесей. По экспериментальным данным можно оценить среднюю теплопроводность материала, обрабатываемого в процессе получения клинкера (рис. 9.6). Необходимо заметить что зависимость, представленная рис. 9.6, совпадает с результатами расчета по модели теплопроводности многокомпонентного материала (см. табл. 7.12).

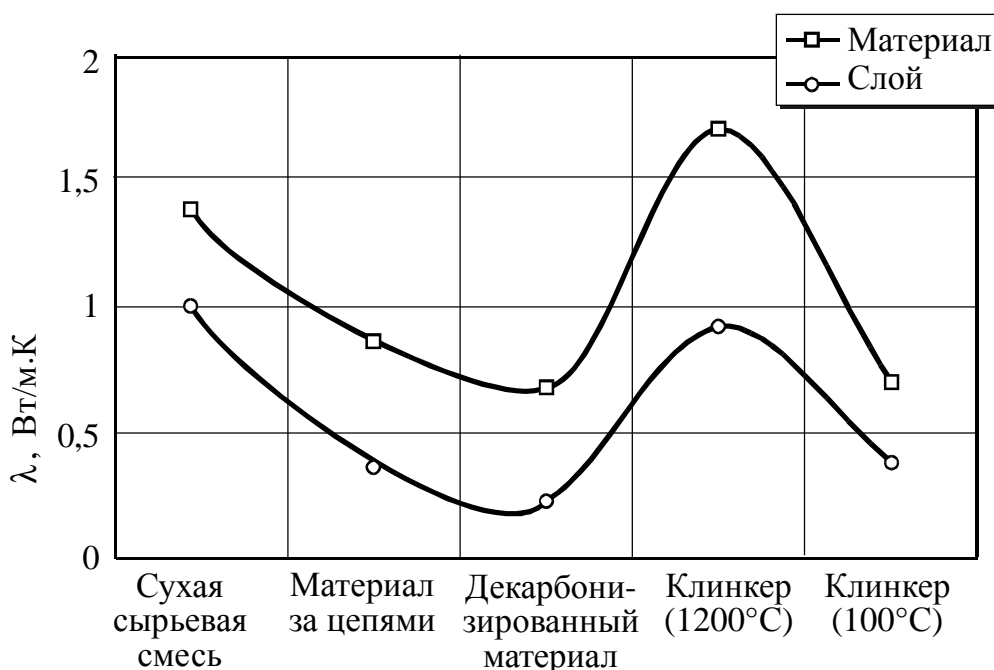


Рис. 9.6. Изменение теплопроводности материала при обжиге (средние значения экспериментальных данных)

Таким образом, в результате разработаны методы и экспериментальная база исследования материалов цементной технологии, получены значения коэффициентов теплопроводности слоя обжигаемого в печи материала и клинкера при различной пористости, установлена зависимость теплопроводности слоя от его пористости, зависимость коэффициента теплопроводности от ха-

ра характеристик материалов, спрогнозированы коэффициенты теплопроводности идеально плотного материала. Эти данные служат основой для расчета коэффициента теплопроводности материала, обжигаемого в цементной печи, на различных стадиях его обработки.

Часть III

**МЕТОДЫ
И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СРЕДСТВА
РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
СМЕСЕЙ И СИСТЕМ**



10. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ И КЛИНКЕРА

10.1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Состав сырьевой смеси существенно влияет на качество получаемого клинкера и протекающие в печи процессы – расход топлива на обжиг, спекание, образование и стойкость обмазки. Цементные материалы могут характеризоваться химическим и минералогическим составами и модульными характеристиками.

Сырьевые компоненты и клинкер содержат различные, несовпадающие соединения. Поэтому для характеристики цементных материалов используют химический состав – процентное массовое содержание элементов в пересчете на их оксиды.

Химический состав – условное обозначение, так как он не является истинным составом материалов. Связь минерального и химического состава сырьевой смеси и клинкера представлена на рис. 10.1.

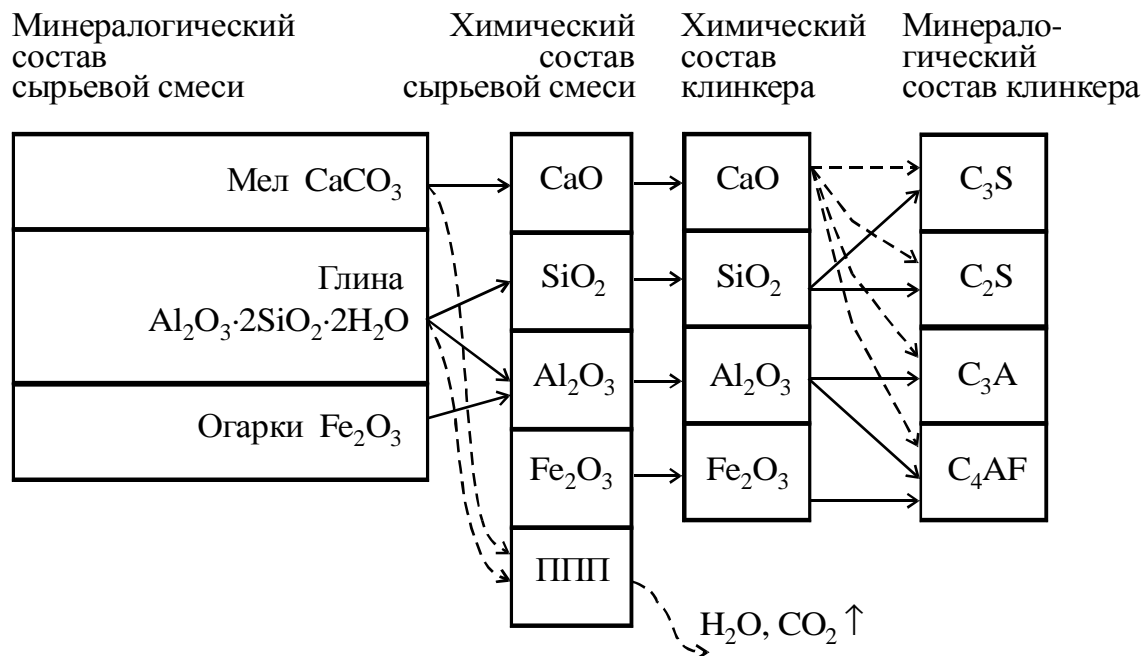


Рис. 10.1. Связь между составами сырьевой смеси и клинкера

В химический состав входят:

1) четыре основных оксида, необходимых для образования минералов, – CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, кратко обозначаемые как С, S, А, F;

2) примеси, присутствующие в сырье и клинкере в незначительном количестве, – MgO, SO₃, Na₂O, R₂O и др.;

3) потери при прокаливании ППП, показывающие часть массы, теряемой при термическом разложении сырья (обычно в ППП входят технологический СО₂, выделяющийся при разложении карбонатов, и гидратная Н₂О, выделяющаяся при разложении глинистых минералов).

В табл. 10.1 приведены химические и минералогические составы сырьевой смеси и клинкера.

Таблица 10.1

Примерный состав сырьевой смеси и клинкера (КН = 0,9; n = 2; p = 1,2)

Сырьевая смесь				Клинкер			
Соединение	Содержание, кг	Химический состав	%	Химический состав	%	Минералогический состав	%
CaCO ₃	119,6 (77,3%)	CaO (C _c)	43,3	CaO (C)	67	C ₃ S	58,34
AS ₂ H ₂	15,2 (9,9%)	SiO ₂ (S _c)	14,2	SiO ₂ (S)	22	C ₂ S	19,00
SiO ₂	14,9 (9,6%)	Al ₂ O ₃ (A _c)	3,9	Al ₂ O ₃ (A)	6	C ₃ A	7,50
Fe ₂ O ₃	5,0 (3,2%)	Fe ₂ O ₃ (F _c)	3,2	Fe ₂ O ₃ (F)	5	C ₄ AF	15,22
		ППП	35,4				
<i>Всего</i>	154,7 (100)	<i>Всего</i>	100	<i>Всего</i>	100	<i>Всего</i>	100

Примечание. Из сырьевой смеси выделяется 52,6 кг СО₂ и 2,12 кг Н₂О.

Сырьевые компоненты и сырьевая смесь характеризуются титром – количеством карбонатов в сырье, пересчитанном на карбонат кальция. Титр мела близок к 100%, титр сырьевой смеси составляет 75...80%. Титр Т может быть выражен через массовое процентное содержание в сырьевой смеси оксидов СаО_к и MgO_к, связанных в карбонаты:

$$T = 1,785(CaO_k + 1,391MgO_k). \quad (10.1)$$

По титру может быть определена масса технологического CO_2 , выделяющегося из сырья:

$$\text{CO}_2 = \frac{0,44T}{100}, \text{ кг/кг сырьевой смеси.} \quad (10.2)$$

В зарубежных странах вместо титра используется расчетное содержание в сырьевой смеси CaCO_3 , выражаемое через титр с вычетом содержания карбоната магния, определяемого по процентному содержанию в сырьевой смеси оксида магния M_c . В работе [195] расчетное содержание CaCO_3 определяется по выражению

$$(\text{CaCO}_3)_{\text{расч}} = 1,66791(\text{CaO} - 1,48863 \text{ MgO}), \quad (10.3)$$

или оно может быть рассчитано по выражению

$$(\text{CaCO}_3)_{\text{расч}} = T - 2,483 \text{ MgO.} \quad (10.4)$$

10.2. МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Модульными характеристиками называют соотношения между оксидами клинкера. В отличие от оксидов, процентное содержание которых в сырьевой смеси и клинкере различается, модульные характеристики сырьевой смеси и бесприсадочного клинкера одинаковы. При наличии присадки это различие незначительно и обычно равно фиксированной величине. Использование модулей, учитывающих несколько оксидов и, как правило, описывающих какое-нибудь свойство клинкера, позволяет применять при описании состава и технологическом расчете сырьевой смеси меньшее количество характеристик.

Важнейшими из модульных характеристик являются коэффициент насыщения известью $KН$, кремнеземный модуль n и глиноземный модуль p . Некоторые авторы, в частности Я. Е. Гельфанд [196], относят к модульным характеристикам только n и p , но большинство из них [27, 197, 198] понимают под модульными характеристиками (или модулями) безразмерные соотношения

между оксидами и минералами, характеризующие свойства клинкера или сырьевой смеси. За рубежом вместо коэффициента насыщения используются другие показатели основности – коэффициент насыщения по Кинду, коэффициент основности, гидравлический модуль и др. Кроме КН, n и p , используется ряд других характеристик, описывающих отдельные свойства сырьевой смеси и клинкера. Модульные характеристики клинкера и сырьевых смесей представлены в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Модульные характеристики клинкера

Наименование	Обозначение	Формула для расчета	Пределы изменения	Примечания
1	2	3	4	5
Коэффициент насыщения известью [27, 77]	КН	$\frac{C - 1,65A - 0,35F}{2,8S}$ $p \geq 0,64;$ $\frac{C - 1,1A - 0,702F}{2,8S}$ $p < 0,64$	0,8...0,95 –	Предполагается, что насыщение извести обусловлено неполным связыванием оксида кальция кремнеземом
Коэффициент насыщения [27, 96, 199]: а) по В. Кинду	$KSG,$ CH	$\frac{100C}{2,8S + 1,65A + 0,35F}$ $p \geq 0,64;$ $\frac{100C}{2,8S + 1,1A + 0,7F}$ $p < 0,64;$	90...98 –	Предполагается, что полное связывание происходит при полном связывании кремнезема в C_3S , а оксида железа и глинозема – в минералы-плавни. Применяется в США, Калькстандарте Германии
б) с учетом содержания оксидов магния и серы		$\frac{100(C+aMgO-0,7SO_3)}{2,8S+1,65A+0,35F}$ $a = 0,75 \text{ при } MgO < 2,$ $a = 1,50 \text{ при } MgO \geq 2$	–	

1	2	3	4	5
Степень насыщения известью [200]: а) с уточнениями Ф. Ли и Т. Паркера (по результатам исследования системы С-S-A-F-M) б) с учетом содержания MgO	<i>KSt</i>	$\frac{100C}{2,8S + 1,1A + 0,7F}$ $\frac{100C}{2,8S + 1,18A + 0,65F}$ $\frac{100(C + aMgO)}{2,8S + 1,18A + 0,65F}$	90...98	Отношение фактического содержания извести к стандартному насыщению с учетом быстрого производственного охлаждения, когда алюминат не успевает связать необходимое количество извести
Коэффициент связывания известью [200]	<i>LSF</i>	$\frac{C - 0,7SO_3}{2,8S + 1,2A + 0,65F}$	0,66 ...1,2	Определяет допустимое содержание извести в цементе. Применяется в Великобритании
Коэффициент насыщения кремнеземом [197]	<i>KK</i>	$\frac{C - 0,65A - 0,35F - 1,87S}{0,93S}$	–	Используется в Китае
Коэффициент основности [50]	<i>K_{осн}</i>	$\frac{1}{0,93S} \left(C + 0,93MgO - [1,65(A - 0,6RO_2) + 0,35F + 0,7SO_3] \right)$	>2 (для шламов)	Характеризует гидравлическую активность шламов и шлаков, подвергающихся нагреванию свыше 1200°C
Гидравлический модуль [201] Гидравлический модуль Михаэlsa [27, 202]	<i>m</i> , <i>HM</i> , <i>M</i> <i>HR</i>	$\frac{C}{A + S}$ $\frac{C}{A + S + F}$	– 1,7...2,4	Не отражает соотношения между кислотными оксидами. При <i>HR</i> <1,7 цементы непрочны, при <i>HR</i> >2,3 – не обладают постоянством объема

1	2	3	4	5
Кремнеземный (силикатный) модуль [27]	n, SM	$\frac{S}{A + F}$	1,7...3,5	Характеризует отношение минералов и промежуточного вещества в клинкере
Глиноземный модуль [27]	p, TM	$\frac{A}{F}$	1...2,5	Характеризует состав и вязкость жидкой фазы при обжиге клинкера
Силикатный модуль по Г. Кюлю [27]	M_S	$\frac{C_3S + C_2S}{C_4AF + (C_3A, C_2F)}$	–	При возрастании увеличивается прочность и стойкость цемента к химическим и атмосферным воздействиям
Коэффициент насыщения глиноземом [197]	КГ	$\frac{A - 0,638F}{A}$	–	Используется в Китае
Критерий прилипания материала к футеровке печи Ф. Мустунга [27, 203]	KM	$\frac{S}{A}$	3...3,5 [203]; 2,5...3,5 при p от 1,8 до 2,3 [27]	При $KM = 4$ обмазка возникает с трудом, при $KM = 2,5$ появляется угроза зашлакивания печи. Также имеет названия кремнеземный модуль, мергелистый модуль
Критерий склонности расплава к расслоению [198]	–	$\frac{MgO}{SO_3 + K_2O}$	–	–
Индекс обжигаемости [72, 96, 201]	ИО	$\frac{C_3S}{C_3A + C_4AF}$	2...3	Отношение трудно-спекающегося трех-кальцевого силиката к количеству плавней. Не учитывает влияние вязкости на процесс спекания

1	2	3	4	5
Модуль спекаемости по И. Ирку [72]	–	$n \times p$	4...6	При $n \cdot p > 6$ клинкер трудно обжигается, при $n \cdot p < 4$ материал склонен к образованию сваров. Модуль учитывает компенсацию недостатка жидкой фазы понижением вязкости
Коэффициент спекаемости [72, 96]	B	$\frac{C - (1,87S + 1,65A + 0,35F)}{3A + 2,25F}$	0,5...0,6	Отношение основности материалов к жидкой фазе. При уменьшении B образуются кольца и свары, при увеличении – спекаемость ухудшается
Модуль жидкой фазы [197]	R	$\frac{2,65A + 1,35F}{C + S + A + F}$	–	Используется в Китае
Модуль вязкости [197]	η	$\frac{A}{A + F}$	–	Используется в Китае
Модуль твердения [27]	M_E	$\frac{C_3S}{C_2S}$	–	При возрастании увеличивается начальная прочность цемента и теплота гидратации, но уменьшается коррозионная устойчивость
Тепловой (калориметрический) модуль [27]	M_K	$\frac{C_3S + C_3A}{C_2S + C_4AF}$	0,3...1,8	Характеризует теплоту гидратации цемента
Характеристика мергелизации сырья [204, 205]	M	$\frac{[(A+F)C]_{см}}{[(A+F)C]_к}$ Индексы «см» и «к» относятся к сырьевой смеси и карбонатному компоненту соответственно	–	При увеличении M улучшается обжигаемость сырьевой смеси

1	2	3	4	5
Соотношение силикатов и плавней [202]	–	$\frac{C_3S + C_2S}{C_3A + C_4AF}$	3...4,5	Используется для классификации клинкеров
Соотношение минералов-силикатов [202]	–	$\frac{C_3S}{C_2S}, \frac{C_3A}{C_4AF}$	–	Используется для классификации клинкеров

Рядом автором произведено уточнение расчета модульных характеристик в зависимости от химического и фазового состава клинкера. Например, при расчете коэффициента насыщения в докладах V Международного конгресса по химии цемента [206] предлагается учитывать добавки, содержащиеся в большом количестве, в работе [207] – учитывать щелочи, находящиеся в виде твердого раствора в алите и белите, основность алюмоферритов и тонкость помола сырья.

Согласно работе [208], в практических случаях точность определения модульных характеристик составляет: $\pm 0,02$ – для коэффициента насыщения; $\pm 0,1$ – для кремнеземного и глиноземного модулей; $\pm 0,2$ – для оксидов кремния и кальция клинкера; $\pm 0,1$ – для оксидов железа и алюминия клинкера.

Для расчетов клинкеров используются различные характеристики. Так, в России расчет традиционно ведется по КН, n , p , в США – по показателям основности LSF или HR и кремнеземному модулю SR (n) или по минералогическому составу [195].

10.3. МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ

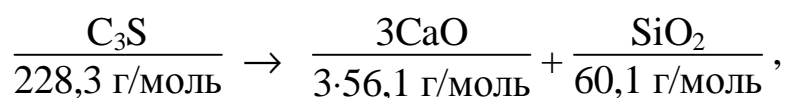
Фазовый состав клинкера включает соединения переменного состава или твердые растворы [27]. Минералогический состав отражает средний состав клинкерных фаз, определенных в ряде исследований.

Методы фазового анализа позволяют установить количественное содержание клинкерных фаз (минералов) лишь приблизительно [202] и поэтому для определения минералогического состава

широко применяется расчетный метод с использованием химического состава клинкера. В этом случае получаемый минералогический состав называется потенциальным.

Традиционные расчетные формулы минералогического состава Р. Богга [209] основаны на предположении, что в клинкере достигается равновесное состояние и состав клинкерных фаз отвечает стехиометрии содержания четырех оксидов.

Для вывода формулы минералогического состава необходимо рассчитать массовые соотношения оксидов, входящих в минералы, к массе минералов [200]. Например, в трехкальциевый силикат C_3S входят оксиды CaO и SiO_2 :



таким образом, 1 кг C_3S содержит $3 \cdot 56,1 / 228,3 = 0,7368$ кг CaO и $60,1 / 228,3 = 0,2632$ кг SiO_2 . Рассчитывая аналогичные соотношения для других минералов, получаем массу оксидов, входящих в минералы:

$$CaO = 0,7368 C_3S + 0,6512 C_2S + 0,6226 C_3A + 0,4616 C_4AF;$$

$$SiO_2 = 0,2632 C_3S + 0,3488 C_2S;$$

$$Al_2O_3 = 0,3774 C_3A + 0,2098 C_4AF;$$

$$Fe_2O_3 = 0,3286 C_4AF.$$

Из уравнений получаем матрицу коэффициентов

$$A = \begin{pmatrix} 0,7368 & 0,6512 & 0,6226 & 0,4616 \\ 0,2632 & 0,3488 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,3774 & 0,2098 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3286 \end{pmatrix}$$

Обращая матрицу, получаем коэффициенты для расчета минералогического состава клинкера

$$B = A^{-1} = \begin{pmatrix} 4,071 & -7,600 & -6,718 & -1,430 \\ -3,071 & 8,600 & 5,068 & 1,079 \\ 0 & 0 & 2,650 & -1,692 \\ 0 & 0 & 0 & 3,043 \end{pmatrix}$$

Таким образом, содержание минералов выражается через содержание оксидов следующим образом:

$$\begin{aligned} C_3S &= 4,071 \text{ CaO} - 7,6 \text{ SiO}_2 - 6,718 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,43 \text{ Fe}_2\text{O}_3; \\ C_2S &= -3,071 \text{ CaO} + 8,6 \text{ SiO}_2 + 5,068 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 1,079 \text{ Fe}_2\text{O}_3; \\ C_3A &= 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,692 \text{ Fe}_2\text{O}_3; \\ C_4AF &= 3,043 \text{ Fe}_2\text{O}_3. \end{aligned} \quad (10.5)$$

В. Кинд модифицировал расчет минералогического состава, выразив содержание силикатов через коэффициент насыщения [197]:

$$C_3S = 3,8 \text{ SiO}_2 (3KH - 2); \quad C_2S = 8,6 \text{ SiO}_2 (1 - KH), \quad (10.6)$$

а также предложил формулы для расчета минералогического состава по KH , n , p [210]:

$$\begin{aligned} C_3S &= \frac{3,8 n (p + 1) (3KH - 2)}{n (p + 1) (2,8KH + 1) + 2,65p + 1,35} 100; \\ C_2S &= \frac{8,6 n (p + 1) (1 - KH)}{n (p + 1) (2,8KH + 1) + 2,65p + 1,35} 100; \\ C_3A &= \frac{2,65p - 1,7}{n (p + 1) (2,8KH + 1) + 2,65p + 1,35} 100; \\ C_4AF &= \frac{3,04}{n (p + 1) (2,8KH + 1) + 2,65p + 1,35} 100. \end{aligned} \quad (10.7)$$

Расчетный состав клинкера отличается от фактического фазового состава. Главной причиной отличия является то, что при кристаллизации в клинкере не достигается состояние равновесия,

а также изменяется состав фаз из-за присутствия примесей и щелочей. В учебном пособии [96] отмечается, что причинами отличия могут быть образование твердых растворов оксидов в клинкерных минералах, химическая неустойчивость алита и трехкальциевого алюмината. Поэтому для повышения точности при расчете необходимо учитывать только связанные CaO , MgO , SiO_2 и учитывать связывание минералообразующих оксидов в щелоче-содержащие минералы.

В докладах V Международного конгресса по химии цемента [206] приведены сводные данные по минералогическому составу клинкеров, определенному различными методами. В работе [211] определено отклонение реального фазового состава от расчетного в присутствии примесей и отмечено значительное уменьшение содержания алита по сравнению с расчетом.

Для уточнения расчета содержания минералов предлагается:

– использовать уравнения, связывающие содержание четырех минералов с содержанием девяти оксидов CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , MgO , TiO_2 , P_2O_5 в клинкере [212, 213];

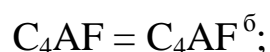
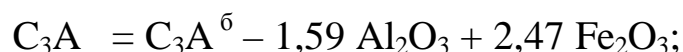
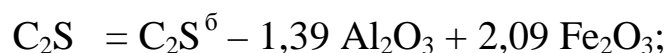
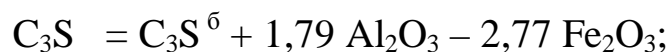
– учитывать алюмосиликаты, при этом расчет дает отклонение не более 1,5...2,0 % [214];

– вести расчет на эквивалентной основе с помощью коэффициентов Нигли, применяемых в геологии [215].

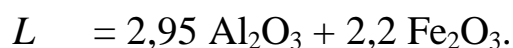
Ли и Паркер предлагают три варианта расчета минералогического состава, соответствующих разным предположениям о составе клинкера [216]:

1) при охлаждении происходит полная кристаллизация согласно расчету Богга, содержание клинкерных минералов в этом случае обозначим как $\text{C}_3\text{S}^{\text{б}}$, $\text{C}_2\text{S}^{\text{б}}$, $\text{C}_3\text{A}^{\text{б}}$, $\text{C}_4\text{AF}^{\text{б}}$;

2) жидкая фаза кристаллизуется самостоятельно:



3) жидкая фаза переходит в стекловидное состояние:



Для учета в расчете примесей необходимо определить порядок образования соединений в клинкере. Если кроме четырех основных оксидов в клинкере присутствуют SO_3 и MgO , минералы образуются в следующем порядке:

1) образуется C_4AF ;

2) из оставшегося Al_2O_3 образуется C_3A , если остался Fe_2O_3 , образуется C_2F ;

3) SO_3 образует $CaSO_4$;

4) оставшийся CaO полностью связывается в силикаты;

5) MgO остается в свободном виде и поэтому в расчете минералогического состава может не участвовать [77].

Исходя из такого порядка, могут быть получены формулы для расчета различных фазовых составов клинкеров (табл. 10.3).

Таблица 10.3

Расчет фазовых составов клинкеров

Минерал	Коэффициенты перед оксидами				
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Система $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF - CaSO_4$					
C_3S	4,071	-7,6	-6,718	-1,43	-2,85
C_2S	-3,071	8,6	5,068	1,079	2,15
C_3A	-	-	2,65	-1,692	-
C_4AF	-	-	-	3,043	-
$CaSO_4$	-	-	-	-	1,7
Система $C_3S - C_2S - C_2F - C_4AF - CaSO_4$ ($p < 0,638$)					
C_3S	4,071	-7,6	-4,48	-2,86	-2,85
C_2S	-3,071	8,6	3,38	2,16	2,15
C_2F	-	-	-2,67	1,7	-
C_4AF	-	-	4,77	-	-
$CaSO_4$	-	-	-	-	1,7

Минерал	Коэффициенты перед оксидами				
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Система CaO – C₃S – C₃A – C₄AF – CaSO₄ (KH > 1)					
CaO	1	– 2,8	– 1,65	– 0,351	– 0,7
C ₃ S	–	3,8	–	–	–
C ₃ A	–	–	2,65	– 1,692	–
C ₄ AF	–	–	–	3,043	–
CaSO ₄	–	–	–	–	1,7
Система CaO – C₃S – C₂F – C₄AF – CaSO₄ (KH > 1, p < 0,638)					
CaO	1	– 2,8	– 1,1	– 0,7	– 0,7
C ₃ S	–	3,8	–	–	–
C ₂ F	–	–	– 2,67	1,7	–
C ₄ AF	–	–	4,77	–	–
CaSO ₄	–	–	–	–	1,7
Система C₂S – CS – C₃A – C₄AF – CaSO₄ (KH < 0,67)					
CS	– 2,071	3,867	3,418	0,728	1,451
C ₂ S	3,071	– 2,867	– 5,068	– 1,079	– 2,151
C ₃ A	–	–	2,65	– 1,692	–
C ₄ AF	–	–	–	3,043	–
CaSO ₄	–	–	–	–	1,7
Система CS – C₂S – C₂F – C₄AF – CaSO₄ (KH < 0,67, p < 0,638)					
CS	– 2,071	3,867	2,279	1,455	1,451
C ₂ S	3,071	– 2,867	– 3,379	– 2,157	– 2,151
C ₂ F	–	–	– 2,666	1,702	–
C ₄ AF	–	–	4,766	–	–
CaSO ₄	–	–	–	–	1,7

Для повышения точности расчета модульных характеристик и минералогического состава клинкера возможно использование величин свободных CaO_{св} и SiO₂св, принимаемых по опыту работы предприятия. При этом в расчете модульных характеристик и минералогического состава используются не содержание оксидов в клинкере CaO и SiO₂, а предполагаемое содержание оксидов, связанных в минералы CaO' и SiO₂':

$$\text{CaO}' = \text{CaO} - \text{CaO}_{\text{св}},$$

$$\text{SiO}_2' = \text{SiO}_2 - \text{SiO}_{2\text{св}}.$$

10.4. ОПТИМАЛЬНЫЙ СОСТАВ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И КЛИНКЕРА

Состав сырьевой смеси оказывает преобладающее влияние на формирование свойств клинкера [72] и процесс обжига (рис. 10.2).

Клинкер необходимого качества может быть получен из сырьевой смеси, характеризующейся значительным разнообразием состава, что позволяет получать смеси, обеспечивающие наиболее благоприятные производственные условия [184]. Чем резче отклоняется один из показателей состава клинкера от оптимального значения, тем меньше возможности для изменения других показателей [184]. Но для составов с резким отклонением одной из переменных существуют условия, обеспечивающие благоприятные режимы технологических процессов.

Оптимальный состав клинкера согласно данным различных авторов представлен в табл. 10.4.

Для оценки сырьевых смесей и клинкера необходимо использовать независимые друг от друга величины. Поэтому представляет интерес корреляция между различными характеристиками клинкера, которая на примере Белгородского цементного завода показана на рис. 10.3.



Рис. 10.2. Влияние состава сырьевой смеси на качество клинкера и процесс обжига

Оптимальный состав портландцементного клинкера

Ис-точ-ник	Модульные характеристики			Минералогический состав, мас. %					
	КН	<i>n</i>	<i>p</i>	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ S+ +C ₂ S	C ₃ A+ +C ₄ AF
[217]	0,85...0,89	1,8...2,4	1,0...1,6	47...55	–	6...10	–	72...78	–
[23]	–	–	–	55	23	11	11	–	22
[218]	–	–	–	50...55	–	8...10	–	–	–
[219]	–	–	–	50...65	–	До 8	–	–	–
[220]	0,9...0,96	2,0...2,4	0,9...1,3	55...65	–	8...12	–	–	–
[221] ¹⁾	0,87...0,92	1,9...2,6	0,9...1,6	48...60	17...31	6...10	10...18	72...80	20...24
[221] ²⁾	0,85...0,93	1,66...2,47	0,86...2,37	42...65	16...33	4...12	8...16	–	–
[222] ²⁾	–	2...2,75	1...1,5	–	–	–	–	–	–
[221] ³⁾	0,88...0,92	1,9...2,6	0,9...1,6	–	–	–	–	–	–
[221] ⁴⁾	1,03...1,07	2,0...2,6	0,9...1,5	–	–	–	–	–	–
[72]	0,87...0,92	1,9...2,5	1...1,4	52...62	14...24	5...8	12...16	75...78	18...22
[223]	0,87...0,92	–	–	47...60	–	6...10	–	72...78	–
[223] ⁵⁾	–	–	–	–	–	8	–	75	22
[107]	0,85...0,89	1,8...2,5	1...1,6	–	–	–	–	–	–
[202]	0,82...0,95	1,7...3,5	1,0...3,0	40...60	15...35	4...14	10...18	–	–
		(<i>m</i> = =1,9... 2,4)							
[224]	0,88...0,95	1,9...3	0,9...2	–	–	–	–	–	–
[27]	0,8...0,95	1,7...3,5	1,5...2,5	37...65	10...37	5...15	10...18	–	–
[27] ⁵⁾	–	2,2...2,6	–	–	–	–	–	–	–
[225] ⁵⁾	0,92...0,96	2,3...2,7	1,3...1,6	–	–	–	–	–	–
[225] ⁶⁾	0,66...1,02	1,9...3,2	1,3...1,6	–	–	–	–	–	–
[28]	0,85...0,95	1,7...3,5	1...2,5	42...65	15...50	10...25	2...15	70...80	...
[226]	0,85...0,89	1,8...2,4	1...1,6	47...55	–	6...10	–	72...78	20...24
[227]	0,8...0,95	1,7...3,5	1...3	–	–	–	–	75...82	18...25
		(<i>m</i> = =1,3... 2,4)							
[227] ⁷⁾	0,89±0,02	2,1±0,3	1,3±0,3	55±3	–	8±2	–	75±2	22±2

1) ТУ Гипроцемента.

2) Заводские данные.

3) Клинкер.

4) Присадочная сырьевая смесь.

5) Оптимальные значения.

6) Предельные значения.

7) По данным Л. С. Когана.

Характеристики	КН											
n	–	n										
p	–	–	p									
$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	–	–	–	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$								
C_3S	0,9	–	–	–	C_3S							
C_2S	–1,0	–	–	–	–0,9	C_2S						
C_3A	–	–	0,9	–	–	–	C_3A					
C_4AF	–	–0,8	–	–	–	–	–	C_4AF				
$\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S}$	–	–	–	–	0,8	–	–		C_3S +			
$\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$	1,0	–	–	–	0,9	–1,0				$\frac{\text{C}_3\text{S}}{\text{C}_2\text{S}}$		
$\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF}$	–	–0,9	–	–	–	–		0,8	–		C_3A +	
$\text{C}_3\text{A}/\text{C}_4\text{AF}$	–	–	1,0	–	–	–	0,9	–	–	–		$\frac{\text{C}_3\text{A}}{\text{C}_4\text{AF}}$
$\frac{\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S}}{\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF}}$	–	0,8	–	–	–	–	–	–	0,9	–	–0,9	–

Рис. 10.3. Коэффициенты корреляции между характеристиками клинкера Белгородского цементного завода (прочерк означает отсутствие корреляции)

Широкий диапазон возможного состава клинкера позволяет выбрать смесь, обеспечивающую наиболее благоприятные производственные условия. Влияние химического состава на технологический процесс обжига и свойства цемента рассмотрены в работах [202, 228], на необходимую тонкость помола и гранулометрический состав клинкера – в работе [184]; влияние модульных характеристик КН, n , p клинкера на прочностные показатели – в работе [184], на теплоту клинкерообразования – в работе [229], на расход топлива на обжиг – в работе [72], а влияние содержания минералов в клинкере на его прочность – в работах [184, 230].

На технологические свойства сырьевых смесей также влияет природа сырьевых материалов, наличие минерализирующих и леггирующих примесей TiO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , но точно установить это влияние нельзя [72].

10.5. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА КАЧЕСТВО ЦЕМЕНТА

Качество клинкера характеризуется его активностью. Она определяется физико-механическими испытаниями на прочность специальных образцов после 28 сут их твердения. Для оперативной оценки о качестве судят по косвенным показателям – содержанию свободной окиси кальция, плотности, грануляции.

Впервые влияние состава и свойств сырья на качество цемента было рассмотрено в 1937 г. на совещании по ископаемому сырью для силикатной промышленности, проводившемуся АН СССР [231]. Исследование влияния состава на прочностные показатели клинкера представлено в работе [230], где также были использованы данные работ [227, 232–235]. В результате исследования сделаны следующие выводы.

Минералы C_3S и C_3A определяют основные технические свойства клинкера, алит – начальную прочность в возрасте до 28 сут, белит набирает прочность в течение длительного времени – до года. Увеличение содержания C_3S повышает прочность цемента, но при этом снижается содержание минералов-плавней. Поэтому согласно работам [149, 232, 236], при повышении содержания C_3S более 65% рост прочности замедляется, а выше 70% прочность снижается.

При увеличении содержания C_3A до некоторого предела прочностные показатели увеличиваются, затем заметно уменьшаются. Оптимальное содержание C_3A составляет 9...12% и зависит от содержания C_4AF и C_3S ; при содержании C_4AF до 13% рост прочности при увеличении C_3A выше, чем при содержании C_4AF в пределах 14...17%.

При содержании C_3A до 12% при увеличении C_4AF прочность растет, при более высоком содержании C_3A – снижается. Таким образом, в работе [230] сделан вывод, что высокой прочностью характеризуются клинкера с высоким содержанием C_3A и низким C_4AF или с высоким содержанием C_4AF и низким C_3A .

Согласно работе [184], при изменении характеристик в пределах $KH = 0,86...0,96$ и $n = 1,7...2,5$ получаемые клинкера по механической прочности оказываются почти равноценными. Из клинкера с $KH < 0,82$ получают низкопрочные цементы, из клинкера с высоким KH – цементы с высокой механической

прочностью на сжатие и низкой – на растяжение. При $n \geq 3$ прочность снижается, при понижении p – незначительно возрастает.

В работе [204] для завода «Пуане-Кунде» по выборке из 181 значения исследована зависимость активности клинкера от 12 характеристик, в результате получено регрессионное уравнение зависимости активности A_{28} от коэффициентов насыщения сырьевой смеси $КН_{см}$ и клинкера $КН_{кл}$ и теплоты сгорания топлива Q_H^p :

$$A_{28} = -113,31 + 309,78 \cdot КН_{см} + 396,53 \cdot КН_{кл} - 0,0270 \cdot Q_H^p. \quad (10.8)$$

Размалываемость (затраты энергии на измельчение) клинкеров разного состава может отличаться в несколько раз. При увеличении содержания плавней размалываемость клинкера ухудшается, у клинкеров с преобладанием алюмоферритов она хуже, чем у клинкеров с преобладанием алюминатов [184].

В заключение необходимо заметить, что большинство характеристик клинкера, включая его активность, формируется в зоне спекания и зависит от свойств жидкой фазы и процесса агломерации твердожидких смесей. Экстремальный характер этих взаимозависимостей позволяет выделить область состава, оптимального с позиций и качества клинкера, и характеристик процесса обжига, связанных в основном с расходом топлива и образованием клинкерной обмазки [237].

10.6. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА ПРОЦЕСС ОБЖИГА

Минералы C_3S , C_2S , C_4AF и количество жидкой фазы определяют затраты энергии на обжиг и помол, стойкость футеровки [184]. Наиболее важными факторами, оказывающими влияние на технологические свойства обжигаемого материала, являются свойства и количество жидкой фазы [72].

В ряде исследований [238–241] выявлена зависимость свойств жидкой фазы от химического состава обжигаемого материала и температуры. Ли и Паркер, анализируя частную четверную систему, получили формулы для расчета количества расплава L , % [240, 242, 243]:

$$L = 6,1\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O} + \text{MgO} \quad \text{при } t = 1338^\circ, p > 1,38;$$

$$L = 8,5 \text{Al}_2\text{O}_3 - 5,22\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O} + \text{MgO} \quad \text{при } t = 1338^\circ, p < 1,38;$$

$$L = 2,95\text{Al}_2\text{O}_3 + 2,2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O} + \text{MgO} \quad \text{при } t = 1400^\circ; \quad (10.9)$$

$$L = 3\text{Al}_2\text{O}_3 + 2,25\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O} + \text{MgO} \quad \text{при } t = 1450^\circ.$$

По данным Петерсона, приведенные формулы завышают количество расплава на 5 абс. %, так как алит и белит содержат в твердом растворе 1% Al_2O_3 и 1% Fe_2O_3 [244]. Несмотря на то, что в формулу Ли и Паркера входят оксиды Al_2O_3 и Fe_2O_3 , согласно работе [245] глиноземный модуль влияет на количество жидкой фазы незначительно: при изменении p от 0,64 до 2,0 оно увеличивается с 22,4 до 24,8%. В работе [246] приводятся формулы расчета количества жидкой фазы при более высоких температурах:

$$L = 3,05\text{Al}_2\text{O}_3 + 2,45\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O} + \text{MgO} \quad \text{при } t = 1450^\circ;$$

$$L = 3,25\text{Al}_2\text{O}_3 + 2,65\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O} + \text{MgO} \quad \text{при } t = 1500^\circ;$$

$$L = 3,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 2,9\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O} + \text{MgO} \quad \text{при } t = 1550^\circ; \quad (10.10)$$

$$L = 3,95\text{Al}_2\text{O}_3 + 3,5\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{R}_2\text{O} + \text{MgO} \quad \text{при } t = 1600^\circ.$$

В работе [195] приводится следующая формула для расчета количества жидкой фазы:

$$L = 1,13\text{C}_3\text{A} + 1,35\text{C}_4\text{AF} + \text{MgO} + \text{R}_2\text{O}. \quad (10.11)$$

Вязкость расплава η согласно работе [72] линейно зависит от глиноземного модуля p и количества примесей. Для ее расчета используют формулу Богга:

$$\eta = 1,8 p + 1,5 \quad \text{при } t = 1338^\circ;$$

$$\eta = 1,58 p + 0,4 \quad \text{при } t = 1400^\circ; \quad (10.12)$$

$$\eta = 1,1 p + 0,2 \quad \text{при } t = 1450^\circ.$$

Спекание является основным процессом при получении цементного клинкера [184]. Спекаемость характеризуется наличием свободной окиси кальция $\text{CaO}_{\text{св}}$ в клинкере, она может определяться также по плотности клинкера [240]. В системах автоматического управления заданная плотность клинкера составляет от $1280 \pm 80 \text{ кг/м}^3$ (Египет) до 1100 кг/м^3 (Германия), допустимое содержание свободной CaO на некоторых заводах Германии составляет 3% [244].

Зависимость спекаемости от состава установлена в работах [184, 227, 247]. При повышении КН и n спекаемость ухудшается практически линейно. Глиноземный модуль на спекаемость влияет слабо, с повышением p она несколько ухудшается. В работе [248] по данным 32 опытов на сырьевой шихте Красноярского цементного завода получено уравнение

$$\text{CaO}_{\text{св}} = 4,944 - 6,300 \text{ КН} - 15,175 p + 18,833 \text{ КН } p. \quad (10.13)$$

В работе [249] приводятся уравнения содержания оксида кальция для разных температур обжига (табл. 10.5).

Таблица 10.5

Количество свободного оксида кальция

Температура, °С	Уравнение регрессии
1350	$\text{CaO}_{\text{св}} = 150,92 - 61,29 \text{ КН} - 1,59 n - 1,42 p$
1400	$\text{CaO}_{\text{св}} = 138,15 - 40,60 \text{ КН} - 0,913 n - 2,039 p$
1350...1400	$\text{CaO}_{\text{св}} = 124,92 - 50,93 \text{ КН} - 1,253 n - 1,732 p + 1,643 t$

Примечание. $\text{КН} = 0,86...0,92$; $n = 1,56...6,19$; $p = 0,64...3,32$.

Для оценки спекаемости по составу сырьевой смеси и клинкера могут быть использованы модули ИО и В [72], а также предложенная И. Ирку величина

$$\lambda = L/\eta, \quad (10.14)$$

где L – количество жидкой фазы; η – вязкость жидкой фазы.

Образование обмазки и агрессивное действие расплава на футеровку определяются свойствами жидкой фазы – температурой

образования, ее количеством и составом, что, в свою очередь, обуславливается химическим составом сырьевой смеси. Критерием прилипания материала к футеровке является отношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, но наряду с ним необходимо учитывать p , то есть вязкость расплава [243].

В работе [195] определен оптимальный состав клинкера, представленный на рис. 10.4. В работе [222] проведен статистический анализ стойкости футеровки в зависимости от состава клинкера (рис. 10.5).

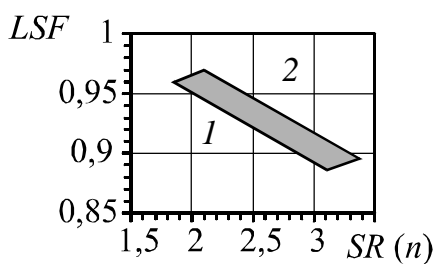


Рис. 10.4. Оптимальные характеристики клинкера:

1 – спекаемость и образование обмазки улучшаются, возможно образование колец;
2 – спекаемость и образование обмазки ухудшаются

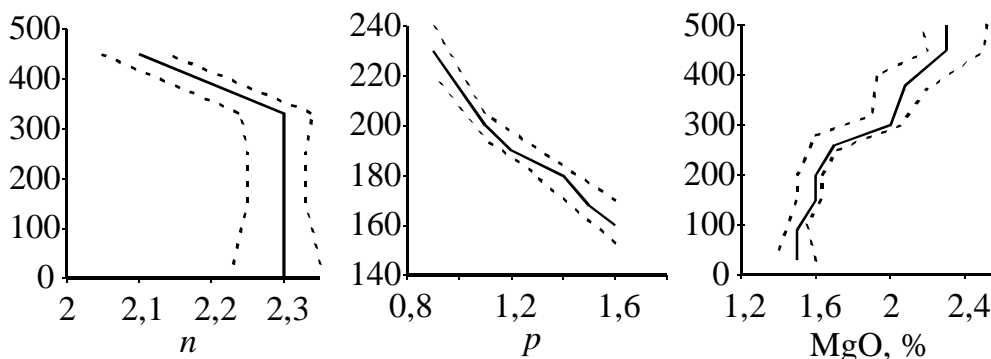


Рис. 10.5. Зависимость продолжительности кампании футеровки, сут, от характеристик клинкера:

$\frac{3}{4}$ – среднее значение; - - - - - стандартное отклонение

Согласно работам [184, 242, 250], агрессивность клинкерного расплава, то есть его воздействие на футеровку, определяется в основном содержанием Fe_2O_3 . Она имеет прямую связь со спекаемостью, трудноспекающийся клинкер сильнее действует на огнеупор. По агрессивности клинкер в работе [251] разделен на три группы:

- легкий, $\text{КН} = 0,83$, $n < 2,3$, $p < 1,7$;
- средний, $\text{КН} = 0,83 \dots 0,87$, $n = 2,3 \dots 2,6$, $p = 1,7 \dots 2$;
- трудный, $\text{КН} > 0,87$, $n > 2,6$, $p > 2$.

Наибольший срок службы футеровки наблюдается при образовании 22,5...24,5 % жидкой фазы.

Статистический анализ данных отечественных заводов, проведенный в работе [252–254], позволяет для производства цемента по мокрому способу при влажности сырьевой смеси 33...42% вывести зависимость удельного расхода топлива от влажности и размера печей:

$$q = 84,9D_{\text{cp}} - 3,54 L + 12 W + 1366, \quad (10.15)$$

где q – удельный расход тепла на обжиг клинкера, ккал/кг; W – влажность шлама, %; L – длина печей, м; D_{cp} – средний диаметр печи, м.

По данным работы [255] коэффициент при влажности шлама также равен 12.

В настоящее время потенциально достижимый уровень энергосбережения при обжиге клинкера по сухому способу практически исчерпан и в целом при производстве клинкера из традиционного сырья нельзя ожидать большого снижения топлива [244]. Совершенствование процесса обжига по мокрому способу может позволить снизить расход топлива до 160...170 кг усл. т/т кл. [101, 244].

В основном затраты тепла на обжиг определяются химическими превращениями сырьевой смеси. Согласно законам термодинамики, тепловой эффект химических реакций определяется исключительно составом и фазовым состоянием исходных и конечных продуктов. Поэтому наиболее принципиальным путем экономии топлива является изменение традиционного вещественного состава сырьевых смесей и химико-минералогических составов клинкеров [256, 257].

Повышение значений КН, n , p обычно приводит к увеличению расхода тепла на обжиг. Наиболее существенным фактором, влияющим на расход тепла на обжиг, является изменение коэффициента насыщения, так как он влияет на содержание карбонатов в сырьевой смеси. Но снижение КН сырьевой смеси должно сопровождаться совершенствованием системы обжига и охлаждения, в первую очередь повышением эффективности работы холодильника [258].

По исследованиям смесей Серебряковского завода в работе [72] сделаны следующие выводы:

1) изменение КН в пределах 0,86...0,95 существенно не сказывается на химических превращениях в зонах подогрева и декарбонизации;

2) при снижении КН от 0,91 до 0,86 расход тепла сокращается на 1,5...2,0%;

3) одновременное повышение n и p в пределах 2,0...2,4 и 1,0...1,4 соответственно при сохранении КН = 0,91 не сказывается на ходе химических реакций, но более высокая температура в зоне спекания требует увеличения расхода тепла на обжиг в среднем на 2,5%.

10.7. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что большинство характеристик клинкера имеет одинаковый общий вид. Характеристики жидкой фазы, обжигаемости, образования обмазки и стойкости футеровки могут быть выражены через химический состав сырьевых смесей и клинкера, при этом они имеют общий с модульными характеристиками вид. В большинстве случаев сырьевые смеси и клинкер оцениваются на основании ограниченного ряда традиционных характеристик: химического и минералогического состава, показателей насыщения, глиноземного и кремнеземного модулей. Современные условия, в частности увеличение числа сырьевых компонентов, выпуск специальной продукции, использование нетрадиционного сырья, увеличение количества сырьевых переделов и стадий смешения, требуют расширения существующего набора характеристик. Имеющиеся характеристики описывают технологические свойства клинкера, и не существует модулей, характеризующих свойства сырья и клинкера, которые определяют интенсивность теплообмена и химических превращений в процессе обжига клинкера.

Определим требования к характеристикам, используемым в расчете и оптимизации сырьевой смеси:

а) универсальность, то есть применимость в различных производственных условиях для сырья различного вида;

б) уникальность, заключающаяся в описании единственного свойства и отсутствии корреляции с другими характеристиками;

в) качественное соответствие между характеристикой и описываемым ею свойством;

г) безразмерность;

д) зависимость только от химического состава материала.

Новые критерии необходимо получать в едином виде, что позволит создать единые методы расчета и оптимизации многокомпонентных систем, которыми являются сырьевая смесь и клинкер. Получение новых характеристик требует использования методов исследования многокомпонентных смесей и систем, заключающихся в планировании эксперимента на диаграмме «состав–свойство», описывающей зависимость свойств от количественных смесевых факторов и получение зависимостей для этих диаграмм.

Среди планов на симплексе следует отметить симплекс-решетчатые, симплекс-центроидные планы, планы с нулевыми пропорциями компонентов, планы для неполиномиального описания свойств смесей, *D*-оптимальные планы, планы, минимизирующие смещение и др. [259]. Расположение точек внутри симплекса необходимо для минимизации систематического смещения и при числе факторов, равном или больше четырех. Специальные методы планирования на диаграммах рассматриваются в работах [260–266] и классифицированы в зависимости от области применения в сборнике [267].

Для описания диаграммы «состав–свойство» применяются полиномиальные и неполиномиальные модели. Согласно работам [14, 268], поверхности отклика в многокомпонентных смесях характеризуются наличием одного или нескольких экстремумов, седловых точек или резким несимметричным изменением свойства, и поэтому для их описания необходимы полиномы высоких степеней, но в работах [259, 266, 269] показано, что полиномиальное описание мало пригодно для сложных многокомпонентных систем с факторами, коррелированными между собой. В этом случае необходимо построение на основе решетчатых пла-

нов высоких порядков неполиномиальных зависимостей, в качестве которых можно принять общий вид модульных характеристик, определение коэффициентов регрессии по методу наименьших квадратов и проверка адекватности с использованием F -критерия [14, 270].

Цементное производство является сложным технологическим процессом, для которого в настоящее время не разработаны детерминированные модели как процесса в целом, так и его отдельных стадий. В этой связи изучение процесса переработки многокомпонентных сырьевых смесей в клинкер и установление зависимостей между его параметрами производится с преобладанием экспериментально-статистических методов. Так, на основе методов математического планирования возможно получение модели изучаемого объекта или процесса, связывающей химический состав сырьевых смесей и клинкера с их свойствами, на основании которой могут разрабатываться новые характеристики цементных материалов [196].

Один из возможных способов получения характеристик в соответствии с работами [8–10] следующий:

- 1) разработка детерминированной математической модели расчета свойства;
- 2) проведение вычислительного эксперимента и получение совокупности данных отклика в пространстве факторов (химического состава);
- 3) решение обратной задачи на основании полученных данных и общего вида уравнения модульной характеристики.

10.8. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

На производстве стремятся поддерживать заданные значения технологических параметров, поэтому часто пределы их изменения, взятые за продолжительный отрезок времени работы завода, сопоставимы с погрешностью определения параметров. В этом случае выборка производится из урезанного распределения и статистические данные обладают неустойчивостью к малым изменениям исходных данных. Один из способов статистической обработки таких данных – разбиение выборки на равные интервалы и

усреднение данных в каждом интервале с получением из средних точек эмпирической линии регрессии [11]. В работе [271] предлагается разбивать выборку на группы, количество которых определяется по влиянию усредненных точек на вариацию коэффициента регрессии. Вариация определяется по отклонению коэффициентов регрессии, рассчитанных по всем точкам, от коэффициентов, рассчитанных для выборок без точек данной группы. Затем производится расчет коэффициентов регрессии для каждой группы и усреднение полученных коэффициентов.

На примере данных Белгородского цементного завода за 5 месяцев 1996 г. рассмотрим зависимость прочности клинкера от характеристики сырьевой смеси. На рис. 10.6 приведены средние данные 28-суточной прочности на сжатие и изгиб для клинкеров. Прочность в каждом случае приведена для трех диапазонов характеристик, в каждом из которых одинаковое число точек.

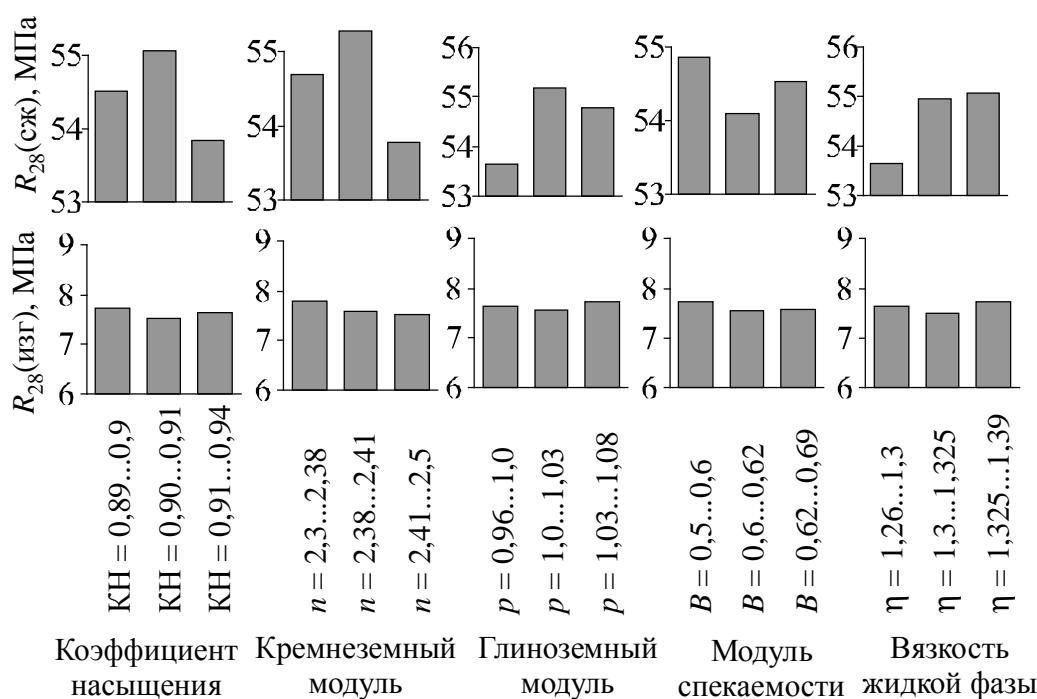


Рис. 10.6. Зависимость активности клинкера от его характеристик

Из рис. 10.6 видно, что средние значения модулей КН, n , p , поддерживаемые на заводе, обеспечивают максимальную прочность клинкера на сжатие, но не являются наилучшими значениями для прочности на изгиб. Кроме того, клинкера со средни-

ми характеристиками не обеспечивают оптимального значения модуля спекаемости (отношения основности материала к жидкой фазе), которое по С. И. Данюшевскому, а также согласно рис. 10.6, равно 0,5...0,6.

В соответствии с рис. 10.6, в Белгороде также не обеспечивается оптимальное значение вязкости жидкой фазы. Таким образом, при выборе сырьевых смесей рационального состава необходимо использовать более широкий набор характеристик, чем традиционно применяемые КН, n и p .

Требования к оптимальному составу сырьевых смесей можно сформулировать следующим образом: обеспечение минимального расхода топлива на обжиг с улучшением условий спекаемости и обжигаемости сырьевых смесей. Выбор рационального состава сырьевой смеси может быть выполнен по методике М. М. Сычева [184] и заключается в сборе на заводе материала, связывающего химический состав, особенности структуры клинкеров с физико-механическими свойствами цемента и размалываемостью клинкера, проведении лабораторных исследований образцов сырьевой базы завода и статистических исследований полученных данных.

11. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ И КЛИНКЕРА

Эффективность обжига цементного клинкера во многом определяется свойствами перерабатываемого сырья [72, 200, 272]. В настоящее время промышленность строительных материалов характеризуется истощением сырьевой базы и значительным увеличением доли специальной продукции. Крайне важная задача также – уменьшение себестоимости продукции, значительной составляющей в которой является расход топлива при обжиге. Это вызывает необходимость применения в качестве сырья нетрадиционных и техногенных материалов, увеличения числа сырьевых компонентов, выбора наиболее оптимального сочетания из имеющихся материалов, изменения и увеличения требований к рассчитываемым смесям.

Один из методов ресурсо- и энергосбережения – изменение традиционных способов составления сырьевых смесей, предназначенных для получения стройматериалов, и в частности цемента. Техногенные продукты могут заменять дорогостоящие добавки природного происхождения. Так как большинство промышленных отходов уже прошли термообработку, их использование ведет к заметному снижению энергозатрат на производство стройматериалов. Снизить расход топлива также позволяет расширение набора анализируемых параметров сырьевых смесей и клинкера, применение методов оптимизации их состава.

Общим во всех перечисленных случаях является увеличение числа сырьевых компонентов, статей химического состава материалов и количества характеристик материалов. Поэтому решение актуальных задач цементной технологии связано с развитием применяемых методов расчета и оптимизации состава сырьевых смесей и клинкера.

11.1. ЦЕЛИ РАСЧЕТА СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Термин «сырьевая смесь» относится к сухому и мокрому способам производства и обозначает смесь, пересчитанную на сухое вещество [28]. Управление химическим составом сырьевой смеси

согласно работе [273] относится к классу задач оптимального стохастического управления многомерным динамическим объектом. Типизацию технологических схем приготовления сырьевых смесей в зависимости от исходного сырья, технологического оборудования и аппаратуры контроля разработал В. Дросте [274] (рис. 11.1).

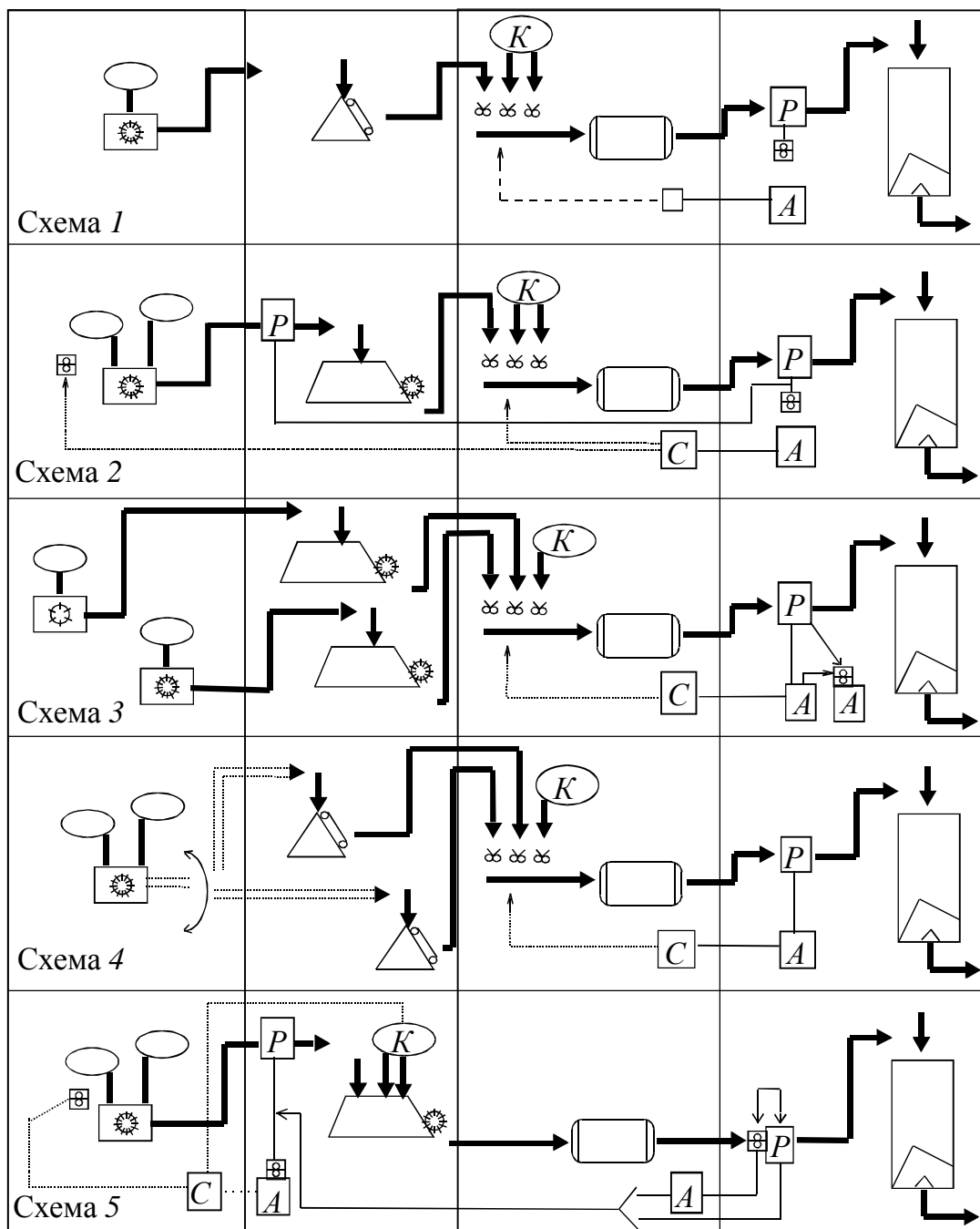


Рис. 11.1. Типовые схемы процесса приготовления сырьевой смеси:
P – пробоотборник; *A* – анализатор; *C* – УВМ; *K* – корректирующие добавки

В работе [275] предложена следующая классификация типовых задач технологии смешивания, используемая на трех переделах производства – в карьере, в сырьевом цехе и цехе помола клинкера:

- 1) определение требований к качеству готового продукта;
- 2) определение качества исходных компонентов;
- 3) расчет дозировок исходных смешиваемых компонентов;
- 4) физико-химический анализ состава смеси;
- 5) корректировка дозировок смешиваемых компонентов;
- 6) расчет режимов работы усреднительных агрегатов;
- 7) корректировка режимов работы усреднительных агрегатов.

В данной классификации, а также в описанных другими авторами схемах и алгоритмах управления приготовлением сырьевой смеси [72, 196, 275–280], как поточным, так и порционным, можно выделить ряд типовых задач, способы математического описания которых не зависят от технологической схемы производства. Ими являются определение требований к качеству готового продукта и расчет (корректирование) дозировок компонентов.

Особенностью получения клинкера является то, что сырьевая смесь составляется из двух и более сырьевых компонентов, представляющих собой природные материалы или отходы иных производств, вследствие чего химические составы сырьевой смеси и клинкера не могут быть заданы произвольным образом, а только в определенных пропорциях между оксидами, определяемых химическим составом сырьевых компонентов.

Цель расчета или оптимизации состава сырьевой смеси заключается в установлении количественного соотношения сырьевых компонентов на основании их химического состава и заданных характеристик клинкера [27, 224]. На цементных заводах расчеты выполняются много раз за смену, особенно трудоемким расчет становится при подборе новых видов сырья [27]. Поэтому в ряде работ [196, 281] автоматизация расчетов рассматривается как неотъемлемая часть производства цемента. В настоящее время расчет сырьевых смесей производится как на дискретных [27, 196, 210, 273, 282–287], так и на аналоговых ЭВМ [283].

В связи с невозможностью на отечественных заводах автоматизировать процесс приготовления сырьевых смесей, что отме-

чается в работе [251], возникают задачи разработки систем «человек – машина», когда оператор объекта, являясь одним из звеньев АСУ, поставляет системе информацию и получает необходимые сведения для управления производственным процессом. Согласно работе [251], для управления приготовлением сырьевой смеси необходимо создание автоматизированных рабочих мест, ориентированных на начальника центральной заводской лаборатории и сменного химика (инженера-технолога).

Необходимо отметить, что в связи с распределенностью и многомерностью объекта разрабатываемые системы управления процессом обжига клинкера при помощи локальных систем регулирования не дали желаемых результатов [288]. Эксплуатируемые в настоящее время за рубежом системы автоматизации работают на основе анализа работы всего печного агрегата [289, 290]. Поэтому процесс приготовления и свойства сырьевой смеси необходимо рассматривать не обособленно, а с учетом работы печного агрегата и процессов, происходящих в нем.

11.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ РАСЧЕТА И КОРРЕКТИРОВАНИЯ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

При расчете сырьевых смесей количество задаваемых характеристик не является произвольным, а определяется видом сырья, числом сырьевых компонентов и технологией приготовления сырьевой смеси. Обычно оно на единицу меньше количества сырьевых компонентов в смеси N . Характеристики для расчета следует выбирать с низкой степенью корреляции между собой [291], что позволит более полно учесть свойства клинкера и повысить точность расчета из-за исключения вырожденных или близких к ним систем.

Для получения клинкерных минералов состав сырьевой смеси должен обеспечивать необходимое соотношение четырех основных оксидов – CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , которое может быть выражено значениями трех характеристик – KH , n и p . Таким образом, для точного задания требуемого состава клинкера необходима четырехкомпонентная сырьевая смесь.

На практике нужный состав клинкера часто может быть обеспечен тремя и даже двумя сырьевыми компонентами, в которых

присутствует необходимое количество всех минералообразующих оксидов. При расчете трехкомпонентной смеси задаются две модульные характеристики, например KH и n или KH и p . Третья характеристика при этом остается свободной и определяется по результатам расчета состава клинкера. Для двухкомпонентной смеси задается одна характеристика – показатель степени насыщения или титр. Характеристики, применяемые для расчета сырьевых смесей, представлены в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Характеристики для расчета сырьевых смесей [195, 292]

Количество компонентов	Характеристики, задаваемые для расчета
2 (или корректирование сырьевой смеси)	KH Титр (если содержание $MgCO_3$ постоянно) Расчетное содержание $CaCO_3$ C_3S/C_2S
3	KH, n KH, p $LSF, n (SR)$ $HR (m), n (SR)$ C_3S, C_2S
4	KH, n, p^* $C_3S, C_2S, C_3A + C_4AF$ Соотношение C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF

* При задании содержания оксидов C, S, A, F или минералов C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF их пересчитывают на KH, n, p и расчет проводится по ним [227].

В ряде случаев модули n и p заменяются на сумму полуторных оксидов $Al_2O_3 + Fe_2O_3$ или на один из них, а также на содержание или сумму минералов-плавней C_3A, C_4AF . Так, стабилизация Al_2O_3 вместо одного из модулей позволяет осуществлять раздельное (независимое) управление расходом глиноогарочного шлама и огарков [293].

Приготовление сырьевой смеси сопровождается определенной погрешностью, вызываемой неточностью дозировки или колеба-

ниями состава сырья. Поэтому после приготовления сырьевой смеси производится ее корректирование. Оно заключается в выборе необходимой корректирующей добавки и расчете ее дозировки с целью доведения имеющейся сырьевой смеси до заданного состава. Выбор корректирующего компонента представлен в табл. 11.2. В настоящее время большинство систем автоматизации корректирования сырьевой смеси основано на применении методов нечеткой логики.

Расчет корректирования эквивалентен расчету двух- или трехкомпонентной сырьевой смеси. Обычно в приводимых в литературе формулах корректирования определяются не массовые или процентные доли компонентов, а соотношения масс корректирующей добавки и сырьевой смеси.

Таблица 11.2

Компоненты для корректирования сырьевой смеси

Характеристика сырьевой смеси	Требуемое изменение	Используемые сырьевые материалы
Коэффициент насыщения КН, титр Т	Повышение	Известковый компонент
	Понижение	Глинистый компонент
Кремнеземный модуль n	Повышение	Песок, трепел, диатомит и другие высококремнистые материалы
	Понижение	Огарки, железная руда, колошниковая пыль, бокситы
Глиноземный модуль p	Повышение	Бокситы
	Понижение	Огарки, железная руда, колошниковая пыль

Корректирование согласно работам [195, 200] производится следующим образом:

- КН, титру (при постоянном содержании $MgCO_3$ в сырье) или расчетному содержанию $CaCO_3$;
- отношению CaO/SiO_2 ;
- КН и одному из модулей (n или p);
- титру и Fe_2O_3 .

11.3. УРАВНЕНИЯ РАСЧЕТА И КОРРЕКТИРОВАНИЯ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

Расчет сырьевых смесей основан на уравнениях материального баланса содержания оксидов в сырьевой смеси или клинкере:

$$Z = \sum_{i=1}^N k_i x_i Z_i + Z_{\text{пр}} q_{\text{пр}}; \quad \sum_{i=1}^N x_i = 1; \quad \forall x_i \geq 0, \quad (11.1)$$

где Z , Z_i , $Z_{\text{пр}}$ – содержание оксида в сырьевой смеси (клинкере), i -м компоненте и золе топлива; N – количество сырьевых компонентов в смеси; k_i – коэффициент, учитывающий потери при прокаливании i -го компонента, присадку при обжиге, вид материального баланса (для смеси или клинкера); x_i – доля i -го компонента в смеси; $q_{\text{пр}}$ – доля присадки в клинкере.

Расчет сырьевой смеси по наиболее распространенному методу Кинда-Огорокова осуществляется по уравнениям, полученным подстановкой в модульные характеристики содержания оксидов, выраженных через содержание соответствующих оксидов в сырьевой смеси и содержание сырьевых компонентов в смеси. Существует метод расчета Л. С. Когана, состоящий в последовательном расчете двухкомпонентных смесей: сначала из двух сырьевых компонентов получается смесь с заданным n или p , затем из этой смеси и третьего компонента составляется смесь с заданным КН [224].

Рассмотрим известные методы расчета двух-, трех- и четырехкомпонентных сырьевых смесей с учетом и без учета присадки золы топлива по методу Кинда–Огорокова, которые подробно представлены в работах [186, 294].

Пусть X_i – содержание непрокаленных сухих сырьевых компонентов в сырьевой смеси, $i = 1 \dots N$. При расчете сырьевой смеси без учета присадки золы топлива принимается, что содержание последнего компонента в сырьевой смеси $X_N = 1$. При таком подходе производить расчет возможно только по характеристикам сырьевой смеси (титру и расчетному содержанию CaCO_3) и по модулям, представляющих собой одинаковое для сырьевой

смеси и бесприсадочного клинкера отношение между оксидами. В этом случае содержание оксида Z_c в сырьевой смеси равно

$$Z_c = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} Z_i X_i + Z_N}{\sum_{i=1}^{N-1} X_i + 1}. \quad (11.2)$$

Пусть имеется модульная характеристика M , представляющая соотношения между оксидами:

$$M = \frac{\sum_{j=1}^L k'_j Z_j}{\sum_{j=1}^L k''_j Z_j}, \quad (11.3)$$

где L – количество оксидов в химическом составе; k'_j, k''_j – коэффициенты, которые могут быть равны нулю.

Подставляя в характеристику (11.3) вместо оксидов Z_j оксиды сырьевой смеси (11.2), после преобразования и упрощения получаем уравнение с $N - 1$ неизвестными X_i :

$$\sum_{i=1}^{N-1} \left[M \sum_{j=1}^L k''_j Z_{ij} - \sum_{j=1}^L k'_j Z_{ij} \right] X_i = \sum_{j=1}^L k'_j Z_{Nj} - M \sum_{j=1}^L k''_j Z_{Nj}, \quad (11.4)$$

где Z_{ij} и Z_{Nj} – содержание j -го оксида в i -м и N -м сырьевом компоненте.

Одновременно с уравнением (11.4) в расчете могут быть использованы уравнения для характеристик сырьевой смеси, например титра. Уравнения для характеристик в этом случае подобны выражению (11.2), но вместо оксида Z используется характеристика или выражение для ее расчета через оксиды сырьевой смеси.

Записывая необходимое количество уравнений (11.4) получаем системы уравнений для расчета сырьевой смеси без учета присадки золы топлива:

– для двухкомпонентной смеси ($X_2 = 1$)

$$a_{11} X_1 = b_1, \quad (11.5)$$

– для трехкомпонентной смеси ($X_3 = 1$)

$$\begin{cases} a_{11} X_1 + a_{12} X_2 = b_1; \\ a_{21} X_1 + a_{22} X_2 = b_2, \end{cases} \quad (11.6)$$

– для четырехкомпонентной смеси ($X_4 = 1$)

$$\begin{cases} a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + a_{13} X_3 = b_1; \\ a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + a_{23} X_3 = b_2; \\ a_{31} X_1 + a_{32} X_2 + a_{33} X_3 = b_3. \end{cases} \quad (11.7)$$

Коэффициенты a и b систем уравнений для расчета по разным характеристикам представлены в табл. 11.3.

Таблица 11.3

**Коэффициенты уравнений
расчета и корректирования сырьевой смеси**

Число компонентов	Задаваемые характеристики	Коэффициенты систем уравнений (11.5) – (11.7)
1	2	3
2	КН	$a_{11} = (2,8KH \cdot S_1 + 1,65A_1 + 0,35F_1) - C_1;$ $b_1 = C_2 - (2,8KH \cdot S_2 + 1,65A_2 + 0,35F_2)$
2	Титр Т	$a_{11} = T - T_1;$ $b_1 = T_2 - T$
2	$(CaCO_3)_{расч}$	$a_{11} = (CaCO_3)_{расч} - (T_1 - 2,483M_1);$ $b_1 = T_2 - 2,483M_2 - (CaCO_3)_{расч}$
2	C_3S/C_2S	$a_{11} = C_3S/C_2S (-3,071C_1 + 8,6S_1 + 5,068A_1 + 1,079F_1) -$ $- (4,071C_1 - 7,6S_1 - 6,718A_1 - 1,43F_1);$ $b_1 = 4,071C_2 - 7,6S_2 - 6,718A_2 - 1,43F_2 -$ $- C_3S/C_2S (-3,071C_2 + 8,6S_2 + 5,068A_2 + 1,079F_2)$

1	2	3
3	КН, n	$a_{11} = (2,8KH \cdot S_1 + 1,65A_1 + 0,35F_1) - C_1;$ $a_{12} = (2,8KH \cdot S_2 + 1,65A_2 + 0,35F_2) - C_2;$ $b_1 = C_3 - (2,8KH \cdot S_3 + 1,65A_3 + 0,35F_3);$ $a_{21} = n(A_1 + F_1) - S_1;$ $a_{22} = n(A_2 + F_2) - S_2;$ $b_2 = S_3 - n(A_3 + F_3)$
3	КН, p	$a_{11} = (2,8KH \cdot S_1 + 1,65A_1 + 0,35F_1) - C_1;$ $a_{12} = (2,8KH \cdot S_2 + 1,65A_2 + 0,35F_2) - C_2;$ $b_1 = C_3 - (2,8KH \cdot S_3 + 1,65A_3 + 0,35F_3);$ $a_{21} = pF_1 - A_1;$ $a_{22} = pF_2 - A_2;$ $b_2 = A_3 - pF_3$
3	HR, n	$a_{11} = HR (S_1 + A_1 + F_1) - C_1;$ $a_{12} = HR (S_2 + A_2 + F_2) - C_2;$ $b_1 = C_3 - HR(S_3 + A_3 + F_3);$ $a_{21} = n(A_1 + F_1) - S_1;$ $a_{22} = n(A_2 + F_2) - S_2;$ $b_2 = S_3 - n(A_3 + F_3)$
4	КН, n, p	$a_{11} = (2,8KH \cdot S_1 + 1,65A_1 + 0,35F_1) - C_1;$ $a_{12} = (2,8KH \cdot S_2 + 1,65A_2 + 0,35F_2) - C_2;$ $a_{13} = (2,8KH \cdot S_3 + 1,65A_3 + 0,35F_3) - C_3;$ $b_1 = C_4 - (2,8KH \cdot S_4 + 1,65A_4 + 0,35F_4);$ $a_{21} = n(A_1 + F_1) - S_1;$ $a_{22} = n(A_2 + F_2) - S_2;$ $a_{23} = n(A_3 + F_3) - S_3;$ $b_2 = S_4 - n(A_4 + F_4);$ $a_{31} = pF_1 - A_1;$ $a_{32} = pF_2 - A_2;$ $a_{33} = pF_3 - A_3;$ $b_3 = A_4 - pF_4$

Примечание. C_1, S_1, A_1, F_1, M_1 – химический состав (содержание CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO) первого сырьевого компонента; $C_2, S_2, A_2, F_2, M_2, C_3, S_3, A_3, F_3, M_3, C_4, S_4, A_4, F_4, M_4$ – химический состав второго, третьего и четвертого сырьевых компонентов; T_1, T_2 – титры первого и второго компонентов (корректирующей добавки и сырьевой смеси); КН, n, p, T, C_3S, C_2S – заданные значения модульных характеристик, титра и минералогического состава.

В рассматриваемых системах содержание последнего компонента равно единице. Поэтому после нахождения содержания остальных компонентов X_i они переводятся в доли x_i из расчета равенства суммы долей всех компонентов единице:

$$x_i = \frac{X_i}{\sum_{j=1}^{N-1} X_j + 1} = X_i \cdot x_N, \quad i = 1 \dots N-1, \quad x_N = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N-1} X_j + 1},$$

где N – число компонентов.

Если в системах уравнения использовать содержание всех N компонентов, это позволит увеличить число уравнений и задаваемых характеристик. Например, четырехкомпонентную смесь возможно будет рассчитать, задавая содержание в клинкере четырех минералообразующих оксидов или четырех минералов. При этом в рассчитанном клинкере содержание задаваемых оксидов C, S, A, F или минералов C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF точно соблюдаться не будет, но сохранится соотношение между оксидами $C : S : A : F$ или минералами $C_3S : C_2S : C_3A : C_4AF$. Система уравнений для расчета по химическому составу будет иметь вид

$$\begin{cases} C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 = C; \\ S_1 X_1 + S_2 X_2 + S_3 X_3 + S_4 X_4 = S; \\ A_1 X_1 + A_2 X_2 + A_3 X_3 + A_4 X_4 = A; \\ F_1 X_1 + F_2 X_2 + F_3 X_3 + F_4 X_4 = F, \end{cases} \quad (11.8)$$

расчет по минералогическому составу производится по уравнениям

$$\begin{cases} a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + a_{13} X_3 + a_{14} X_4 = 0; \\ a_{21} X_1 + a_{22} X_2 + a_{23} X_3 + a_{24} X_4 = 0; \\ a_{31} X_1 + a_{32} X_2 + a_{33} X_3 + a_{34} X_4 = 0; \\ a_{41} X_1 + a_{42} X_2 + a_{43} X_3 + a_{44} X_4 = 0, \end{cases} \quad (11.9)$$

где коэффициенты равны

$$\begin{aligned}
a_{11} &= 4,071C_1 - 7,6S_1 - 6,718A_1 - 1,43F_1; \\
a_{12} &= 4,071C_2 - 7,6S_2 - 6,718A_2 - 1,43F_2; \\
a_{13} &= 4,071C_3 - 7,6S_3 - 6,718A_3 - 1,43F_3; \\
a_{14} &= 4,071C_4 - 7,6S_4 - 6,718A_4 - 1,43F_4; \\
b_1 &= C_3S; \\
a_{21} &= -3,071C_1 + 8,6S_1 + 5,068A_1 + 1,079F_1; \\
a_{22} &= -3,071C_2 + 8,6S_2 + 5,068A_2 + 1,079F_2; \\
a_{23} &= -3,071C_3 + 8,6S_3 + 5,068A_3 + 1,079F_3; \\
a_{24} &= -3,071C_4 + 8,6S_4 + 5,068A_4 + 1,079F_4; \\
b_2 &= C_2S; \\
a_{31} &= 2,65A_1 - 1,692F_1; \\
a_{32} &= 2,65A_2 - 1,692F_2; \\
a_{33} &= 2,65A_3 - 1,692F_3; \\
a_{34} &= 2,65A_4 - 1,692F_4; \\
b_3 &= C_3A; \\
a_{41} &= 3,043F_1; \\
a_{42} &= 3,043F_2; \\
a_{43} &= 3,043F_3; \\
a_{44} &= 3,043F_4; \\
b_4 &= C_4AF.
\end{aligned}$$

При другом подходе к составлению систем уравнений сумма всех компонентов принимается равной единице и содержание последнего компонента выражается через содержание остальных:

$$x_N = 1 - \sum_{i=1}^{N-1} x_i, \quad (11.10)$$

что соответственно изменит выражение (11.2) и усложнит уравнение (11.4). Также возможен учет долей всех N компонентов, при этом выражение (11.2) примет вид

$$Z_c = \sum_{i=1}^N Z_i x_i, \quad (11.11)$$

а системы (11.5) – (11.7) увеличатся на одно уравнение материального баланса:

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, \quad (11.12)$$

то есть N -компонентная смесь потребует решения системы из N уравнения, но число задаваемых характеристик все равно будет равно $N - 1$.

Если при расчете необходимо задавать точное содержание оксидов или минералов в клинкере, необходимо использовать содержание оксидов в прокаленных сырьевых компонентах и доли прокаленных сырьевых компонентов в клинкере y_i . Содержание оксида Z в клинкере будет иметь вид

$$Z = \sum_{i=1}^{N-1} g_i Z_i y_i = \sum_{i=1}^{N-1} g_i Z_i y_i + g_N Z_N \left(1 - \sum_{i=1}^{N-1} y_i \right), \quad (11.13)$$

где $g_i = (1 - 0,01 \cdot \text{ППШ}_i)^{-1}$ – расход непрокаленного i -го компонента.

Системы уравнений примут следующий вид:

– для трехкомпонентной смеси ($y_3 = 1 - y_1 - y_2$)

$$\begin{cases} a_{11} y_1 + a_{12} y_2 = b_1; \\ a_{21} y_1 + a_{22} y_2 = b_2, \end{cases} \quad (11.14)$$

– для четырехкомпонентной смеси ($y_4 = 1 - y_1 - y_2 - y_3$)

$$\begin{cases} a_{11} y_1 + a_{12} y_2 + a_{13} y_3 = b_1; \\ a_{21} y_1 + a_{22} y_2 + a_{23} y_3 = b_2; \\ a_{31} y_1 + a_{32} y_2 + a_{33} y_3 = b_3. \end{cases} \quad (11.15)$$

Примеры расчета коэффициентов a и b при расчете двух и трехкомпонентной сырьевой смеси представлены в табл. 11.4.

Коэффициенты уравнений расчета по составу клинкера

Число компонентов	Задаваемые характеристики	Коэффициенты систем уравнений (11.14) – (11.15)
1	2	3
4	C, S, A+F	$a_{11} = g_1C_1 - g_4C_4; a_{12} = g_2C_2 - g_4C_4; a_{13} = g_3C_3 - g_4C_4;$ $b_1 = C - g_4C_4;$ $a_{21} = g_1S_1 - g_4S_4; a_{22} = g_2S_2 - g_4S_4; a_{23} = g_3S_3 - g_4S_4;$ $b_2 = S - g_4S_4;$ $a_{31} = (g_1A_1 - g_4A_4) + (g_1F_1 - g_4F_4);$ $a_{32} = (g_2A_2 - g_4A_4) + (g_2F_2 - g_4F_4);$ $a_{33} = (g_3A_3 - g_4A_4) + (g_3F_3 - g_4F_4);$ $b_3 = A + F - (g_4A_4 + g_4F_4);$ $a_{21} = -3,071(g_1C_1 - g_4C_4) + 8,6(g_1S_1 - g_4S_4) +$ $+ 5,068(g_1A_1 - g_4A_4) + 1,079(g_1F_1 - g_4F_4);$ $a_{22} = -3,071(g_2C_2 - g_4C_4) + 8,6(g_2S_2 - g_4S_4) +$ $+ 5,068(g_2A_2 - g_4A_4) + 1,079(g_2F_2 - g_4F_4);$ $a_{23} = -3,071(g_3C_3 - g_4C_4) + 8,6(g_3S_3 - g_4S_4) +$ $+ 5,068(g_3A_3 - g_4A_4) + 1,079(g_3F_3 - g_4F_4);$ $b_2 = C_2S - (-3,071g_4C_4 + 8,6g_4S_4 + 5,068g_4A_4 + 1,079g_4F_4);$ $a_{31} = 2,65(g_1A_1 - g_4A_4) + 1,351(g_1F_1 - g_4F_4);$ $a_{32} = 2,65(g_2A_2 - g_4A_4) + 1,351(g_2F_2 - g_4F_4);$ $a_{33} = 2,65(g_3A_3 - g_4A_4) + 1,351(g_3F_3 - g_4F_4);$ $b_3 = C_3A + C_4AF - (2,65g_4A_4 + 1,351g_4F_4)$
4	C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A+C ₄ AF	$a_{11} = 4,071(g_1C_1 - g_4C_4) - 7,6(g_1S_1 - g_4S_4) -$ $- 6,718(g_1A_1 - g_4A_4) - 1,43(g_1F_1 - g_4F_4);$ $a_{12} = 4,071(g_2C_2 - g_4C_4) - 7,6(g_2S_2 - g_4S_4) -$ $- 6,718(g_2A_2 - g_4A_4) - 1,43(g_2F_2 - g_4F_4);$ $a_{13} = 4,071(g_3C_3 - g_4C_4) - 7,6(g_3S_3 - g_4S_4) -$ $- 6,718(g_3A_3 - g_4A_4) - 1,43(g_3F_3 - g_4F_4);$ $b_1 = C_3S - (4,071g_4C_4 - 7,6g_4S_4 - 6,718g_4A_4 - 1,43g_4F_4);$ $a_{21} = -3,071(g_1C_1 - g_4C_4) + 8,6(g_1S_1 - g_4S_4) +$ $+ 5,068(g_1A_1 - g_4A_4) + 1,079(g_1F_1 - g_4F_4);$ $a_{22} = -3,071(g_2C_2 - g_4C_4) + 8,6(g_2S_2 - g_4S_4) +$ $+ 5,068(g_2A_2 - g_4A_4) + 1,079(g_2F_2 - g_4F_4);$ $a_{23} = -3,071(g_3C_3 - g_4C_4) + 8,6(g_3S_3 - g_4S_4) +$ $+ 5,068(g_3A_3 - g_4A_4) + 1,079(g_3F_3 - g_4F_4);$ $b_2 = C_2S - (-3,071g_4C_4 + 8,6g_4S_4 + 5,068g_4A_4 + 1,079g_4F_4);$ $a_{31} = 2,65(g_1A_1 - g_4A_4) + 1,351(g_1F_1 - g_4F_4);$ $a_{32} = 2,65(g_2A_2 - g_4A_4) + 1,351(g_2F_2 - g_4F_4);$ $a_{33} = 2,65(g_3A_3 - g_4A_4) + 1,351(g_3F_3 - g_4F_4);$ $b_3 = C_3A + C_4AF - (2,65g_4A_4 + 1,351g_4F_4)$

1	2	3
3	C_3S, C_3A	$a_{11} = 4,071(g_1C_1 - g_3C_3) - 7,6(g_1S_1 - g_3S_3) -$ $- 6,718(g_1A_1 - g_3A_3) - 1,43(g_1F_1 - g_3F_3);$ $a_{12} = 4,071(g_2C_2 - g_3C_3) - 7,6(g_2S_2 - g_3S_3) -$ $- 6,718(g_2A_2 - g_3A_3) - 1,43(g_2F_2 - g_3F_3);$ $b_1 = C_3S - (4,071g_3C_3 - 7,6g_3S_3 - 6,718g_3A_3 - 1,43g_3F_3);$ $a_{21} = 2,65(g_1A_1 - g_3A_3) - 1,692(g_1F_1 - g_3F_3);$ $a_{22} = 2,65(g_2A_2 - g_3A_3) - 1,692(g_2F_2 - g_3F_3);$ $b_2 = C_3A - (2,65g_3A_3 - 1,692g_3F_3)$

Примечание. C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF и C, S, A, F – заданные значения минералогического и химического состава.

При обжиге клинкера на зольном топливе в расчетах необходимо учитывать присадку золы, которая может полностью или частично входить в состав клинкера [184]. С учетом присадки золы топлива уравнение материального баланса прокаленных компонентов в клинкере примет вид

$$\sum_{i=1}^N y_i + q = 1, \text{ или } y_N = \sum_{i=1}^{N-1} y_i - q, \quad (11.16)$$

а содержание оксида Z в клинкере

$$Z = \sum_{i=1}^N g_i Z_i y_i + Z_n q = \sum_{i=1}^{N-1} g_i Z_i y_i + g_N Z_N \left(1 - \sum_{i=1}^{N-1} y_i - q \right) + Z_n q, \quad (11.17)$$

где Z_n – содержание оксида в присадке; q – массовая доля присадки в клинкере.

Например, коэффициенты системы уравнений (11.14) для расчета присадочного клинкера по его КН и n будут следующими:

$$a_{11} = 2,8KH(g_1S_1 - g_3S_3) + 1,65(g_1A_1 - g_3A_3) +$$

$$+ 0,35(g_1F_1 - g_3F_3) - (g_1C_1 - g_3C_3);$$

$$a_{12} = 2,8KH(g_2S_2 - g_3S_3) + 1,65(g_2A_2 - g_3A_3) + \\ + 0,35(g_2F_2 - g_3F_3) - (g_2C_2 - g_3C_3);$$

$$b_1 = g_3C_3 - (2,8KHg_3S_3 + 1,65g_3A_3 + 0,35g_3F_3) - \\ - q [2,8KH(g_{п}S_{п} - g_3S_3) + 1,65(g_{п}A_{п} - g_3A_3) + \\ + 0,35(g_{п}F_{п} - g_3F_3) - (g_{п}C_{п} - g_3C_3)];$$

$$a_{21} = n(g_1A_1 - g_3A_3 + g_1F_1 - g_3F_3) - (g_1S_1 - g_3S_3);$$

$$a_{22} = n(g_2A_2 - g_3A_3 + g_2F_2 - g_3F_3) - (g_2S_2 - g_3S_3);$$

$$b_2 = g_3S_3 - n(g_3A_3 + g_3F_3) - q [n(g_{п}A_{п} - g_3A_3 + \\ + g_{п}F_{п} - g_3F_3) - (g_{п}S_{п} - g_3S_3)],$$

где $C_{п}$, $S_{п}$, $A_{п}$, $F_{п}$ – химический состав присадки золы топлива.

После решения систем уравнений могут быть получены отрицательные значения содержания компонентов; это означает, что из имеющихся сырьевых материалов клинкер с заданными характеристиками составить нельзя. Анализируя результаты, можно сделать вывод, каких соединений в сырье не хватает или как можно изменить характеристики расчета, чтобы получить сырьевую смесь (табл. 11.5).

Таблица 11.5

Рекомендации при невозможности проведения расчета

Отрицательное содержание компонента	Возможное изменение характеристик для расчета	Возможная замена или добавление материалов
1	2	3
Мел, известняк	Уменьшение коэффициента насыщения, степени основности, гидравлического модуля, титра, содержания силикатов	Добавление глинистого компонента
Глина	Увеличение коэффициента насыщения, степени основности, гидравлического модуля, титра, содержания силикатов	Добавление известкового компонента

1	2	3
Песок, трепел, диатомит	Повышение кремнеземного модуля	Замена компонента или добавление огарков, колошниковой пыли, железной руды
Огарки, железная руда, колошниковая пыль	Снижение кремнеземного или глиноземного модулей	Замена компонента или добавление бокситов, песка, трепела, диатомита
Бокситы	Снижение кремнеземного модуля или повышение глиноземного модуля	—

Дополнительно при расчете сырьевой смеси могут быть учтены ограничения на допустимые значения характеристик [196, 294]; технологические ограничения по производительности дозаторов и агрегатов [286]; уравнения динамики смешивания [285, 286]; учет случайных колебаний состава компонентов и флуктуации потоков [285, 295]; учет дискретности и запаздывания данных технологического контроля [285, 296].

11.4. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ И КЛИНКЕРА

Современные условия, в частности рост выпуска специальных цементов, перевод производства на энергосберегающие технологии, применение при приготовлении сырьевых смесей нетрадиционных и техногенных материалов, требуют увеличения числа характеристик, которым должны удовлетворять сырьевая смесь и получаемый из нее клинкер. В этом случае определение соотношения компонентов в сырьевой смеси уже не может производиться путем ее расчета, а требует применения методов оптимизации.

Хотя оптимизация состава сырьевых смесей в производственных расходах согласно работе [297] позволяет достигнуть значительного экономического эффекта, применяется она крайне редко. Вместе с тем за рубежом прослеживается четкая тенденция перехода на многокомпонентные шихты, так как они позволяют

более широко применять методы оптимизации, повышать качество цемента и снижать производственные расходы [297].

В отечественной науке задача оптимизации состава клинкера впервые была поставлена в работах С. М. Когана и развивалась Г. Б. Егоровом, С. Д. Макашевым, Л. И. Дворкиным, М. М. Сычевым и др. Необходимо отметить ускоренное развитие ее решения в последнее время в связи с использованием математических методов и ЭВМ [196, 298] и развитием системного подхода в моделировании процессов [5, 9, 298–300].

Для всех технологических схем производства цемента возможно использование единого критерия оптимизации, так как термины «мокрый», «сухой», «комбинированный» способы производства являются внешним отражением технологии, а не ее содержанием [301]. Критерии оптимальности и методы оптимизации цементной сырьевой смеси предлагаются в работах [196, 273, 282, 286, 294, 296–299, 301–304, 304–311]. Критерии имеют вид:

- суммы отклонений характеристик от заданных значений, в основном трех модульных характеристик КН, n , p или минералогического состава C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF ;

- технологических характеристик, основанных на минимизации топливопотребления или других энерготехнологических характеристик при обеспечении заданных характеристик сырья;

- энергетических и эксергетических показателей с учетом всех стадий переработки сырьевых смесей в клинкер;

- техноэкономических характеристик, представляющих собой себестоимость или ее разновидности или критерии, разработанные на основе функционально-стоимостного анализа процесса получения цемента.

Анализируя способы оптимизации цементной сырьевой смеси, можно выделить два подхода. Первый подход состоит в том, что в критерии оптимизации $K_{\text{опт}}$ производится приближение характеристик M_i к оптимальным значениям $M_{\text{опт}}$ с использованием квадратов отклонений и весовых коэффициентов k_i

$$K_{\text{опт}} = \sum_{i=1}^L k_i (M_i - M_{\text{опт}})^2 \rightarrow \min \quad (11.18)$$

при числе характеристик L , равном числу сырьевых компонентов или на единицу превышающем это число [196, 286, 307, 308]. Так, для двух- или трехкомпонентной сырьевой смеси производится оптимизация по КН, n , p , для четырехкомпонентной – по СаО, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ или по C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF. Необходимо отметить, что возможность использования минимизации отклонений характеристик от заданных значений определяется технологическими условиями и составом сырья. Для трехкомпонентной смеси возможно приближение трех характеристик КН, n , p к заданным значениям, которое обладает рядом технологических преимуществ по сравнению с неуправляемым изменением одного из модулей. Например, это позволяет значительно, до уровня погрешности приготовления сырьевого шлама, уменьшить колебания n и p при допустимом колебании КН [287, 312]. Для двухкомпонентной смеси оптимизация трех характеристик КН, n , p малоэффективна [210].

Другой подход заключается в формулировке критерия оптимизации и установке дополнительных ограничений в виде точных значений или интервала изменений модульных характеристик. Так, в работе [313] рассматриваются три случая при расчете сырьевой смеси уравнения, когда $n > m$, $n = m$, $n < m$, где n , m – соответственно число неизвестных и уравнений. В первом и третьем случае расчет сырьевой смеси преобразуется к задаче оптимизации с соответствующим критерием оптимизации.

Второй подход с теплотехнической точки зрения более целесообразен, так как для клинкера на диаграмме состояния характерна определенная область составов, в пределах которой клинкер обладает заданными свойствами, но значительно изменяются режимы и параметры технологического процесса [72, 184, 196]. Например, в работе [196] задача оптимизации ставится как нахождение области существования сырьевой смеси U согласно заданным допустимым интервалам изменения характеристик и минимизации характеристик M внутри области U . Из работ, использующих такой подход, можно выделить [301, 304, 309–311, 314], где оценка сырьевой смеси производится с учетом всего технологического процесса получения клинкера.

Оптимизация как в первом, так и во втором случае проводится численным методом обычно при наличии ряда ограничений, яв-

ляющихся нелинейными функциями от оптимизирующих факторов, что значительно усложняет выбор начальной точки и замедляет процесс сходимости расчета [315].

Несмотря на большое число работ, посвященных оптимизации сырьевых смесей и клинкера, данную задачу считать решенной нельзя [297]. Это вызвано трансформацией производственных условий – переходом к многокомпонентным сырьевым смесям, изменением сырьевой базы заводов, развитием вычислительной техники, что позволяет качественно усовершенствовать имеющиеся возможности для оптимизации [297]. Поэтому в настоящее время разработка методов оптимизации состава цементных сырьевых смесей и клинкера приобретает особую актуальность.

Оптимизация требует решения двух задач:

- разработки критерия оптимизации;
- выбора или разработки математического метода поиска оптимума.

Успех оптимизации и качество полученного решения определяет правильная постановка задачи. Поэтому первым этапом оптимизации является математическая формулировка ее цели, то есть разработка критерия оптимизации. Во многом его выбор эквивалентен выбору точки зрения на рассматриваемую задачу [316]. Критерий оптимизации технологического процесса должен соответствовать требованиям, приведенным в работах [316, 317]:

- достаточно комплексно и полно характеризовать эффективность процесса, что особенно актуально для сложных систем с большим количеством взаимовлияющих связей, для которых оптимизация отдельных частей малоэффективна;

- иметь количественное значение и реальный физический смысл, что позволит исключить ошибки в расчетах;

- определяться с необходимой точностью.

В работе [318] критерии оптимизации классифицированы по группам: 1) технологические; 2) термодинамические; 3) кинетические; 4) статистические; 5) экономические; 6) автоматического управления; 7) аппаратурные. Согласно работе [319], к первой группе относят критерии, включающие основные технологические параметры без учета технико-экономических показателей.

В работе [294] указывается, что критерий должен быть экономическим показателем, так как единого технического показателя не существует, но во многих случаях для экономического расчета отдельных стадий производства отсутствуют данные. Одним из комбинированных технико-экономических показателей является себестоимость, учитывающая производительность, расход топлива и качество продукции.

Математические методы, применяемые в оптимизации сырьевых смесей, рассмотрены в данном подразделе и разделе 13.

11.5. ПРИМЕНЕНИЕ В РАСЧЕТАХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ СТАНДАРТНЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

В последнее время для расчетов сырьевых смесей стали применять электронные таблицы Excel, входящие в пакет Microsoft Office [320, 321], и систему MathCad [322]. Электронные таблицы – это мощное средство для несложных расчетов и оптимизации, которым должен овладеть каждый инженер. Они позволяют создавать цепочку последовательных расчетов, а также автоматически устанавливать необходимое значение конечного результата путем подбора значений исходных данных.

Рассмотрим расчет сырьевой смеси в электронных таблицах Excel. В этой программе возможен ввод состава сырьевых компонентов, расчет коэффициентов систем уравнений и решение полученных систем. Но мы рассмотрим более универсальный и наглядный способ расчета, основанный на прямой постановке задачи расчета или оптимизации.

Поле электронной таблицы составлено из ячеек. Каждая ячейка имеет свой адрес, образованный из номера столбца (латинских букв *A, B, C, ...*) и номера строки (цифр *1, 2, 3, ...*). Например, адрес левой верхней ячейки *A1*. В ячейки электронных таблиц могут быть введены числа, текст и формулы. Вид десятичного разделителя в числах (точка или запятая) зависит от настроек Windows. Формулы начинаются с символа « = », после которого следует математическое выражение, которое может включать цифры, имеющиеся в электронной таблице, функции и адреса других ячеек. Таким образом, в формуле возможен расчет с использованием данных, помещенных в других ячейках.

На рис. 11.2 представлен расчет характеристик клинкера по его химическому составу. В ячейки столбца А введен поясняющий текст. В ячейки В2, В3, В4, В5 введен состав клинкера. В ячейку В6 помещена функция, вычисляющая сумму чисел в ячейках В2, В3, В4, В5 (обозначенных как диапазон В2:В5). В ячейки В9:В12 и В14:В17 введены формулы для расчета модульных характеристик и минералогического состава клинкера с использованием данных ячеек В2: В5. На рис. 11.2 изображены сами формулы, но обычно в электронных таблицах вместо введенной формулы в ячейке показывается результат расчета, а сама формула текущей ячейки становится видна и доступна для изменения в специальной строке формул, расположенной над полем таблицы (рис. 11.3).

	А	В	С	Д	Е
1	Химический состав клинкера				
2	CaO	67,0			
3	SiO ₂	22,0			
4	Al ₂ O ₃	6,0			
5	Fe ₂ O ₃	5,0			
6	Сумма	=СУММ(В2:В5)			
7					
8	Модульные характеристики				
9	КН	=(В2-1,65*В4-0,35*В5)/(2,8*В3)			
10	п	=В3/(В4+В5)			
11	р	=В4/В5			
12					
13	Минералогический состав				
14	C ₃ S	=4,071*В2-7,6*В3-6,718*В4-1,43*В5			
15	C ₂ S	=8,6*В3+5,068*В4+1,079*В5-3,071*В2			
16	C ₃ A	=2,65*В4-1,692*В5			
17	C ₄ AF	=3,043*В5			
18	Сумма	=СУММ(В14:В17)			

Рис. 11.2. Формулы для расчета характеристик клинкера

	А	В	С	Д	Е
B10 = =B3/(B4+B5)					
1	Химический состав клинкера				
2	CaO	67,0			
3	SiO ₂	22,0			
4	Al ₂ O ₃	6,0			
5	Fe ₂ O ₃	5,0			
6	Сумма	100,0			
7					
8	Модульные характеристики				
9	КН	0,90			
10	п	2			
11	р	1,2			

Рис. 11.3. Вид экрана при расчете характеристик клинкера

Для наглядности любой ячейке может быть дано имя, которое может состоять из латинских и русских букв и цифр, но не должно быть сходно с адресами ячеек и именами столбцов. Чтобы дать ячейке имя, необходимо ее выбрать, с помощью щелчка мыши перейти на поле с адресом ячейки, расположенном слева от строки формул (см. рис. 11.3), и ввести вместо адреса имя ячейки. Теперь введенное имя можно использовать вместо адреса ячейки.

Имена могут быть заданы для целых строк и столбцов. Для этого строку или столбец необходимо выделить, щелкнув мышкой на их номере, расположенном над ячейками или слева от ячеек, и в поле адреса ввести имя. Теперь при применении в формулах имени строки или столбца будет использовано значение из ячейки, находящейся в этой строке или столбце напротив ячейки с формулой (рис. 11.4).

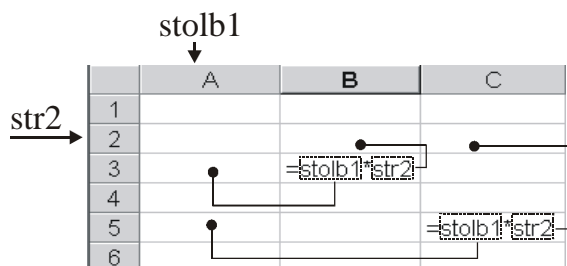


Рис. 11.4. Ссылки на имена столбцов и ячеек

Для расчета сырьевой смеси введем в электронную таблицу составы сырьевых компонентов, их доли в сырьевой смеси и рассчитаем составы смеси и клинкера. Пример формул для расчета трехкомпонентной смеси представлен на рис 11.5. В таблице заданы имена:

для столбцов *B, C, D*..... k_1, k_2, k_3 ;

для ячейки *E7*..... *PPP*;

для ячеек *F3, F4, F5, F6*..... C_k, S_k, A_k, F_k ;

для ячеек *B11, C11, D11*..... x_1, x_2, x_3 .

В ячейках *B11, C11* задано содержание в сырьевой смеси первого и второго компонентов (первоначально их можно задать

приблизительно), содержание третьего рассчитывается через условие равенства содержания всех компонентов единице. В ячейках E3:E6 по составу сырьевых компонентов и долям компонентов рассчитывается состав сырьевой смеси, а в ячейках F3:F6 по составу и потерям при прокаливании сырьевой смеси рассчитывается состав клинкера. В ячейки B14:B22 помещены формулы для расчета по химическому составу клинкера его модульных характеристик, минералогического состава и теплового эффекта клинкерообразования.

Для проведения расчета в ячейках E14 и E15 заданы требуемые значения модулей клинкера. Так как смесь трехкомпонентная, заданы два значения. В ячейки F14 и F15 введены формулы расчета квадрата отклонений заданных значений от значений, рассчитанных по составу клинкера. Сумма отклонений по всем характеристикам рассчитана в ячейке F13.

	A	B	C	D	L	I
1		Сырьевые компоненты		Сырьевая		Клинкер
2		Мол	Линк	СГЗСМ	смесь	
3	CaO	53,43	2,33	0,88	=x1*x1+x2*x2+z*x3*x3	=E3*(1-0,01-PPR)
4	SiO2	2,08	69,08	18,56	=x1*x1+x2*x2+z*x3*x3	=F4*(1-0,01-PPR)
5	Al2O3	0,92	14,3	3,43	=x1*x1+x2*x2+z*x3*x3	=F5*(1-0,01-PPR)
6	Fe2O3	0,22	6,23	22,12	=x1*x1+x2*x2+z*x3*x3	=F6*(1-0,01-PPR)
7	ПП	48,3	8,13	0	=x1*x1+x2*x2+z*x3*x3	
8	Сумма	100	100	100	=СУММ(D3:D7)	=СУММ(F3:F7)
9						
10	Содержание в сырьевой смеси					
11	x	0,736	0,190	-1-E11-C1		
12						
13	Характеристики и модули клинкера					
14		Плотность		Энтальпия		Склонение
15	П	=(C4*1,35*Ak+0,35*Pk)/2,3*Sk		=C15		=C15-B*5*2
16	Г	=Sk*(A+Pk)		=2,5		=C16-B*3*2
17	С	=Ak*Pk				
18	Сдс	=4,07*Ск+7,9*Sk+0,7*8*Ak+1,43*Pk				
19	Сдс	=6,6*Ск+5,366*Ak+1,078*Pk+3,071*Ск				
20	СдА	=2,65*Ak+1,382*Pk				
21	СдА	=0,437*Pk				
22	ТЭК	=4052*PPR*(100-PPR)+0,48*Ск+21,38*Sk+0,64*Ak+1,94*Pk				

Рис. 11.5. Формулы для расчета трехкомпонентной сырьевой смеси

Задачей расчета сырьевой смеси в приведенной модели является подбор таких значений x_1 и x_2 , чтобы характеристики клинкера не отличались от заданных, то есть, чтобы сумма отклонений была равна нулю. В электронных таблицах Excel это возможно выполнить с помощью команды «Поиск решения», расположенной в разделе меню «Сервис» (данная команда имеет-

ся, если при установке программы выбран компонент «Excel/Надстройки/Поиск решения»).

После вызова команды в диалоговом окне задаются параметры поиска решения (рис. 11.6):

- «Установить целевую ячейку» – указывается адрес ячейки, содержащей сумму квадратов отклонений;
- «Равной» – при проведении оптимизации указывается, что целевую ячейку надо минимизировать, при проведении расчета – необходимо установить ее значение, равное нулю;
- «Изменяя ячейки» – указываются ячейки, которые необходимо изменять для получения решения, то есть ячейки с содержанием первого и второго компонентов (содержание третьего компонента в приведенном расчете определяется через содержания первых двух);
- «Ограничения» – задаются условия неотрицательности содержания всех трех компонентов.

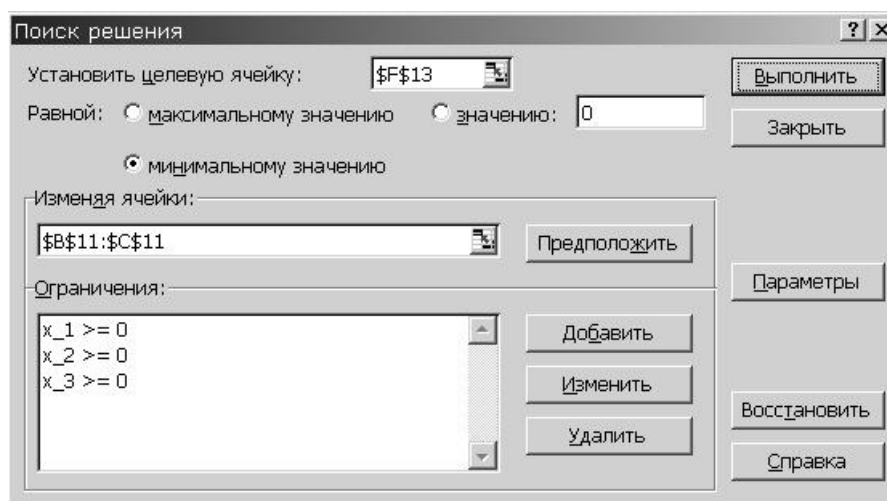


Рис. 11.6. Параметры поиска решения при расчете сырьевой смеси

После нажатия кнопки «Выполнить» производится поиск решения, при его успешном окончании в таблице будут находиться результаты поиска. Пример расчета смеси приведен на рис. 11.7.

	A	B	C	D	E	F
1		Сырьевые компоненты			Сырьевая смесь	Клинкер
2		Мгн	Тлине	Огзжк		
3	CaO	59,48	2,55	0,58	45,15	67,90
4	SiO ₂	2,18	68,08	18,56	11,47	92,14
5	Al ₂ O ₃	0,92	14,9	3,43	3,30	5,34
6	Fe ₂ O ₃	0,22	0,25	79,18	2,21	3,31
7	ТПП	43,3	0,46	0	36,17	0,00
8	Сумма	100	100	100	100	100
9						
10	Содержание в сырьевой смеси					
11	а	0,298	0,190	0,019		
12						
13	Характеристики и модули клинкера					
14		Расчетные			Заданные	Отклонение
15	КН	0,580			0,62	0,00
16	Г	2,50			2,5	0,00
17	Г	1,56				
18	С ₂ S	56,9				
19	С ₂ S	25,9				
20	С ₃ A	8,8				
21	С ₄ A	11,0				
22	ЭК	814				

Рис. 11.7. Результаты расчета сырьевой смеси по КН и n

Аналогичным образом может быть произведено приближение состава сырьевой смеси по минералогическому составу клинкера. Для этого в столбец *E* вводится требуемое содержание минералов, в столбец *F* – квадраты отклонений заданных значений от расчетных. Формула суммы отклонений может не изменяться, так как она в приведенном примере охватывает все возможные ячейки. Так как для трехкомпонентной смеси заданы четыре характеристики, задача является не расчетом, а оптимизацией, в результате которой будет получено решение, наиболее близкое к требуемому. Поэтому в параметрах поиска решения необходимо выбирать опцию минимизации целевой ячейки, а не равенства ее нулю. Результаты расчета в этом случае приведены на рис. 11.8.

При оптимизации для каждой характеристики могут быть заданы весовые коэффициенты, характеризующие степень их важности. Отклонения в этом случае будут равны произведению весового коэффициента и квадрата разности заданной и расчетной величины.

Если необходимо произвести минимизацию одной из характеристик, например теплового эффекта клинкерообразования, в параметрах поиска решения необходимо задать:

- «Установить целевую ячейку» – указывается адрес ячейки, содержащей минимизируемую характеристику;

- «Равной» – указывается, что целевую ячейку надо минимизировать (возможен также поиск максимума);
- «Ограничения» – дополнительно к условию неотрицательности содержания всех трех компонентов задаются необходимые значения характеристик клинкера и устанавливаются ограничения на изменения характеристик.

	A	B	C	D	E	F
1		Сырьевые компоненты			Сырьевая	Клинкер
2		Мел	Глина	Огарки	смесь	
3	CaO	53,48	2,33	0,88	42,91	66,97
4	SiO ₂	2,08	68,08	16,56	14,56	22,72
5	Al ₂ O ₃	0,92	14,9	3,43	3,55	5,54
6	Fe ₂ O ₃	0,22	6,23	79,13	3,05	4,76
7	ППП	43,3	8,46	0	35,93	0,00
8	Сумма	100	100	100	100	100
9						
10	Содержание в сырьевой смеси					
11	x	0,794	0,184	0,022		
12						
13	Характеристики и модули клинкера					3,90
14		Расчетные			Заданные	Отклонение
15	КН	0,883				
16	n	2,21				
17	p	1,16				
18	C ₃ S	55,9			55	0,80
19	C ₂ S	23,0			22	0,97
20	C ₃ A	6,6			8	1,87
21	C ₄ AF	14,5			15	0,26
22	ТЭК	1797				

Рис. 11.8. Результаты расчета сырьевой смеси по минералогическому составу клинкера

Пример параметров поиска решения для минимизации теплового эффекта клинкерообразования представлен на рис. 11.9.

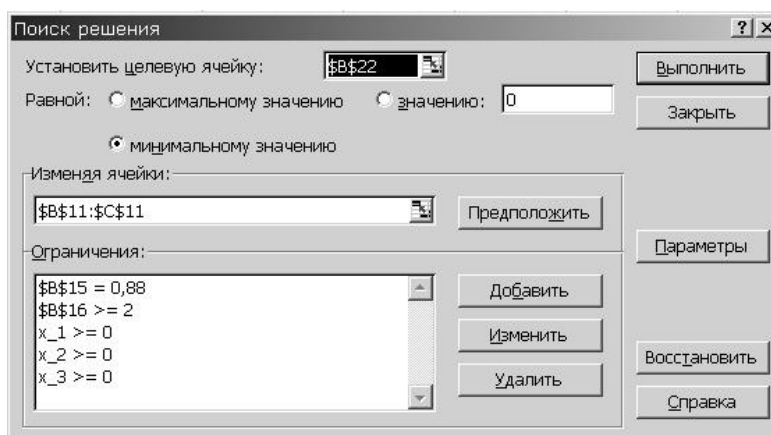


Рис. 11.9. Параметры поиска решения при минимизации теплового эффекта клинкерообразования

В ограничениях дополнительно задано точное значение коэффициента насыщения клинкера 0,88 и ограничение на значение кремнеземного модуля, который должен быть больше двух. В связи с тем, что смесь трехкомпонентная, при оптимизации может быть задано только точное значение одной характеристики, так как при задании точных значений двух характеристик оптимизация превращается в расчет.

Пример сырьевой смеси с минимально возможным тепловым эффектом клинкерообразования представлен на рис. 11.10.

	A	B	C	D	E	F
1		Сырьевые компоненты			Сырьевая	Клинкер
2		Мел	Глина	Огарки	смесь	
3	CaO	53,48	2,33	0,88	42,66	66,34
4	SiO ₂	2,08	68,08	16,56	14,43	22,44
5	Al ₂ O ₃	0,92	14,9	3,43	3,52	5,47
6	Fe ₂ O ₃	0,22	6,23	79,13	3,70	5,75
7	ППП	43,3	8,46	0	35,70	0,00
8	Сумма	100	100	100	100	100
9						
10	Содержание в сырьевой смеси					
11	x	0,789	0,180	0,030		
12						
13	Характеристики и модули клинкера					
14		Расчетные				
15	КН	0,880				
16	n	2,00				
17	p	0,95				
18	C ₃ S	54,5				
19	C ₂ S	23,2				
20	C ₃ A	4,8				
21	C ₄ AF	17,5				
22	ТЭК	1778				

Рис. 11.10. Результаты расчета сырьевой смеси с минимальным эффектом клинкерообразования

Приведенный пример расчета может быть расширен:

- в него могут быть добавлены новые компоненты и статьи химического состава, учтена присадка золы топлива к клинкеру;
- содержание отдельных компонентов может задаваться, а не рассчитываться; для этого их не надо включать в параметр «Изменяя ячейки»;
- могут быть добавлены новые характеристики сырьевой смеси и клинкера;
- может быть введен другой минералогический состав клинкера.

Как показывает приведенный пример расчета, во многих случаях электронные таблицы могут заменить процесс программирования. Но круг их применения ограничен несложными задачами. В расчетах сырьевых смесей электронные таблицы позволяют создать ряд фиксированных вариантов расчета, но любое изменение требует разработки нового варианта или исправления имеющегося.

Главный недостаток существующих программ оптимизации сырьевых смесей и электронных таблиц – применение стандартных методов поиска оптимума функции нескольких переменных, которые неэффективны для многокомпонентных систем цементной технологии. Это связано со следующим:

- 1) оптимизируемые факторы не являются независимыми;
- 2) ограничения задаются не для факторов, а для нелинейных функций от них;
- 3) имеется ряд ограничений – равенств, снижающих степень свободы системы.

Так, исходя из нашего опыта, оптимизация в электронных таблицах при большом (более 4–5) числе ограничений, как правило, заканчивалась неудачно (с сообщением о невозможности найти решение или выдачей не наилучшего результата), хотя альтернативные методы позволяли найти решение.

Следует отметить также и то, что электронные таблицы предназначены только для расчета и не позволяют реализовать выдачу рекомендаций по составлению сырьевых смесей или автоматизировать исследования. Это утверждение относится к стандартному использованию электронных таблиц; встроенный язык программирования Visual Basic for Application, конечно, позволяет расширить круг их применения, но это требует разработки отдельных программ.

Все перечисленные особенности относятся и к математической системе MathCad, которая, в отличие от электронных таблиц, обладает более высокой наглядностью расчетов, представляемых в естественном виде, но, как и электронные таблицы, позволяет создавать только фиксированные варианты расчета, при этом она характеризуется неэффективностью для сложных задач методами поиска оптимума.

11.6. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ В ТЕХНОЛОГИИ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Современные условия, в частности использование нетрадиционного сырья, техногенных продуктов и добавок, увеличение числа стадий смешения и сырьевых компонентов, применение при обжиге многозольного топлива, требуют дальнейшего развития методов расчета и оптимизации сырьевых смесей и клинкера, расширения существующих наборов их характеристик. Разработка для перечисленных случаев методик расчета в существующем в настоящее время виде требует создания множества новых систем уравнений для каждого варианта расчета, причем в связи с большим числом вариантов создание полной базы систем уравнений не представляется реальным. Таким образом, необходима формализация и объединение существующих в настоящее время методик расчета и корректирования сырьевых смесей.

Область существования цементного клинкера составляет локальный участок диаграммы, кроме того, введение ограничений значительно повышает адекватность получаемых моделей [14, 323]. Поэтому задачи исследования и оптимизации цементных сырьевых смесей требуют использования методов математического описания локальных областей симплекса согласно задаваемым по отношению к сырьевым смесям и клинкеру ограничениям и методов планирования эксперимента на симплексе. Такие методы достаточно хорошо разработаны для металлургического производства [266, 324], но применительно к технологии силикатных строительных материалов они практически не рассматривались.

12. ФОРМАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Расчет состава многокомпонентных сырьевых смесей заключается в определении соотношения компонентов в смеси, обеспечивающего получение продукта с заданными свойствами. В настоящее время в цементной промышленности для расчета состава сырьевых смесей используется набор стандартных систем линейных уравнений. Они созданы для расчета сырьевых смесей с числом компонентов от двух до четырех при наличии или отсутствии присадки золы топлива к материалу во время обжига [27, 292]. Увеличение количества сырьевых компонентов и присадок, числа характеристик клинкера, по которым ведется расчет, требуют разработки новых систем уравнений для каждого варианта.

В данном разделе предлагается метод создания систем линейных уравнений для расчета состава многокомпонентных сырьевых смесей. Он позволяет получать системы уравнений для расчета смесей с любым числом сырьевых компонентов, учитывать избирательный унос и любое количество присадок к материалу во время обжига.

12.1. ОБОЗНАЧЕНИЕ СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ

Химический состав цементных материалов характеризуется содержанием соединений, представленных в виде оксидов, и потерями при прокаливании ППП. Массовое процентное содержание оксида в материале (статью химического состава) обозначим символом S . Индексы характеризуют название статьи (номер оксида в множестве статей химического состава) и материал (числа от 1 и выше соответствуют компоненту сырьевой смеси, индекс «с» – сырьевой смеси, индекс «кл» – цементному клинкеру, прочие индексы идентифицируют иные материалы – присадку, унос и т.п.). Отсутствие соответствующих индексов означает возможность использования любого оксида данного материала, нижнего индекса – что формула применима к любому материалу. Пример обозначения химического состава приведен в табл. 12.1.

Химический состав сырья и клинкера

Материал	Химический состав						Потери при прокаливании
	CaO (№ 1)	Al ₂ O ₃ (№ 2)	Fe ₂ O ₃ (№ 3)	SiO ₂ (№ 4)	MgO (№ 5)	Прочее (№ 6)	
Сырьевые компоненты:							
первый	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	ППП ₁
второй	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}	S_{26}	ППП ₂
третий	S_{31}	S_{32}	S_{33}	S_{34}	S_{35}	S_{36}	ППП ₃
Сырьевая смесь	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}	S_{c6}	ППП _c
Клинкер	$S_{кл1}$	$S_{кл2}$	$S_{кл3}$	$S_{кл4}$	$S_{кл5}$	$S_{кл6}$	—

12.2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Характеристики M цементных материалов выражаются через содержание оксидов. К характеристикам в работе отнесены минералогический и химический составы, а также модульные характеристики (включающие показатели насыщения материала известью). Все перечисленные характеристики можно представить в обобщенном виде:

$$M = \frac{k'_0 + \sum_{j=1}^{N_s} k'_j S_j}{k''_0 + \sum_{j=1}^{N_s} k''_j S_j}, \quad (12.1)$$

где k'_0 , k'_i , k''_0 , k''_i – коэффициенты; N_s – количество статей в химическом составе.

Выражение (12.1) преобразуется к линейному виду:

$$b_1 S_1 + b_2 S_2 + \dots + b_{N_s} S_{N_s} = b_0, \quad (12.2)$$

где b_1, b_2, \dots, b_{N_s} – коэффициенты; b_0 – свободный член.

В выражении (12.2) могут быть представлены не все оксиды (полагая коэффициенты перед отсутствующими оксидами равными нулю). Для модульных характеристик свободный член b_0 равен 0.

Левую часть (12.2) далее обозначим как $T(S)$:

$$T(S) = \sum_{j=1}^{N_s} b_j \times S_j. \quad (12.3)$$

Например, кремнеземному модулю $n = S/(A+F)$ соответствует выражение $T(A, F, S) = nA + nF - S$ и свободный член $b_0 = 0$; содержанию в клинкере трехкальциевого алюмината $C_3A = 2,65(A - 0,638F) -$ выражение $T(A, F) = 2,65A - 1,69F$ и свободный член $b_0 = C_3A$, где S, A, F – оксиды химического состава клинкера.

12.3. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ УРАВНЕНИЕ РАСЧЕТА ПРИ ОТСУТСТВИИ ПРИСАДКИ ЗОЛЫ ТОПЛИВА

Рассмотрим частный случай расчета сырьевой смеси по модульным характеристикам клинкера при отсутствии присадки золы топлива к сырью при обжиге. При этом величина любого модуля клинкера M равна аналогичному модулю сырьевой смеси M_c . С учетом $M = M_c$ и равенства нулю свободного члена b_0 выражение (12.2) примет следующий вид:

$$\sum_{j=1}^{N_s} b_j S_{c j} = 0. \quad (12.4)$$

Выразим содержание j -го оксида $S_{c j}$ сырьевой смеси через содержание соответствующих оксидов $S_{i j}$ в компонентах, входящих в смесь, при условии, что массовая часть N -го компонента в сухой смеси равна 1:

$$S_{c j} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (S_{i j} x_{c i} + S_{N j})}{\sum_{i=1}^{N-1} (x_{c i} + 1)} 100\%, \quad (12.5)$$

где N – общее число компонентов в сырьевой смеси; x_{ci} – массовая часть, приходящаяся на i -й непрокаленный компонент в сухой смеси; S_{Nj} – содержание j -го оксида в N -м компоненте.

Подставляя выражение (12.5) в уравнение (12.4) и проводя преобразования, заключающиеся в сокращении общего знаменателя и группировки членов около неизвестных x_{ci} , получаем

$$\sum_{i=1}^{N-1} \left(x_{ci} \sum_{j=1}^{N_s} b_j S_{ij} \right) = - \sum_{j=1}^{N_s} b_j S_{Nj}. \quad (12.6)$$

Видно, что в выражение (12.6) входит в выражение (12.3). Вводя их в (12.6) имеем:

$$\sum_{i=1}^{N-1} T(S_i) x_{ci} = - T(S_N), \quad (12.7)$$

где $T(S_i)$ и $T(S_N)$ – выражение (12.3), в котором в качестве аргументов входит содержание оксидов в i -м и N -м компонентах.

Выражение (12.7) является формализованным уравнением, в котором дана зависимость состава сырьевой смеси от модульной характеристики, на основании которой построено функциональное выражение $T(S_i)$. При заданном химическом составе сырьевых компонентов функции $T(S_i)$ являются константами. Таким образом, уравнение (12.7) является линейным уравнением с $N-1$ неизвестными, которыми являются части x_{ci} непрокаленных компонентов в сухой смеси. Используем различные характеристики (модули) клинкера общим числом $N-1$. Получив из этих характеристик на основании уравнения (12.7) зависимости $T(S)$, можно составить систему из $N-1$ линейных уравнений. Решая систему, находим неизвестные x_{ci} .

В качестве примера рассмотрим составление системы уравнений для расчета трехкомпонентной сырьевой смеси по гидравлическому модулю

$$m = \frac{C}{S + A + F} \quad (12.8)$$

и глиноземному модулю

$$p = \frac{A}{F}. \quad (12.9)$$

Подставляя выражения

$$T_m(C, S, A, F) = m(S + A + F) - C \quad (12.10)$$

и

$$T_p(A, F) = p \times F - A \quad (12.11)$$

в формализованное уравнение (12.7), получаем систему из двух линейных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[m(S_1 + A_1 + F_1) - C_1 \right] x_{c1} + \left[m(S_2 + A_2 + F_2) - C_2 \right] x_{c2} = \\ \qquad \qquad \qquad = C_3 - m(S_3 + A_3 + F_3); \\ \left[pF_1 - A_1 \right] x_{c1} + \left[pF_2 - A_2 \right] x_{c2} = A_3 - pF_3, \end{array} \right. \quad (12.12)$$

из которой можно найти содержание непрокаленных частей первого и второго компонентов x_{c1} и x_{c2} (содержание третьего компонента x_{c3} равно 1).

12.4. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ УРАВНЕНИЕ РАСЧЕТА ПРИ НАЛИЧИИ ПРИСАДОК К КЛИНКЕРУ

Формализованное уравнение (12.7) является частным, для получения универсального уравнения необходимо производить расчет по характеристикам клинкера, обеспечить учет свободного члена b_0 выражения (12.2) и ввести учет присадки (материала, содержание которого в клинкере задано).

Химический состав клинкера выражается через химический состав прокаленных сырьевых компонентов и доли этих компонентов в клинкере x_i . В связи с наличием свободного члена и невозможностью сократить знаменатель выражения (12.5) доля

N -го компонента выражается через содержание остальных компонентов:

$$x_N = 1 - \sum_{i=1}^{N-1} x_i, \quad (12.13)$$

и содержание оксида $S_{\text{кл}j}$ в клинкере определится через j -е оксиды сырьевых компонентов следующим образом:

$$S_{\text{кл}j} = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{100 S_{ij}}{100 - \text{ППП}_i} x_i + \frac{100 S_{Nj}}{100 - \text{ППП}_N} (1 - x_1 - x_2 - \dots - x_{N-1}). \quad (12.14)$$

Группируя члены вокруг неизвестных x_i , получаем

$$S_{\text{кл}j} = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{100 S_{ij}}{100 - \text{ППП}_i} - \frac{100 S_{Nj}}{100 - \text{ППП}_N} \right) x_i + \frac{100 S_{Nj}}{100 - \text{ППП}_N}. \quad (12.15)$$

Для упрощения формул введем понятие «пересчитанного» содержания оксида в сырьевом компоненте \bar{S}_{ij} , которое для j -го оксида будет иметь вид

$$\bar{S}_{ij} = \left\{ \left[\frac{100 S_{ij}}{100 - \text{ППП}_i} - \frac{100 S_{Nj}}{100 - \text{ППП}_N} \mid i = 1 \dots N-1 \right] \wedge \right. \\ \left. \wedge \left[\frac{100 S_{Nj}}{100 - \text{ППП}_N} \mid i = 1 \right] \right\}. \quad (12.16)$$

После этого выражение (12.15) примет вид

$$S_{\text{кл}j} = \sum_{i=1}^{N-1} \bar{S}_{ij} \cdot x_i + \bar{S}_{Nj} \quad (12.17)$$

и станет подобно числителю выражения для оксидов сырьевой смеси (12.5).

Проводя преобразование, аналогичное использованному в выражениях (12.6) и (12.7), но с учетом свободного члена b_0 , получаем формализованное уравнение для расчета сырьевой смеси бесприсадочного клинкера по любой характеристике, описываемой выражением (12.1):

$$\sum_{i=1}^{N-1} T(\bar{S}_{ij}) \cdot x_i = b_0 - T(\bar{S}_{Nj}). \quad (12.18)$$

В качестве характеристик, которые используются в расчете, в выражении (12.18) наравне с модулями могут присутствовать минералы и оксиды клинкера. В расчете может быть учтено наличие нескольких присадок, входящих в клинкер. Тогда для R присадок формализованное уравнение примет вид

$$\sum_{i=1}^{N-1} T(\bar{S}_{ij}) x_i = \frac{b_0 - \sum_{k=1}^R T(\bar{S}_{пр k}) q_{пр k}}{1 - \sum_{k=1}^R q_{пр k}} - T(\bar{S}_{Nj}), \quad (12.19)$$

где $\bar{S}_{пр k}$ – «пересчитанное» содержание k -го оксида в прокаленной присадке, мас. %; $q_{пр k}$ – массовая доля k -й присадки в клинкере.

Тип присадки учитывается знаком перед величиной $q_{пр}$. Так, для выборочного пылеуноса или частично отбираемого материала необходимо задавать отрицательное $q_{пр}$.

В качестве характеристик клинкера, по которым проводится его расчет, возможно использование химического и минералогического составов, общепринятых (КН, n , p) и иных модульных характеристик.

12.5. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ УРАВНЕНИЕ КОРРЕКТИРОВАНИЯ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Корректирование является одним из этапов приготовления цементных сырьевых смесей. Особенность процесса корректирования состоит в возможном использовании титра T , являющегося характеристикой сырьевой смеси, которая не может быть применена к клинкеру. Титр сырьевой смеси T_c , выраженный через титр сырьевых компонентов T_i и доли прокаленных сырьевых компонентов в клинкере x_i , имеет вид

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{T_i \cdot x_i}{100 - \text{ППП}_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{x_i}{100 - \text{ППП}_i}}, \quad (12.20)$$

причем наличие присадки при обжиге в выражении (12.20) не учитывается, так как сумма долей компонентов приводится к 1.

После преобразования выражения (12.20) имеем

$$\sum_{i=1}^N \frac{(T_i - T_c) x_i}{100 - \text{ППП}_i} = 0. \quad (12.21)$$

Если долю N -го компонента x_N выразить через доли остальных компонентов и величину присадки в клинкере, то получим линейное уравнение, которое может быть использовано в системах уравнений корректирования цементной сырьевой смеси:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_i - T_c}{100 - \text{ППП}_i} - \frac{T_N - T_c}{100 - \text{ППП}_N} \right) x_i = \\ = - \frac{T_N - T_c}{100 - \text{ППП}_N} \left(1 - \sum_{k=1}^R q_{\text{пр } k} \right) \end{aligned} \quad (12.22)$$

Отличие формализованного уравнения (12.22) от уравнения (12.19) заключается в том, что первое из них применяется при расчете по характеристикам цементного клинкера, а второе – по

характеристикам цементной сырьевой смеси. Уравнение (12.22) может быть обобщено для всех характеристик цементных сырьевых смесей P_c , обладающих признаком аддитивности по отношению к таким же характеристикам компонентов сырьевой смеси P_i . Таким образом, формализованное уравнение для расчета цементной сырьевой смеси по их свойствам имеет вид

$$\sum_{i=1}^{N-1} T(\bar{P}_i) x_i = -T(\bar{P}_{Nj}) \left(1 - \sum_{k=1}^R q_{\text{пр } k} \right) \quad (12.23)$$

где \bar{P}_i – «пересчитанное» аналогично выражению (14.21) свойство P_i .

Уравнения (12.19) и (12.23) могут быть использованы в любом сочетании, что обеспечивает создание систем линейных уравнений для расчета по характеристикам сырьевой смеси и клинкера одновременно.

Например, в настоящее время в отечественной промышленности для корректирования цементных сырьевых смесей используется титр, отражающий содержание в сырье карбонатов кальция и магния. В образовании клинкерных минералов участвует только оксид кальция, и поэтому титр не полностью характеризует минералогический состав получаемого клинкера. В США в расчетах и корректировании сырьевых смесей применяется в основном содержание карбоната кальция, а титр используется только при постоянном содержании MgCO_3 в сырьевых компонентах [195]. Так как карбонат магния в сырье обычно входит в состав доломита, целесообразно производить корректирование не по титру, а по расчетному содержанию CaCO_3 :

$$\text{CaCO}_3 = T_c - 2,483 \cdot \text{MgO}_c, \quad (12.24)$$

где T_c – титр сырьевой смеси; MgO_c – содержание оксида магния в сырьевой смеси.

Характеристике (12.24) соответствует выражение

$$T(P) = T - 2,483 \cdot \text{MgO} \quad (12.25)$$

и свободный член CaCO_3 – заданное содержание карбоната кальция в сырьевой смеси.

Выражение (12.25) может применяться для составления уравнений корректирования по нескольким характеристикам, например по содержанию в сырьевой смеси CaCO_3 и кремнеземного или глиноземного модулей. В частности, при корректировании только по заданному значению CaCO_3 соотношение расхода корректирующего компонента x_k и корректируемой сырьевой смеси x_c будет иметь вид

$$\frac{x_k}{x_c} = \frac{T_c - 2,483 \cdot \text{MgO}_c - \text{CaCO}_3}{\text{CaCO}_3 - T_k + 2,483 \cdot \text{MgO}_k}, \quad (12.26)$$

где T_c и T_k – титры корректируемой сырьевой смеси и корректирующего компонента; MgO_c и MgO_k – содержание оксида магния в корректируемой сырьевой смеси и корректирующем компоненте.

* * *

В данном разделе описан вывод формализованных уравнений, используемых в дальнейшем в различных задачах расчета и оптимизации многокомпонентных сырьевых смесей. Предлагаемая методика предназначена для разработки математического описания информационных средств для технологии силикатных материалов. Она позволяет расширить возможности расчета, проводить его не по определенному количеству вариантов, а произвольно и неограниченно устанавливая число компонентов, выбирая любое сочетание задаваемых характеристик как из набора известных, так и вновь разработанных, придавая этим самым разрабатываемым программам высокую степень универсальности.

13. ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ И СИСТЕМ В СИМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ И СНИЖЕНИИ СТЕПЕНИ СВОБОДЫ СИСТЕМЫ

13.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Оптимизация сырьевых смесей заключается в поиске экстремума критерия оптимизации на локальной области симплекса, заданной рядом ограничений на характеристики получаемых смесей. В задачах такого рода использование стандартных методов оптимизации для функции нескольких переменных, в том числе и стандартных программ [321], или методов оптимизации на симплексе и его локальных областях [266, 269], как показано далее, малоэффективно. Поэтому разработка методов оптимизации на симплексе применительно к технологии силикатных строительных материалов, и в частности цементного производства, является актуальной задачей.

Предлагаемые в главе методы основаны на способе формализации расчета цементных сырьевых смесей и являются его дальнейшим развитием.

Рассмотрим постановку задачи оптимизации, то есть выбор оптимизирующих факторов, запись целевой функции и задание ограничений.

Оптимизация N -компонентной сырьевой смеси заключается в определении содержания компонентов в получаемом клинкере x_i , представленного множеством

$$\{X\} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}, \quad (13.1)$$

обеспечивающего заданные требования и экстремум критерия оптимизации $K_{\text{опт}}$.

Множество $\{X\}$ может задаваться как для прокаленных компонентов в клинкере, сухих, влажных или объемных компонентов сырьевой смеси, так и для компонентов, пересчитанных на систему $C - S - A - F$ или $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$. Все эти спосо-

бы выражения состава взаимосвязаны и могут быть преобразованы друг в друга.

Требования к составу сырьевой смеси и клинкера задаются в виде характеристик M , выражаемых через химический состав, но в конечном итоге являющимися функциями от долей компонентов:

$$M = [f(\{ S^{\text{см}} \}) \wedge f(\{ S^{\text{кл}} \})] = f(\{ X \}), \quad (13.2)$$

где $\{S\}$ – множество статей состава материала, в технологии цемента обычно имеющее вид химического состава.

Таким образом, доли $\{X\}$ являются оптимизирующими факторами.

Набор характеристик $\{M\}$ может быть разделен на два подмножества $\{M^R\}$ и $\{M^L\}$, характеризующихся разными типами оптимума:

$$\{M\} = \{M^R\} + \{M^L\}. \quad (13.3)$$

Характеристики подмножества $\{M^R\}$ имеют диапазон (интервал) допустимых значений [72, 184]:

$$M_k^{\min} \leq \{M_k\} \leq M_k^{\max}, \quad k \in \{M^R\}, \quad (13.4)$$

причем свойства клинкера при изменении характеристики M_i внутри интервала можно считать условно-постоянными. Поэтому эти характеристики относятся к ограничениям. Характеристики множества $\{M^L\}$ имеют в качестве оптимума экстремальные значения. После нормализации характеристик и их приведения к экстремуму единого вида из множества $\{M^L\}$ составляется обобщенный критерий оптимизации K_{opt} [317], причем целевая функция будет иметь вид

$$K_{\text{opt}} = f(\{x\}). \quad (13.5)$$

Ограничения, задаваемые для сырьевой смеси, имеют вид равенств

$$M = M^{fix} \quad (13.6)$$

или неравенств (интервалов)

$$M^{\min} \leq M \leq M^{\max}, \quad (13.7)$$

где M^{fix} , M^{\min} , M^{\max} – численные значения характеристик.

Если число ограничений-равенств (13.6) равно $N - 1$, то с учетом равенства суммы компонентов единице получается обусловленная система линейных уравнений размером N , имеющая единственное решение. Выполнение ограничений (13.7) при этом на получаемое решение не влияет, а определяет возможность составления сырьевой смеси. Такая задача обычно называется расчетом сырьевой смеси.

Характеристики M , входящие в равенство (13.6), могут быть преобразованы в линейные формы (преобразование рассмотрено далее):

$$\sum_{i=1}^N a_i x_i = b, \quad (13.8)$$

где a_i , b – коэффициенты.

В связи с нелинейностью ограничения-неравенства в выражения, подобные (13.8), могут быть преобразованы не всегда.

Для значений $\{X\}$ также задаются ограничения, характерные для симплексных систем:

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1, \quad (13.9)$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1 \dots N. \quad (13.10)$$

Условия выражений (13.7) – (13.10) определяют локальную область R поиска решения. Задача оптимизации состава цемент-

ной сырьевой смеси, поставленная, в частности, в работе [196], заключается в нахождении области существования сырьевой смеси R согласно заданным допустимым интервалам характеристик из подмножества $\{M^R\}$

$$R = \left\{ \left[0 \leq x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \leq 1 \mid i = 1 \dots N \right] \vee \left[\sum_{i=1}^N x_i = 1 \right] \vee \left[M_k^{\min} \leq M_k \leq M_k^{\max} \mid k \in \{M^R\} \right] \right\} \quad (13.11)$$

и нахождении экстремума критерия K_{opt} внутри области R .

Окончательно задача оптимизации смесей имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\text{opt}} = f_{\text{opt}}(\{X\}) \rightarrow \min (\max), \\ \sum_{i=1}^N a_{ik} x_i = b_k, \quad k = 1 \dots N_{\text{н}}, \quad N_{\text{н}} < N - 1; \\ M_a^{\min} \leq f_a(\{X\}) \leq M_a^{\max}, \quad a = 1 \dots A; \\ \sum_{i=1}^N x_i = 1, \quad 0 \leq x_i \leq 1, \end{array} \right. \quad (13.12)$$

где K_{opt} – критерий оптимизации; f_{opt} – целевая функция; $N_{\text{н}}$ и A – число ограничений равенств и неравенств соответственно.

В общем случае аналитически или методами линейного программирования поставленная задача решена быть не может из-за нелинейности целевой функции f_{opt} . Использование стандартных численных методов минимизации функции нескольких переменных, например, реализованных в электронных таблицах Excel, для выражения (13.12) малоэффективно и может приводить к ошибочному решению, особенно при нахождении искомой точки на границе локальной области R , так как:

1) факторы не являются независимыми;

2) ограничения задаются не для факторов, а для нелинейных функций от них, из-за чего часто границы локальной области R в симплекс-координатах не могут быть определены аналитически;

3) имеется ряд ограничений-равенств, снижающих степень свободы системы.

Из-за двух последних условий в рассматриваемом случае неприменимы известные методы поиска экстремума на симплексе и в его локальных областях [266, 269]. Поэтому возникает необходимость разработки численного метода поиска экстремума для задачи (13.12).

13.2. ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕЙ И СИСТЕМ

Характеристики M можно представить в обобщенном виде:

$$M = \frac{k'_0 + \sum k'_j S_j}{k''_0 + \sum k''_j S_j}, \quad S_j \in \{S\}. \quad (13.13)$$

Такой вид имеют коэффициент насыщения и модульные характеристики, отдельные оксиды химического состава или их суммы, минералы фазового состава (в двух последних случаях значения $k''_0 = 1$, а все коэффициенты k''_i равны 0).

В зависимости от используемого множества $\{S\}$ это могут быть характеристики сырьевой смеси, клинкера или материала на промежуточной стадии обжига.

Для преобразования характеристик M в линейные формы (13.8) используются линеаризованные характеристики T , которые получаются из характеристик M и для i -го компонента имеют вид

$$T_i = \frac{1 - L_{fi}}{1 - L_i} (k'_0 - M^{fix} k''_0) + \sum_{j=1}^{N_s} (k'_j - M^{fix} k''_j) \frac{S_{ij}}{1 - L_i}, \quad (13.14)$$

где L_{fi} – доля потерь при прокаливании i -го компонента на стадии переработки, для которой определяется характеристика M , например, если используется характеристика сырьевой смеси, то $L_{fi} = L_i$, если клинкера, то $L_{fi} = 0$; L_i – доля потерь при прокалива-

нии i -го компонента, причем $L_i = (1 - 0,01 \cdot \text{ППП}_i)^{-1}$; M^{fix} – заданное значение характеристики M (требование к сырьевой смеси или клинкеру); N_S – количество статей в составе материалов, являющееся размерностью множества $\{S\}$; S_{ij} – содержание j -й статьи в i -м компоненте.

Выражение (13.8) для одной характеристики M имеет вид

$$\sum_{i=1}^N T_i x_i = 0. \quad (13.15)$$

В частности, формируя требования к сырьевой смеси или клинкеру в виде множества $\{M_{N-1}\}$ размерностью $N - 1$, преобразовав характеристики этого множества в выражения T и дополнив полученные уравнения материальным балансом компонентов (13.9), получаем систему из N уравнений для расчета сырьевой смеси:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N T_{ik} x_i = 0, \quad k = 1 \dots N - 1, \\ \sum_{i=1}^N x_i = 1, \end{array} \right. \quad (13.16)$$

где T_{ik} – линеаризованная характеристика, соответствующая k -ой характеристике множества $\{M_{N-1}\}$.

13.3. УЧЕТ КОМПОНЕНТОВ С ИЗВЕСТНЫМ РАСХОДОМ

Если для получения клинкера используются компоненты с известным (заданным) расходом, называемыми добавками, то эти расходы можно задать в виде дополнительных уравнений

$$x_i = q_i, \quad (13.17)$$

где q_i – доля материала в клинкере. Но применение этого способа в численных методах оптимизации не совсем эффективно, так как добавление уравнений (13.17) приводит к увеличению размерности задачи (13.12), и вследствие этого – к уменьшению в геомет-

рической прогрессии скорости сходимости. При наличии добавок уравнение (13.15) целесообразно преобразовать в следующий вид, отнеся характеристики добавок к свободному члену:

$$\sum_{i=1}^N T_i x_i = - \sum_{i=1}^R q_i, \quad (13.18)$$

где R – количество добавок, имеющихся в смеси на перделе, для которого задается характеристика M , по которой построено уравнение (13.18). Система для расчета сырьевой смеси в этом случае будет иметь вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^N T_{ik} x_i = - \sum_{i=1}^R T_{ik} q_i, \quad k = 1 \dots N-1; \\ \sum_{i=1}^N x_i = 1 - \sum_{i=1}^R q_i. \end{array} \right. \quad (13.19)$$

Система (13.19) позволяет производить расчет по произвольному набору требований, задаваемых как для клинкера, так и для сырьевой смеси, учитывать при расчете любое количество добавок, вводимых в сырьевую смесь или прямо в печь.

Учет компонентов с номерами $n1$ и $n2$, используемых в заданной пропорции $x_{n1} : x_{n2} = k_{n1} : k_{n2}$, производится добавлением в системы (13.16), (13.19) дополнительного уравнения

$$k_{n2} x_{n1} - k_{n1} x_{n2} = 0. \quad (13.20)$$

Часто необходимо задавать расход или отношения не для элементов множества $\{X\}$, а для сырьевой смеси в виде массового расхода сухих или влажных компонентов или объемного расхода компонентов. Для пересчета этих расходов в множество $\{X\}$ используются потери при прокаливании сырьевой смеси. Поэтому в таких случаях в алгоритмах расчета целесообразнее использовать итерационные методы с последовательным уточнением состава сырьевой смеси.

13.4. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ

Для решения задачи (13.12) предлагается следующий метод. В множестве $\{X\}$ выделяется переменная x_s , изменением которой производится поиск оптимума. Оставшееся множество разбивается на два – зависимых $\{X^3\}$ и независимых $\{X^H\}$ переменных:

$$\{X\} \setminus x_s = \{X^3\} \cup \{X^H\}, \quad (13.21)$$

причем число элементов N_H в подмножестве $\{X^H\}$ равняется числу ограничений-равенств. Таким образом, количество переменных в множестве $\{X^3\}$ $N_3 = N - N_H - 1$. Пусть известно базовое решение $\{X^0\}$, то есть значения множества $\{X\}$, удовлетворяющие поставленным ограничениям. Тогда изменение переменной x_s в связи с выражением (13.9) требует соответствующего изменения остальных переменных. Поэтому можно записать следующую систему:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N a_{ik} x_i = b_k, & k = 1 \dots N_H, \\ x_m = x_m^0 - \frac{(x_s - x_s^0)}{N_3}, & x_m \in \{X^3\}. \end{cases} \quad (13.22)$$

В системе (13.22) число уравнений на единицу меньше числа неизвестных. Задавая x_s , получаем замкнутую систему, из которой могут быть определены остальные неизвестные.

Метод поиска оптимума в этом случае следующий:

1. Определение базовой точки $\{X^0\}$, выбор начального шага Δx .
2. Выбор оптимизирующего фактора x_s и зависимых переменных, входящих в множество $\{X^3\}$.
3. Поиск направления движения к оптимуму, заключающийся в определении знака шага Δx .
4. Пошаговое движение к оптимуму изменением x_s на величину Δx с расчетом новых значений переменных после каждого шага.

га. Движение прекращается при достижении точки оптимума или выхода из локальной области R , задаваемой ограничениями.

5. Повторение пунктов 2–4 с выбором в качестве x_s всех переменных множества $\{X\}$.

6. При достижении точки оптимума по всем координатам уменьшение шага Δx и повторение пунктов 2–5.

Алгоритм метода представлен на рис. 13.1.

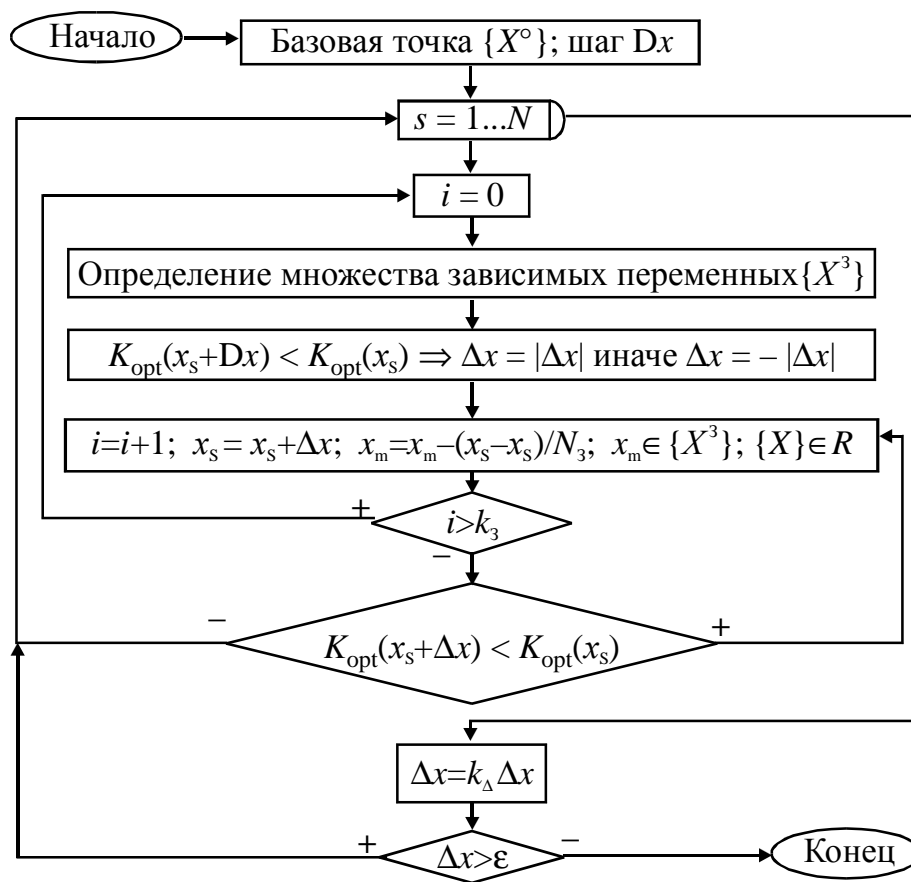


Рис. 13.1. Алгоритм численного метода оптимизации

Предлагаемый метод является аналогом метода покоординатного спуска в симплексной системе координат с учетом заданных ограничений-равенств. При заданных ограничениях-неравенствах предлагается применять известный метод «возврата» [11, 317], который в рассматриваемых задачах показал наибольшую эффективность.

13.5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА

Выбор переменных, входящих в множество $\{X^3\}$, определяет сходимость метода и ее скорость. Для сравнения разных способов выбора зависимых переменных была проведена оптимизация двух-, трех- и четырехкомпонентных сырьевых смесей общим количеством 20 с разным числом ограничений. Выяснено, что для повышения скорости расчетов необходимо в качестве зависимых переменных выбирать: при положительном шаге Δx – факторы с минимальными абсолютными значениями, при отрицательном – с максимальными. Для увеличения точности необходим выбор факторов, наиболее сильно влияющих в системе (13.22) на целевую функцию.

Из исследования также можно сделать вывод, что значительное увеличение скорости сходимости наблюдается при увеличении числа задаваемых ограничений (рис. 13.2), что согласуется с выводами в работе [266].

Значительное увеличение скорости сходимости достигается подбором коэффициентов k_Δ и k_3 . Выявлено, что влияние коэффициента k_Δ на скорость сходимости имеет два характерных вида (рис. 13.3). В первом случае оптимальное значение $k_\Delta = 0,1$, во втором, который имеет место при отсутствии ограничений и заданной высокой точности расчета ($\epsilon \leq 10^{-4}$), оптимальное значение $k_\Delta = 0,013 \dots 0,017$.



Рис. 13.2. Влияние количества ограничений на скорость сходимости

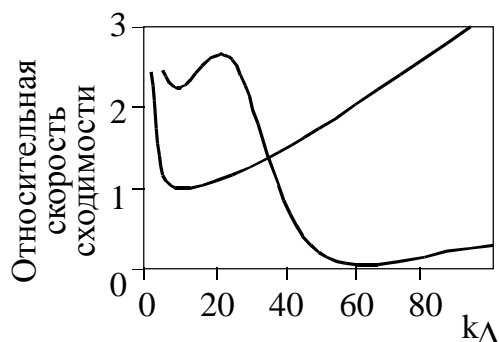


Рис. 13.3. Влияние коэффициента уменьшения шага на скорость сходимости

Влияние коэффициента k_3 на скорость сходимости наблюдалось только при $k_\Delta < 0,1$. Единого оптимального значения k_3 не обнаружено, в разных задачах оно изменялось от 10 до 500. В среднем подбор k_3 позволял ускорить сходимость на 10...20%. Между задаваемой погрешностью ε и скоростью сходимости зависимость близка к обратной логарифмической (рис. 13.4), что характерно для большинства оптимизационных задач.

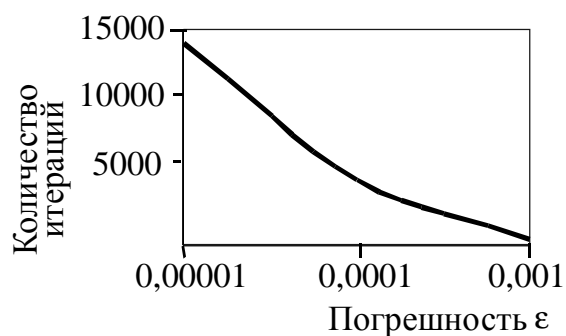


Рис. 13.4. Влияние точности расчета на количество итераций

Для исследования устойчивости метода была проведена оптимизация 20 смесей с заданием различных базовых точек. Во всех случаях отклонения полученных решений друг от друга не превышали заданной погрешности. В среднем количество единичных расчетов сырьевой смеси в предлагаемом методе в несколько раз меньше, чем при поиске экстремума методами Ньютона или сопряженных градиентов (используемых в электронной таблице Excel). При этом для некоторых задач два последних метода не позволили найти оптимальное решение, а в целом они характеризовались меньшей точностью, чем предлагаемый метод.

13.6. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ОГРАНИЧЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ

Если в ограничениях задачи оптимизации есть характеристики сырьевой смеси или клинкера, приводящиеся к виду (13.13), их можно преобразовать в ограничения на содержание компонентов в смеси. Это достигается путем составления формализованного уравнения по характеристике, входящей в ограничения, и замены знака равенства в формализованном уравнении на знак неравен-

ства, соответствующего ограничению. Предлагаемое преобразование также позволит в численных методах оптимизации заменять часть ограничений по характеристикам на ограничения по содержанию компонентов, что ускорит процесс сходимости, особенно при движении вблизи или по границе локальной области. Еще одним применением предлагаемого метода является возможность по заданным ограничениям на значения характеристик находить интервалы возможных значений иных характеристик, не входящих в набор исходных ограничений. Необходимо отметить, что если ограничения и критерий оптимизаций включают только характеристики вида (13.13), в результате преобразований будет получена задача линейного программирования.

Если число ограничений меньше или равно числу сырьевых компонентов, то с учетом границ симплекса $0 \leq x_i \leq 1$ в результате преобразования получается система уравнений, после решения которой определяется локальная область вида

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i = 1 \dots N. \quad (13.23)$$

Рассмотрим способ нахождения области (13.23).

1. Задается число компонентов сырьевой смеси N .
2. Задается набор из G характеристик ($G \geq N - 1$) и интервал изменения каждой из этих характеристик.
3. Так как для расчета N -компонентной сырьевой смеси необходима система из $N - 1$ линейных уравнений, то из G характеристик на основе предложенного формализованного метода расчета сырьевых смесей составляются различные системы уравнений, общее число которых равно

$$C_G^{N-1} = \frac{M!}{(G - N + 1)! \cdot (N - 1)!}. \quad (13.24)$$

4. Системы уравнений решаются с использованием в качестве характеристик M_i их значений на границах заданных интервалов. При этом каждый вариант систем уравнений рассчитывается дважды с использованием значений характеристик, соответствующих максимальному и минимальному содержанию компонента x_i , что определяется из характера зависимости $x_i(M)$.

5. Из C_G^{N-1} интервалов определяется общий поддиапазон:

$$R(x_i) = \left[\max(x_i^{\min}), \min(x_i^{\max}) \right], \quad (13.25)$$

где $\max(x_i^{\min})$ – максимальное значение из всех вычисленных левых граничных значений; $\min(x_i^{\max})$ – минимальное значение из всех вычисленных правых граничных значений.

6. Определяя согласно пунктам 4, 5 интервал для каждого x , получаем искомую область. Если в результате получилась пустая область R , то есть имеются непересекающиеся поддиапазоны

$$\max(x_i^{\min}) > \min(x_i^{\max}), \quad (13.26)$$

то заданные требования обеспечить невозможно и необходимо расширить допустимые интервалы изменения характеристик M или уменьшить их число.

Алгоритм метода представлен на рис. 13.5.

После нахождения области R возможно определение соответствующих этой области пределов изменения остальных характеристик, не используемых при локализации R , в частности содержания основных оксидов. Эти интервалы в системе $C - S - A - F$ при одинаковых допустимых границах изменения характеристик клинкера будут постоянными, поэтому для наиболее часто употребляемых наборов ограничений на характеристики возможно произвести их пересчет в содержание четырех основных оксидов.

Результаты такого расчета представлены в табл. 13.1, на основании которой можно сделать вывод, что всем перечисленным требованиям удовлетворяет клинкер следующего химического состава:

$$\text{CaO} = 65,9...68,0;$$

$$\text{SiO}_2 = 21,2...23,3;$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,5...7,3;$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 3,7...5,0.$$

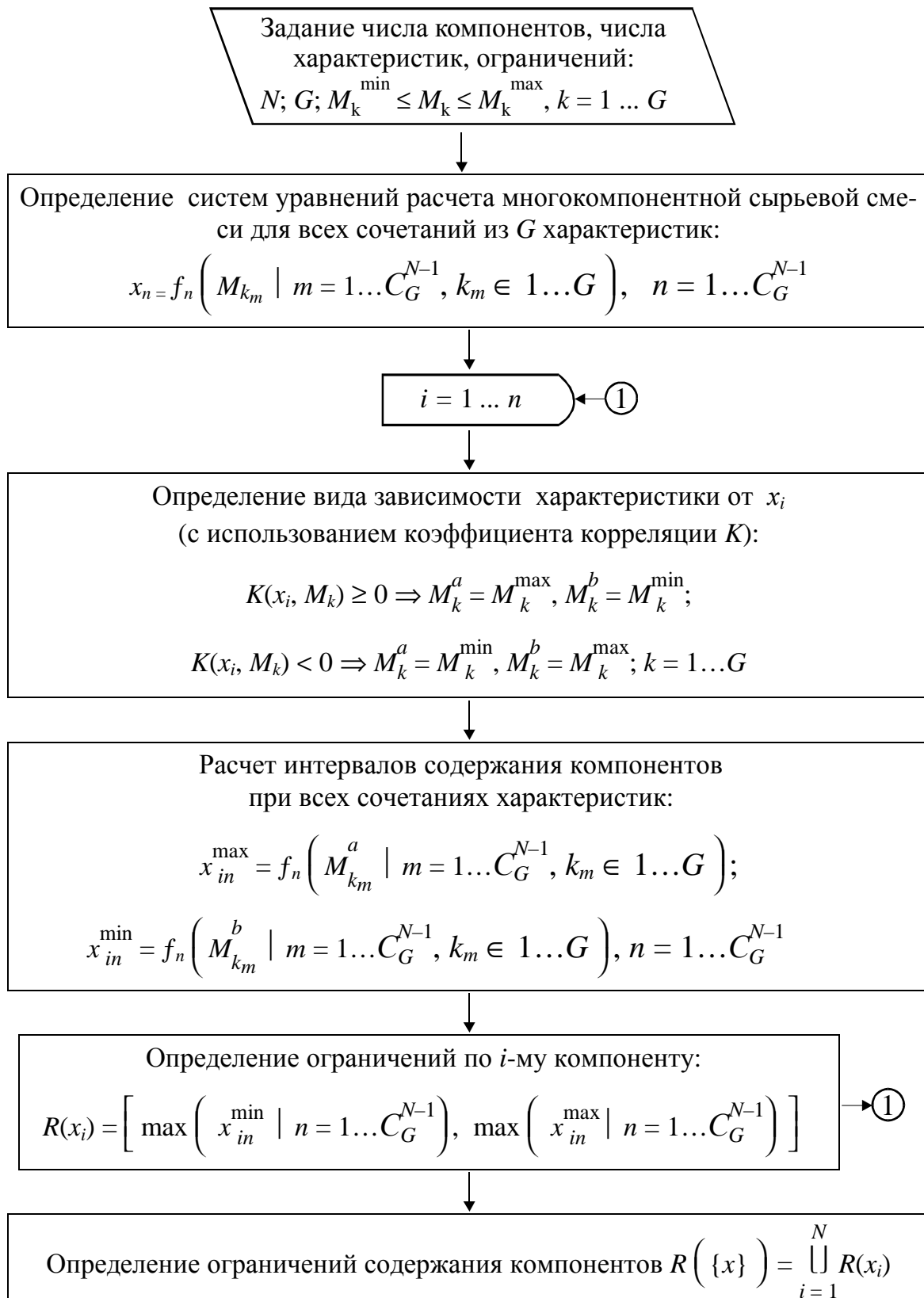


Рис. 13.5. Алгоритм локализации области при замене ограничений

**Состав клинкера в системе С – S – А – F
при различных ограничениях на его состав**

Допустимые диапазоны изменения характеристик клинкера	Содержание оксидов клинкера в системе С – S – А – F, мас. %			
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Допустимые диапазоны модулей: $KH = 0,8...0,95$ $n = 1,7...3,2$ $p = 1,5...2,5$	64,8...70,1	20,1...24,9	4,1...9,1	2,0...5,1
Оптимальные диапазоны модулей: $KH = 0,87...0,91$ $n = 1,8...2,4$ $p = 1,0...1,6$	65,9...68,0	21,1...23,3	4,5...7,3	3,7...5,0
Допустимые диапазоны минералов: $C_3S = 37...65$ $C_2S = 10...37$ $C_3A = 2...15$ $C_4AF = 10...18$	64,5...68,7	18,6... 26,2	2,9...9,4	3,3...5,9
Допустимые соотношения минералов: $C_3S+C_2S = 75...82$ $C_3A+C_4AF = 18...25$ $C_3S/C_2S = 1...4$	59,6...69,6	21,2...25,0	4,5...7,3	3,7...5,0

Рассмотрим пример оптимизации цементной сырьевой смеси с заменой ограничений. Необходимо найти процентное содержание компонентов в клинкере, обеспечивающее минимальный эффект клинкерообразования при нахождении характеристик n , p , C_4AF в заданных пределах. Химический состав прокаленных сырьевых компонентов задан в табл. 13.2.

Так как число компонентов равно трем, как ограничения необходимо взять не менее двух характеристик, в качестве которых примем следующие: $n = 2...3$; $p = 1...2$; $C_4AF = 10...22$.

Состав прокаленных компонентов, мас. %

Оксид	Компонент		
	1	2	3
SiO ₂	3	80	9
Al ₂ O ₃	6	11	4
Fe ₂ O ₃	1	5	86
CaO	90	4	1

Для расчета трехкомпонентной смеси с использованием трех характеристик можно составить три системы линейных уравнений:

- 1) для расчета по n и p ;
- 2) для расчета по n и C_4AF ;
- 3) для расчета по p и C_4AF .

На основании исследования зависимости x_1 от характеристик можно заключить, что минимальному x_1 соответствует минимальное p и максимальные n и C_4AF и наоборот. Решая каждую систему уравнений для наборов характеристик, соответствующих минимальному и максимальному x_1 , получаем три диапазона:

$$1) x_1^{\min}(n = 3; p = 1) = 25,8; \quad x_1^{\max}(n = 2; p = 2) = 74,3;$$

$$2) x_1^{\min}(n = 3; C_4AF = 22) = 37,1; \quad x_1^{\max}(n = 2; C_4AF = 10) = 75,4;$$

$$3) x_1^{\min}(p = 1; C_4AF = 22) = 66,9; \quad x_1^{\max}(p = 2; C_4AF = 10) = 85,6.$$

Общий поддиапазон, входящий во все три диапазона, равен

$$66,9 < x_1 < 74,3.$$

Аналогично определяем

$$23,8 < x_2 < 27,0; \quad 2,1 < x_3 < 6,1.$$

Таким образом, при соблюдении трех вышеперечисленных неравенств (при условии $x_1 + x_2 + x_3 = 100$) характеристики клинкера, получаемого из сырьевой смеси, будут находиться в заданных пределах. Находя минимальное значение теплового эффекта клинкерообразования внутри полученной области, имеем следующий состав клинкера, удовлетворяющий поставленным требованиям:

$$x_1 = 66,9; \quad x_2 = 27,0; \quad x_3 = 6,1.$$

* * *

В заключении можно сделать следующие выводы. В разделе предложен метод численной оптимизации многокомпонентных сырьевых смесей, характерных для технологии силикатов, в симплексной системе координат. При оптимизации могут быть определены ограничения в виде равенств или неравенств, заданные для характеристик сырьевой смеси или получаемого продукта. В задачах технологии цемента метод обладает высокой устойчивостью и сходимостью.

14. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

14.1. ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ И СИСТЕМ СИЛИКАТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Исследование и моделирование свойств силикатных строительных материалов включают планирование эксперимента на факторном пространстве многомерного симплекса или его внутренней области и в ряде случаев, в частности при исследовании теплофизических свойств цементных сырьевых смесей и клинкера, требуют применения нелинейных моделей с числом оцениваемых коэффициентов от 4...5 до 8...10 и выше. Применяемые в планировании экспериментов на диаграмме «состав–свойство» трехуровневые планы Р. Мак-Лина и В. Андерсона позволяют строить насыщенные или близкие к ним планы. Но в случае нелинейного оценивания взаимосвязи между факторами симплексное планирование не позволяет получить необходимую степень адекватности моделей. В данных условиях возможно применение решетчатых ненасыщенных планов с непрямым методом оценки получаемой модели [187]. В подразделе на примере цементных сырьевых смесей и клинкера рассматривается выбор факторного пространства при исследовании свойств многокомпонентных материалов в зависимости от их состава, а также выбор оптимального размера плана экспериментов.

Замена факторных пространств исследуемых систем

Состав цементных сырьевых смесей и клинкера может выражаться содержанием оксидов, минералов и модульными характеристиками. В системе $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$ (далее обозначается как С – S – А – F) эти характеристики взаимосвязаны и возможен переход между факторными пространствами химического и минералогического состава и замена их модульными характеристиками. Аналогичные замены производятся также в получаемых зависимостях.

Системы $C - S - A - F$ и $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$ имеют одинаковое число компонентов, связанных линейными отношениями. При преобразовании на этих факторных пространствах симплексных и решетчатых планов с одинаковым числом шагов для каждого фактора ограничения преобразуются согласно формулам пересчета минералогического и химического составов [227, 294] с учетом отношений, представленных в табл. 14.1–14.2.

Таблица 14.1

**Преобразование ограничений по химическому составу
в ограничения по минералогическому составу**

Рассчитываемые значения	Вид экстремумов, используемых при расчете			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
min (CaO)	min	min	min	min
max (CaO)	max	max	max	max
min (SiO_2)	min	min	–	–
max (SiO_2)	max	max	–	–
min (Al_2O_3)	–	–	min	min
max (Al_2O_3)	–	–	max	max
min (Fe_2O_3)	–	–	–	min
max (Fe_2O_3)	–	–	–	max

Таблица 14.2

**Преобразование ограничений по минералогическому составу
в ограничения по химическому составу**

Рассчитываемые значения	Вид экстремумов, используемых при расчете			
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
min (C_3S)	min	max	max	max
max (C_3S)	max	min	min	min
min (C_2S)	max	min	min	min
max (C_2S)	min	max	max	max
min (C_3A)	–	–	min	max
max (C_3A)	–	–	max	min
min (C_4AF)	–	–	–	min
max (C_4AF)	–	–	–	max

Решетчатые планы, в которых шаги по каждому из факторов одинаковы, в системах $C - S - A - F$ и $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$ адекватны не будут, данные планы преобразуются с изменением соотношений шагов по факторам:

– при переходе к системе $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$:

$$\begin{aligned} h_{C_3S} &= 11,677 \cdot h_{C-S-A-F}; \\ h_{C_2S} &= 11,677 \cdot h_{C-S-A-F}; \\ h_{C_3A} &= 0,958 \cdot h_{C-S-A-F}; \\ h_{C_4AF} &= 3,043 \cdot h_{C-S-A-F}; \end{aligned} \quad (14.1)$$

– при переходе к системе $C - S - A - F$:

$$\begin{aligned} h_{CaO} &= 2,4722 \cdot h_{C_3S-C_2S-C_3A-C_4AF}; \\ h_{SiO_2} &= 0,6120 \cdot h_{C_3S-C_2S-C_3A-C_4AF}; \\ h_{Al_2O_3} &= 0,5872 \cdot h_{C_3S-C_2S-C_3A-C_4AF}; \\ h_{Fe_2O_3} &= 0,3286 \cdot h_{C_3S-C_2S-C_3A-C_4AF}, \end{aligned} \quad (14.2)$$

где $h_{C-S-A-F}$, $h_{C_3S-C_2S-C_3A-C_4AF}$ – размер шагов в системах $C - S - A - F$ и $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$ соответственно.

Модульные характеристики клинкера выражаются через содержащиеся в нем оксиды [227, 294]. Пересчет модульных характеристик на химический состав осуществляется путем решения системы четырех линейных уравнений, включающей выражения для расчета КН, n , p с добавлением уравнения материального баланса:

$$CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2 = \Theta, \quad (14.3)$$

где Θ – сумма содержания оксидов. После решения полученной системы приходим к следующим выражениям для расчета содержания оксидов:

$$\begin{aligned}
\text{CaO} &= \Theta [(1 - k(1 + p + n + n \times p))]; \\
\text{Fe}_2\text{O}_3 &= \Theta \times k; \\
\text{Al}_2\text{O}_3 &= \Theta \times p \times k; \\
\text{SiO}_2 &= \Theta \times n \times k \times (p + 1),
\end{aligned}
\tag{14.4}$$

где $k = [(2,8 \times \text{КН} + 1)(p + 1)n + 2,65p + 1,35]^{-1}$.

Пересчет минералогического состава клинкера на модульные характеристики КН, n , p осуществляется преобразованием формул для их расчета с использованием формул выражения химического состава через минералогический:

$$\begin{aligned}
\text{КН} &= \frac{\text{C}_3\text{S} + 0,8837 \cdot \text{C}_2\text{S}}{\text{C}_3\text{S} + 1,3256 \cdot \text{C}_2\text{S}}, \\
p &= \frac{1,1484 \cdot \text{C}_3\text{A}}{\text{C}_4\text{AF}} + 0,6385; \\
n &= \frac{\text{C}_3\text{S} + 1,3256 \cdot \text{C}_2\text{S}}{1,4340 \cdot \text{C}_3\text{A} + 2,0406 \cdot \text{C}_4\text{AF}}.
\end{aligned}
\tag{14.5}$$

Обратный пересчет осуществляется решением системы четырех линейных уравнений, полученной из уравнений (14.3) и (14.5):

$$(A) \cdot (X) = (B), \tag{14.6}$$

где

$$(A) = \begin{pmatrix} \text{КН}-1 & 1,3256 \cdot (\text{КН}-0,6667) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1,1484 & p \\ 1 & 1,3256 & -1,4340 \cdot n & -2,0460 \cdot n \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(B) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,6385 \\ 0 \\ \Theta \end{pmatrix}$$

$$(X) = \begin{pmatrix} C_3S \\ C_2S \\ C_3A \\ C_4AF \end{pmatrix} \text{ – вектор неизвестных.}$$

Характеристики клинкера KH , n , p являются нелинейными функциями от состава материала, поэтому преобразование планов из систем $C - S - A - F$ и $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$ в переменные $KH - n - p$ и наоборот невозможно. Но характеристики KH , n , p задают соотношения оксидов $CaO : SiO_2 : Al_2O_3 : Fe_2O_3$ или минералов $C_3S : C_2S : C_3A : C_4AF$, что дает возможность проводить подобные преобразования зависимостей с учетом материального баланса (14.3).

Влияние характеристик планов на оценку моделей

Изучение влияния размеров плана на время, затраченное на оценку коэффициентов моделей, описывающих зависимость «состав–свойство», и их точность проводилось на факторном пространстве состава, задаваемом ограничениями, мас. %:

$$60 \leq CaO \leq 68;$$

$$20 \leq SiO_2 \leq 24;$$

$$3 \leq Al_2O_3 \leq 7;$$

$$2 \leq Fe_2O_3 \leq 4.$$

Исследовались следующие планы:

- 1) симплексный, включающий вершины области;
- 2) симплексный, включающий вершины, середины граней и центр области;
- 3) решетчатый, шаг по всем факторам равен 1;
- 4) решетчатый, шаг по всем факторам равен 0,5.

В качестве отклика использовались пять характеристик, включающих теплофизические, физико-химические и калориметрические параметры сухой цементной сырьевой смеси, имеющей температуру 0 °С. При расчете состава сырьевых материалов принималось, что глинистые материалы представлены каолинитом, карбонатные – CaCO₃; оксид железа и не связанный в каолинит оксид кремния находятся в свободном виде. Для описания зависимостей использовалась линейная модель

$$P = k_C \text{CaO} + k_S \text{SiO}_2 + k_A \text{Al}_2\text{O}_3 + k_F \text{Fe}_2\text{O}_3 \quad (14.7)$$

и нелинейная модель

$$P = \frac{k'_C \text{CaO} + k'_S \text{SiO}_2 + k'_A \text{Al}_2\text{O}_3 + k'_F \text{Fe}_2\text{O}_3}{k''_C \text{CaO} + k''_S \text{SiO}_2 + k''_A \text{Al}_2\text{O}_3 + k''_F \text{Fe}_2\text{O}_3}, \quad (14.8)$$

где P – оцениваемый параметр; k – коэффициенты.

Коэффициенты моделей определялись минимизацией среднеквадратичного отклонения отклика на основе метода Ньютона. Адекватность модели оценивалась методом случайной выборки точек внутри исследуемого факторного пространства.

На основании результатов исследования, представленных в табл. 14.3 и на рис. 14.1, можно сделать следующие выводы. Симплексные планы (№ 1 и 2) обеспечивают меньшую точность, чем решетчатые (№ 3, 4). Точность расчетов повышается до достижения количества точек значения $(4...5)n$, в дальнейшем она остается постоянной. Увеличение временных затрат на оценку моделей практически прекращается при превышении числа точек плана значения $(4...5)n$, где n – число факторов. Аналогичные исследования на факторном пространстве CaO – SiO₂ – Al₂O₃ подтвердили данные зависимости. Симплексный план, содержащий вершины, середины граней и центр многогранника, может содержать до $n^2 + n + 1$ точек. Но для условий цементной технологии, где в связи с накладываемыми ограничениями на состав многогранники имеют вид параллелепипедов, число точек плана не будет превышать $3n + 1$, что не обеспечивает точности получаемых моделей.

Оценка модели на различных планах

Характеристика	Линейная модель				Нелинейная модель			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Номер плана	1	2	3	4	1	2	3	4
Число точек плана	6	12	19	80	6	12	19	80
Относительное время оценки модели	1	3	4	7,3	2	4,7	6	12,7
Относительная погрешность, %	1,305	0,308	0,096	0,034	1,233	0,189	0,021	0,013

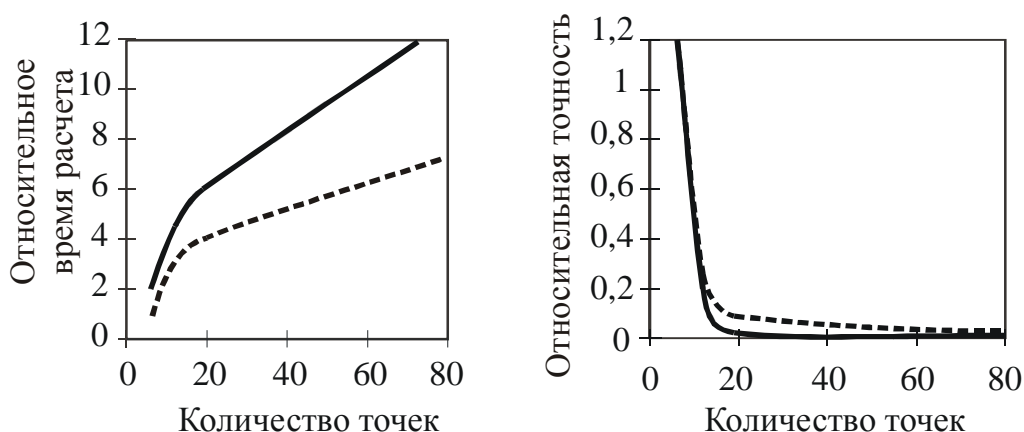


Рис. 14.1. Среднее относительное время расчета и точность оцениваемой модели:

— — нелинейная модель; - - - - - линейная модель

Особенности планирования экспериментов и оценок моделей

На основании изложенного выше можно выделить следующие особенности планирования экспериментов при исследовании свойств цементных сырьевых смесей и клинкера:

– планирование эксперимента на факторных пространствах $C - S - A - F$ и $C_3S - C_2S - C_3A - C_4AF$ равнозначно, при этом получают адекватные планы, выбор факторного пространства из двух указанных должен осуществляться с учетом способа получения отклика и дальнейшего использования результатов анализа;

– планирование экспериментов в системе координат характеристик KH, n, p может быть заменено планированием на фактор-

ном пространстве химического или минералогического составов с последующим преобразованием по выражениям (14.4)–(14.5);

– при планировании вычислительных экспериментов в цементной технологии возможно использование решетчатых планов с равномерным шагом по всем координатам, с числом точек, превышающем $5n$, где n – число факторов. При этом достигается максимальная точность статистических моделей с приемлемыми затратами времени на их получение.

14.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ СЕЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ЦЕМЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Область существования цементного клинкера представляет локальный участок диаграммы состояния многокомпонентной системы с числом компонентов 3, 4 и выше и обычно имеет вид параллелепипеда или многогранника [325]. Определение координат вершин сечения области необходимо при построении планов экспериментов [10, 326], проведении автоматизированного и вычислительного экспериментов [327, 328], графического представления свойств многокомпонентных систем [326]. В данном подразделе предлагается метод нахождения координат вершин сечения локальной области диаграммы поверхностью, заданной содержанием одного из компонентов. Предлагаемый метод учитывает особенности смесей и систем цементной технологии. Отличие этого метода от существующих заключается в том, что он основан на аналитических формулах и позволяет по виду ограниченной на содержание компонентов в смеси или системе определять наличие и геометрическую форму сечения и число его вершин.

Определение симплекса и его локальной области

При установлении зависимости свойств вещества от его состава, в частности при построении диаграмм «состав–свойство», имеет место планирование эксперимента на факторном пространстве $(n - 1)$ -мерного симплекса A^S , состоящего из n граней:

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1 \dots n, \quad (14.9)$$

где n – число компонентов; x_i – содержание (концентрация) i -го компонента.

При дополнительном введении ограничений на содержание компонентов

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i = 1 \dots n \quad (14.10)$$

исследуемая локальная область A представляет собой многогранник с числом граней q , равным или превышающим число компонентов n :

$$q \geq n. \quad (14.11)$$

В случае наличия в выражении (14.11) равенства, локальная область A представляет $(n - 1)$ -мерный симплекс; построение планов при этом производится аналогично полным диаграммам по методике, приведенной, в частности, в [14].

Если исследуемая область A имеет число вершин q , большее числа компонентов n , то она является подобластью симплекса A^S с частично совпадающими с ним гранями (рис. 14.2) и является многогранником или его частным случаем – параллелепипедом.

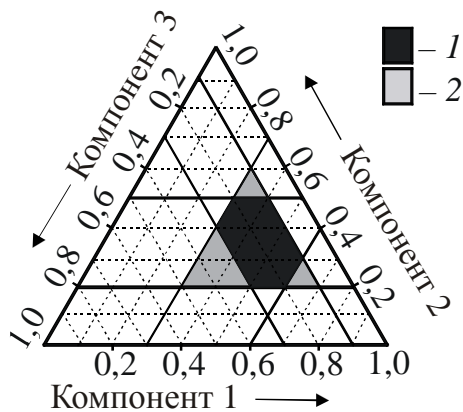


Рис. 14.2. Факторное пространство трехкомпонентной системы при наличии ограничений:
 1 – многогранник A ; 2 – симплекс A^S , содержащий многогранник A

Математическое описание симплекса

Определим условия идентификации области как симплекса. Симплекс образуется пересечением $(n - 2)$ -мерных поверхностей, соответствующих ограничениям по каждому компоненту. Для трехкомпонентной системы данная поверхность представляет

прямую, для четырехкомпонентной – плоскость. Точки в n -мерном пространстве определяются координатами, задаваемыми в виде набора $\{x_n\}$:

$$\{x_n\} \Leftrightarrow \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (14.12)$$

Координаты вершины n -мерного симплекса A_j^S имеют вид

$$\left[\{x_n^{Smin}\} \cap x_j^{Smin} \right] \cup x_j^{Smax}, \quad 1 \leq j \leq n, \quad (14.13)$$

где x^{Smin} , x^{Smax} – координаты вершины симплекса. Таким образом, j -й вершине симплекса соответствуют максимальная граничная координата по j -му компоненту и минимальные граничные координаты по всем остальным $n - 1$ компонентам.

Симплекс является равносторонним многоугольником, и поэтому длины его граней равны между собой:

$$x_1^{Smax} - x_1^{Smin} = x_2^{Smax} - x_2^{Smin} = \dots = x_n^{Smax} - x_n^{Smin} = \Delta x^S. \quad (14.14)$$

Так как для содержания компонентов x_i должно выполняться условие

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1, \quad (14.15)$$

то для всех вершин симплекса ($j = 1 \dots n$) записывается аналогичное равенство:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ x_i^{Smin} \mid i \neq j \right\} + x_j^{Smax} = 1. \quad (14.16)$$

Сумма минимальных границ симплекса с исключением j -й координаты имеет вид

$$\sum_{i=1}^n \left\{ i \neq j \Rightarrow x_i^{Smin} \vee (i = j \Rightarrow 0) \right\} = \sum_{i=1}^n x_i^{Smin} - x_j^{Smin}, \quad (14.17)$$

и выражение (14.16) сводится к следующему:

$$\sum_{i=1}^n x_i^{S_{\min}} - x_j^{S_{\min}} + x_j^{S_{\max}} = 1, \quad (14.18)$$

или с учетом уравнения (14.14)

$$\sum_{i=1}^n x_i^{S_{\min}} + \Delta x^S = 1. \quad (14.19)$$

Таким образом, совокупность условий (14.14) и (14.19) является достаточной для идентификации многоугольника как симплекса. Для описания симплекса на факторном пространстве n -компонентной системы при выполнении условия (14.15) необходимо указать только минимальные значения факторов $\{x_n^{S_{\min}}\}$.

Аналитическое определение координат сечения симплекса поверхностью

Рассмотрим усечение симплекса поверхностями, задаваемыми ограничениями, описанными выражением (14.10). При этом образуется многогранник A , которому соответствует симплекс A^S , совпадающий с областью A нижними гранями:

$$A \in A^S. \quad (14.20)$$

Координаты вершин симплекса A^S однозначно определяются из ограничений (14.10) следующим образом:

$$\{x_n^{S_{\min}}\} = \{x_n^{\min}\}, \quad (14.21)$$

поэтому поверхности, ограничивающие снизу область A и симплекс A^S , совпадают. При этом

$$\Delta x^S = 1 - \sum_{i=1}^n x_i^{\min}; \quad (14.22)$$

$$\{x_n^{S\max}\} = \{x_n^{S\min} + \Delta x^S\}. \quad (14.23)$$

Поверхность x_i^{\max} , ограничивающая область A сверху, может пересекать область A и симплекс A^S в соответствии со следующими вариантами.

Вариант 1. $x_i^{\max} \geq x_i^{S\max}$. Ограничивающая поверхность x_i^{\max} симплекс A^S не пересекает, и вершина поверхности A совпадает с вершиной i симплекса A^S .

Вариант 2. $x_i^{\max} < x_i^{S\max}$, и не находится ни одной поверхности x_k^{\max} , пересекающей поверхность x_i^{\max} на грани или внутри симплекса:

$$x_k^{\max} \cup x_i^{\max} \notin A^S, \quad k \neq i, \quad k = 1 \dots n, \quad (14.24)$$

что выражается в виде неравенства

$$\sum_{j=1}^n x_j^{\min} - x_i^{\min} - x_k^{\min} + x_i^{\max} + x_k^{\max} > 1, \quad (14.25)$$

или

$$\sum_{j=1}^n x_j^{\min} + \Delta x_k + \Delta x_i > 1, \quad (14.26)$$

где

$$\Delta x_k = x_k^{\max} - x_k^{\min}. \quad (14.27)$$

Сопоставляя выражения (14.26) и (14.19) с учетом равенства (14.21), имеем следующее условие:

$$\min \{ \Delta x_k + \Delta x_i \mid k = 1 \dots n, k \neq i \}. \quad (14.28)$$

В этом случае пересечение поверхности x_i^{\max} с симплексом A^S есть грань A_i :

$$A^S \cap x_i^{\max} = A_i, \quad (14.29)$$

имеющая $n - 1$ вершин и ребра, лежащие на гранях симплекса A^S (рис. 14.3).

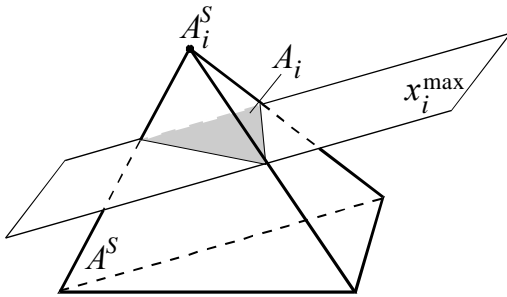


Рис. 14.3. Пересечение трехмерного симплекса A^S поверхностью x_i^{\max} (вариант 2)

Координаты вершин грани A_i определяются из координат вершин A^S симплекса

$$A_i^S \left(\left[\{x_n^{Smin}\} \cap x_i^{Smin} \right] \cup x_i^{Smax} \right) \quad (14.30)$$

путем замены

$$x_i^{Smax} \rightarrow x_i^{\max} \quad (14.31)$$

и поочередной заменой остальных $n - 1$ координат x_j^{\min} , где

$$j = 1 \dots n, \quad j \neq i, \quad (14.32)$$

на значения, соответствующие условию (14.15):

$$x_j = 1 - \sum \{x_m \mid m = 1 \dots n, m \neq j\} =$$

$$= 1 - \left(\sum_{m=1}^n x_m^{\min} - x_i^{\min} + x_i^{\max} - x_j^{\min} \right) \quad (14.33)$$

или с учетом выражений (14.22) и (14.27)

$$x_j = \Delta x^S - \Delta x_i + x_j^{\min}. \quad (14.34)$$

Каждое аналогичное пересечение поверхности x_i^{\max} с симплексом A^S имеет $n - 1$ вершин, что увеличивает число точек плана на $n - 2$ по сравнению с симплексом (путем замены вершины симплекса A_i^S на $n - 1$ точку).

Вариант 3. Пересечение двух ограничивающих область A поверхностей x_i^{\max} и x_k^{\max} имеет вид точки A_{ik} , лежащей на ребре симплекса A^S (рис. 14.4), о чем свидетельствует выполнение следующих условий:

$$\Delta x_i + \Delta x_k = \Delta x^S; \quad (14.35)$$

$$x_i^{\max} < x_i^{S\max}; \quad (14.36)$$

$$x_k^{\max} < x_k^{S\max}. \quad (14.37)$$

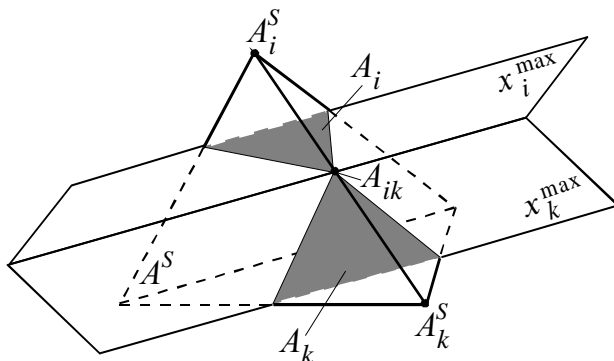


Рис. 14.4. Пересечение трехмерного симплекса A^S поверхностями x_i^{\max} и x_k^{\max} (вариант 3)

В этом случае координаты вершин граней A_i и A_k рассчитываются аналогично варианту 2 по выражениям (14.30) – (14.33) с исключением одной из совпадающих точек, имеющих координаты

$$A_{ik} \left(\left[\{x_n^{\min}\} \cap \{x_i^{\min}, x_k^{\min}\} \right] \cup \{x_i^{\max}, x_k^{\max}\} \right) \quad (14.38)$$

что достигается заменой выражения (14.32) на условие

$$(j = 1 \dots n) \wedge (j \neq n) \wedge (j \neq k) \quad (14.39)$$

и добавлением впоследствии точки A_{ij} в план. Такое пересечение имеет $2n - 3$ вершины и исключает из плана 2 точки – вершины A_i^S и A_k^S симплекса.

Вариант 4. Пересечение A_{ik} двух ограничивающих область A поверхностей x_i^{\max} и x_k^{\max} принадлежит внутренней области симплекса A^S (рис. 14.5), что определяется следующими условиями:

$$\Delta x_i + \Delta x_k < \Delta x^S; \quad (14.40)$$

$$x_i^{\max} < x_i^{S\max}; \quad (14.41)$$

$$x_k^{\max} < x_k^{S\max}. \quad (14.42)$$

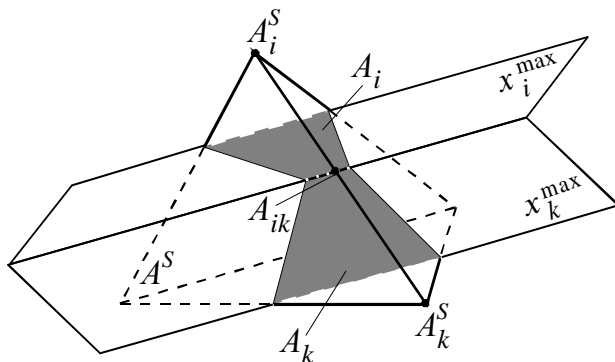


Рис. 14.5. Пересечение трехмерного симплекса A^S поверхностями x_i^{\max} и x_k^{\max} (вариант 4)

Для $(n - 1)$ -мерного симплекса ограничивающая поверхность $x_i = \text{const}$ имеет размерность $n - 2$ и соответственно $(n - 3)$ -мерную область пересечения, которая, в свою очередь, пересекает симплекс в $n - 2$ точках. Таким образом, данный вид пересечения имеет число вершин, равное $3(n - 2)$. При этом из плана исключаются вершины симплекса A_i^S и A_k^S .

Нахождение координат вершин осуществляется согласно варианту 2 с учетом условия (14.40); дополнительные вершины, принадлежащие одновременно двум ограничивающим поверхностям x_i^{\max} и x_k^{\max} и симплексу, имеют также координаты:

$$(A_{ik})_j \left(\left[\{x_n^{\min}\} \cap \{x_i^{\min}, x_k^{\min}, x_j^{\min}\} \right] \cup \{x_i^{\max}, x_k^{\max}, x_j\} \right) \quad (14.43)$$

где $x_j = \Delta x^S - \Delta x_i - \Delta x_k + x_j^{\min}$, $j = 1 \dots n$, $j \neq i, k$. (14.44)

Вариант 5. Пересечение m ограничивающих область A поверхностей $x_1^{\max}, x_2^{\max}, \dots, x_m^{\max}$, $m \geq 2$, принадлежит симплексу A^S (рис. 14.6), что определяется условием:

$$\sum_{i=1}^m Dx_i \leq \Delta x^S. \quad (14.45)$$

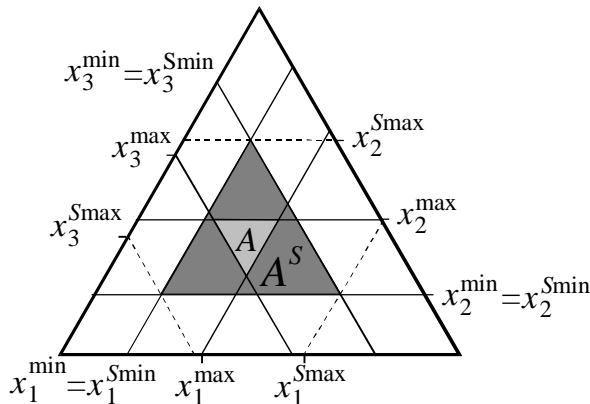


Рис. 14.6. Пересечение двух-мерного симплекса A^S с тремя поверхностями x_1^{\max}, x_2^{\max} и x_3^{\max} (вариант 5)

Пересечение варианта 3 является частным случаем данного варианта при $m = 2$ и знаке равенства в условии (14.45), а пересечение варианта 4 – частным случаем данного варианта при знаке строгого неравенства условия (14.45).

Нахождение координат вершин пересечения рассматриваемого типа производится аналогично варианту 3, если в выражении (14.45) знак равенства, или аналогично варианту 4, если в выражении (14.45) знак «меньше». При этом поверхности x_i^{\max} и x_k^{\max} заменяются на поверхности $x_1^{\max}, x_2^{\max}, \dots, x_m^{\max}$

$$\{x_i^{\max}, x_k^{\max}\} \rightarrow \{x_1^{\max}, x_2^{\max}, \dots, x_m^{\max}\}, \quad (14.46)$$

а координаты i и k – на координаты $i, i + 1, \dots, m$

$$i, k \rightarrow i, i + 1, \dots, m. \quad (14.47)$$

Необходимо рассматривать все возможные пересечения, соответствующие комбинациям ограничивающих плоскостей. Для этого сумма Δx для ограничений, входящих в каждое пересечение, должна быть насыщенной, то есть не должно находиться хотя бы еще одной координаты, добавление Δx которой к сумме дало бы число, меньшее Δx^S . Это условие соблюдается при истинности следующего высказывания P :

$$\begin{aligned} P: \left(\{N_n\} = 1 \dots n \right) \vee \left(\{N_m\} \in \{N_n\} \right) \vee \left(m < n \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \forall \Delta x_k, k \in \{N_n\} \setminus \{N_m\} \quad \Delta x_k + \sum_{i=N_1}^{N_m} D x_i > \Delta x^S. \end{aligned} \quad (14.48)$$

Таким образом, аналитическое выражение координат M пересечения области A поверхностью x_i имеет вид:

– условия, определяющие наличие пересечения:

$$\left(\{M_m\} \in 1 \dots N, 1 \leq m \leq N, i \in \{M_m\} \right) \wedge$$

$$\wedge \left(\sum_{k \in \{M_m\}} Dx_k \leq x^S \right) \wedge \left(\forall k \in \{M_m\} x_k^{\max} < x_k^{S_{\max}} \right) \wedge$$

$$\wedge \left(\forall \bar{k} \notin \{M_m\} \sum_{k \in \{M_m\}} Dx_k + Dx_{\bar{k}} > x^S \right);$$

– координаты вершин пересечения $A_i(\{x_n\})$:

$$A_{ij} = \left(\{x_N^{S_{\min}}\} \cap x_i^{S_{\min}} \cap x_j^{S_{\min}} \cap x_i^{\max} \cap x_j^{\max} \right); j = 1 \dots N, j \neq i;$$

$$x_j = \Delta x^S - \Delta x_i + \Delta x_j^{\min}; \quad \Delta x_i = x_i^{\max} - x_i^{\min};$$

$$\{A'_{ij}\} = \cup \left(A_{ij} \mid j \in \{M_m\}, k \in \{M_m\}, k \neq j \right);$$

$$\text{при } \sum_{k=1}^m Dx_k = \Delta x^S \quad \{A_i\} = \{A'_{ij}\} \cap A_{i\{M_m\}},$$

$$\text{где } A_{i\{M_m\}} \left(\{x_N^{S_{\min}}\} \cap \{x_{\{M_m\}}^{S_{\min}}\} \cap \{x_{\{M_m\}}^{\max}\} \right);$$

$$\text{при } \sum_{k=1}^m Dx_k < \Delta x^S \quad \{A_i\} = \{A'_{ij}\} \cap \left\{ \left(A_{i\{M_m\}} \right)_j \right\},$$

$$\text{где } \left\{ \left(A_{i\{M_m\}} \right)_j \right\} \left(\{x_N^{S_{\min}}\} \cap \{x_{\{M_m\}}^{S_{\min}}\} \cap x_j^{S_{\min}} \cap \{x_{\{M_m\}}^{\max}\} \cap x_j \right)$$

$$\left(j = 1 \dots N \right) \wedge \left(j \notin \{M_m\} \right), x_j = \Delta x^S - \sum_{j \in \{M\}} x_j^{S_{\min}}.$$

Алгоритм поиска координат вершин сечения

На основании вышеизложенного предлагается алгоритм нахождения координат вершин сечения локальной области поверхностью.

1. Задание области A , расчет вершин симплекса A^S .

2. Принимаем: число поверхностей, для которых определяются пересечения

$$m' = n - n^S;$$

номера поверхностей

$$\{m'\} = \{n\} \setminus \{n^S\};$$

номера координат, остающихся постоянными и равными минимальному ограничению

$$\{n^{\min '}\} = \emptyset.$$

3. Принимаем

$$m' = m', \{m\} = \{m'\}, \{n^{\min}\} = \{n^{\min '}\}.$$

4. При выполнении условия (14.45):

а) определяются точки, образованные пересечением m граней согласно (14.30) – (14.33) с учетом выражений (14.46), (14.47) и множества $\{n^{\min}\}$;

б) при знаке равенства в выражении (14.45) добавляется дополнительная точка согласно выражениям (14.38), (14.39) с учетом выражений (14.46), (14.47);

в) при $m' = n - n^S$ расчет заканчивается.

5. При выполнении условия (14.45):

а) рассматриваются m возможных комбинаций сочетаний пересечений $m - 1$ поверхностей, входящих во множество $\{m\}$;

б) для каждой комбинации принимаем

$$m' = m - 1, \{m\} = \{m'\} \setminus \{m_i\}, \text{ где } i = 1 \dots m, \{n^{\min}\} = \{m_i\};$$

в) осуществляется рекурсивный переход на пункт 3.

Пример определения координат сечения

В качестве примера рассмотрим нахождение сечения поверхностью $x_4 = 2,5$ для четырехкомпонентного материала, на состав которого наложены следующие ограничения:

$$62 \leq x_1 \leq 67, \quad 20 \leq x_2 \leq 24, \quad 4 \leq x_3 \leq 7, \quad 2,5 \leq x_4 \leq 5. \quad (14.49)$$

1. Задаем область A : количество компонентов $n = 4$, ограничивающие поверхности имеют следующий вид

$$x_1^{\min} = 62; \quad x_1^{\max} = 67; \quad \Delta_1 = 67 - 62 = 5;$$

$$x_2^{\min} = 20; \quad x_2^{\max} = 24; \quad \Delta_2 = 24 - 20 = 4;$$

$$x_3^{\min} = 4; \quad x_3^{\max} = 7; \quad \Delta_3 = 7 - 4 = 3;$$

$$x_4^{\min} = 2,5; \quad x_4^{\max} = 5; \quad \Delta_4 = 5 - 2,5 = 2,5;$$

$$\Delta^S = 100 - (62 + 20 + 4 + 2,5) = 11,5.$$

2. Так как пересечение поверхностей 1–2–3 есть пустое множество ($\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 12 > \Delta^S$), рассматриваем три комбинации из трех поверхностей при постоянной координате x_4^{\min} :

2. 1. Комбинация поверхностей 1–2, для которой

$$\Delta_1 + \Delta_2 = 9 < \Delta^S.$$

В координатах вершин постоянны координаты: x_1^{\max} , x_2^{\max} , x_4^{\min} , свободная координата одна – x_3 , что дает одну точку:

$$A_1(x_1^{\max}, x_2^{\max}, x_3, x_4^{\min}),$$

где

$$x_3 = (x_1^{\max} + x_2^{\max} + x_4^{\min}).$$

2.2. Комбинация поверхностей 1–3, для которой

$$\Delta_1 + \Delta_3 = 8 < \Delta^S.$$

Точка

$$A_2(x_1^{\max}, x_2, x_3^{\max}, x_4^{\min}),$$

где

$$x_2 = 1 - (x_1^{\max} + x_3^{\max} + x_4^{\min}).$$

2.3. Комбинация поверхностей 2–3:

$$\Delta_2 + \Delta_3 = 7 < \Delta^S.$$

Точка

$$A_3(x_1, x_2^{\max}, x_3^{\max}, x_4^{\min}),$$

где

$$x_1 = 1 - (x_2^{\max} + x_3^{\max} + x_4^{\min}).$$

3. В результате получены три точки плана, являющиеся вершинами сечения (табл. 14.4).

Таблица 14.4

Координаты вершин сечения

Номер точки	x_1	x_2	x_3	x_4
1	67	24	6,5	2,5
2	67	23,5	7	2,5
3	66,5	24	7	2,5

Разработанный алгоритм учитывает особенности построения планов при исследовании свойств цементных сырьевых материалов, которые определяются диапазонами ограничений на состав сырьевых смесей и клинкера, что, в свою очередь, определяет вид области A . От имеющихся алгоритм отличается тем, что пересе-

чение представлено в аналитической форме, а не находится методом перебора с исключением вырожденных случаев. Алгоритм предназначен для использования при проведении вычислительных экспериментов на факторном пространстве многокомпонентных материалов цементной промышленности, в численных методах оптимизации на симплексе при движении по границе области. Предложенный алгоритм может быть использован для исследования других многокомпонентных строительных материалов, например стекла, керамики, а также композиционных материалов.

14.3. ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕТЧАТЫХ ПЛАНОВ НА ФАКТОРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ НАЛИЧИИ ОГРАНИЧЕНИЙ

Область существования силикатных строительных материалов, в том числе и цементного клинкера, представляет локальный участок диаграммы состояния, имеющий форму параллелепипеда или многогранника [325]. Исследование и моделирование свойств сложных многокомпонентных систем с факторами, коррелированными между собой, возможно только на основе неполиномиальных моделей [259, 266, 269]. Так как при нелинейном оценивании с числом факторов больше четырех необходимо располагать точки внутри исследуемой области [268], то в данном случае не применимы планы, включающие только вершины области [14], а в связи с особенностями планирования эксперимента на диаграммах состояния не применимы и факторные планы [329, 330]. Таким образом, для исследования зависимостей типа «состав–свойство» применительно к смесям и системам цементной технологии необходимо построение неполиномиальных зависимостей на основе решетчатых ненасыщенных планов высоких порядков с непрямым методом оценки получаемой модели [187]. Также для ряда задач расчета, исследования, оптимизации и графического представления свойств многокомпонентных систем необходимо построение сетки, равномерно разбивающей заданную локальную область системы. Методика построения сеток аналогична решетчатым планам, но сетки отличаются значительно большим количеством точек.

Постановка задачи

В разделе предлагается метод построения решетчатого плана (сетки) на факторном пространстве n компонент

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1 \dots n \quad (14.50)$$

при наличии ограничений вида

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i = 1 \dots n, \quad (14.51)$$

где x_i – содержание (концентрация) i -го компонента; x_i^{\min} , x_i^{\max} – ограничения содержания i -го компонента.

Свойства, определяющие план как решетчатый, заключаются во вхождении в план всех вершин многоугольника, определяемого ограничениями, и в равномерном распределении точек плана внутри многоугольника. Если многоугольник A является симплексом, то, как показано в предыдущем разделе, выполняется условие

$$i = 1 \dots n: \quad x_i^{\max} - x_i^{\min} = 1 - \sum_{i=1}^n x_i^{\min}, \quad (14.52)$$

и координата i -й вершины A_i имеет вид

$$A_i \left(\{x^{\min}\} \cap x_i^{\min} \cup x_i^{\max} \right), \quad (14.53)$$

где $\{x^{\min}\}$ – множество нижних ограничений содержания компонентов; \cup , \cap – символы операций объединения и пересечения множеств.

Для построения решетки разобьем симплекс по каждой координате равноотстоящими друг от друга поверхностями с числом k_i и расстоянием между ними h_i , причем:

$$h_i = \frac{Dx_i}{k_i - 1}, \quad (14.54)$$

где

$$\Delta x_i = x_i^{\max} - x_i^{\min}. \quad (14.55)$$

При этом разбиение по каждой координате может иметь одинаковое число точек

$$\forall k_i = k \quad (14.56)$$

или одинаковые шаги

$$\forall h_i = h, \quad (14.57)$$

где \forall – квантор общности.

**Условие совпадения точек плана (сетки)
с вершинами локальной области**

Точки решетчатого плана на симплексе A имеют следующие координаты:

$$\forall \sum_{m=1}^n r_i = 1 : A_i \left(\left\{ x_i^{\min} + r_i \cdot h_i \mid i = 1 \dots n \right\} \right), \quad (14.58)$$

где $r_i = 0 \dots k_i - 1$.

Если многоугольник не является симплексом, ряд координат вершин определяется выражением, отличным от (14.52), и применение формулы (14.58) при этом может не обеспечить совпадения узлов решетки и вершин многоугольника.

Координаты вершин симплекса A определяются следующим образом:

$$A_i \left(\left[\left[\left\{ x_n^{\max} \right\} \setminus \left(\left\{ x_m^{\max} \right\} \cup x_i^{\max} \right) \right] \cup \left(\left\{ x_m^{\min} \right\} \cup x_i \right) \right] \right), \quad (14.59)$$

где

$$m < n; \{x_m\} \in \{x_n\}; x_i \notin \{x_m\};$$

$$x_i = 1 - \sum_{j=1}^n \{ j \neq i \Rightarrow x_j \mid j = i \Rightarrow 0 \}. \quad (14.60)$$

Все j -е координаты вершин многоугольника в этом случае принимают одно значение из фиксированного набора N_j^R :

$$N_j^R = \left\{ x_j^{\max}, x_j^{\min}, 1 - \sum_{k=1}^n r_k^{\max} x_k^{\max} - \sum_{k=1}^n r_k^{\min} x_k^{\min} \mid \begin{array}{l} r_k^{\min} \in \{0, 1\} \\ r_k^{\max} \in \{0, 1\} \end{array} \right\}. \quad (14.61)$$

Набор значений, принимаемой этой же координатой при расчете по формуле, имеет вид N_j^S :

$$N_j^S = \left\{ x_j^{\min} + r_j h_j \mid r_j = 0 \dots k_j - 1 \right\}. \quad (14.62)$$

Задача совпадения вершин многоугольника с узлами решетчатого плана заключается в выполнении условия

$$N_j^R \in N_j^S. \quad (14.63)$$

Разделим выражения для N_j^R и N_j^S на h_j . Набор N_j^S преобразуется в $N_j^{S'}$:

$$N_j^{S'} = \left\{ \frac{x_j^{\min}}{h_j} + r_j \mid r_j = 0 \dots k_j - 1 \right\}. \quad (14.64)$$

Предположим, что частное в данном выражении есть целое число:

$$\frac{x_j^{\min}}{h_j} \in N. \quad (14.65)$$

В этом случае набор $N_j^{S'}$ является последовательным набором натуральных чисел:

$$N_j^{S'} = \left\{ \frac{x_j^{\min}}{h_j} \dots \frac{x_j^{\min}}{h_j} + k_j - 1 \right\}. \quad (14.66)$$

Для истинности выражения (14.63) должны выполняться условия:

1) набор $N_j^{R'}$, полученный делением набора N_j^R на h_j , должен являться набором целых чисел;

2) интервал изменения набора $N_j^{R'}$ должен быть внутри $N_j^{S'}$.

Разделим набор N_j^R на шаг h_j :

$$N_j^{R'} = \left\{ \frac{x_j^{\max}}{h_j}, \frac{x_j^{\min}}{h_j}, \frac{1}{h_j} - \sum_{k=1}^n r_k^{\max} \frac{x_k^{\max}}{h_j} - \sum_{k=1}^n r_k^{\min} \frac{x_k^{\min}}{h_j} \mid \begin{array}{l} r_k^{\min} \in \{0, 1\} \\ r_k^{\max} \in \{0, 1\} \end{array} \right\}. \quad (14.67)$$

Набор $N_j^{R'}$ состоит из целых чисел при выполнении условия

$$\frac{\forall \left(\{x^{\max}\} \vee \{x^{\min}\} \right)}{h_j} \in \mathbb{Z}. \quad (14.68)$$

Согласно условию (14.51), значения набора N_j^R , являющиеся координатами вершин многоугольника, лежат в пределах $[x_j^{\min}, x_j^{\max}]$, что при переходе к набору $N_j^{R'}$ преобразуется в интервал

$$\left[\frac{x_j^{\min}}{h_j}, \frac{x_j^{\max}}{h_j} \right],$$

или с учетом выражений (14.54) и (14.55) в интервал

$$\left[\frac{x_j^{\min}}{h_j}, \frac{x_j^{\min}}{h_j} + k_j - 1 \right],$$

что совпадает с интервалом выражения (14.66).

На основании вышеизложенного можно сформулировать утверждение: для плана на факторном пространстве n -компонентных смесей при наличии ограничений на содержание компонентов $\{x^{\min}\} \leq \{x\} \leq \{x^{\max}\}$ необходимым и достаточным условием для совпадения узлов решетчатого плана, равномерного по каждой отдельной координате, с вершинами многоугольника, определяемого на симплексе данными ограничениями, является следующее:

$$\frac{\forall \left(\{x_n^{\max}\} \vee \{x_n^{\min}\} \right)}{\forall h_j} \in Z. \quad (14.69)$$

Алгоритм построения решетчатых планов (сеток)

Предлагается алгоритм для построения решетчатых планов (сеток) на факторном пространстве многокомпонентных смесей при наличии ограничений.

1. Задание исходных данных: ограничений $\{x_n^{\min}\}$, $\{x_n^{\max}\}$; шагов h_i или количества разбивающих поверхностей k_i .

2. Проверка условия (14.69), при его невыполнении – уточнение значений шагов h_i (или количества разбивающих поверхностей k_i) следующим образом.

В планах с одинаковыми шагами по всем факторам (14.57) необходимо согласование шага h со значениями $\{x_n^{\min}\}$, $\{x_n^{\max}\}$. Значения шага задаются равными общим делителям (ОД) для значений $\{x_n^{\min}\}$, $\{x_n^{\max}\}$, определяемым согласно известным алгоритмам с учетом не только целых, но и дробных чисел, превышающих заданное минимальное значение h . Максимальное значение шага при этом равно наибольшему общему делителю (НОД). Шаг h принимается равным наиболее близкому к нему ОД. При малом значении НОД или отсутствии ОД возможно округление ограничивающих значений по факторам на величину, равную значению необходимого шага.

В планах с различными шагами по факторам для множества $\{x_n^{\min}\}$, $\{x_n^{\max}\}$ определяется набор ОД, в дальнейшем происходит

увеличение значений k_i до совпадения значений шагов с одним из ОД. В планах с одинаковым числом точек по всем факторам (14.56) увеличение на единицу происходит для всех k_i одновременно, в неравномерных планах – каждое значение k_i увеличивается индивидуально до совпадения h_i с одним из ОД или до получения целого числа в результате деления одного из ОД на h_i . При слишком больших значениях k_i , неравномерности разбиения или невозможности найти k_i , удовлетворяющие заданным условиям, возможно округление ограничивающих значений каждого отдельного фактора на величину, равную значению шага по нему.

Можно отметить, что при выполнении условия

$$\frac{Dx_n}{n\{h_n\}} \in N \quad (14.70)$$

в план попадают средневзвешенные середины граней многоугольника, а при выполнении условия

$$\frac{Dx_n}{n^2\{h_n\}} \in N \quad (14.71)$$

– средневзвешенная середина многоугольника.

При расчете середин граней и многоугольника согласно методике [14] соответственно должны выполняться следующие условия:

$$\frac{Dx_n}{2\{h_n\}} \in N; \quad \frac{Dx_n}{2n\{h_n\}} \in N, \quad (14.72)$$

3. Расчет точек плана согласно выражению (14.58).

Пример построения планов (сетки) на локальной области

С помощью предложенной методики построены пошагово-равномерные планы и сетки на трехмерном факторном пространстве четырех компонент



согласно следующим ограничениям, соответствующим содержанию оксидов в клинкере:

$$62 \leq x_1 \leq 67; \quad 20 \leq x_2 \leq 24; \quad 4 \leq x_3 \leq 7; \quad 2 \leq x_4 \leq 5. \quad (14.73)$$

Максимально возможный размер шага для ограничений равен 1,0, минимальное значение шага принималось равным 0,25, ограничения (14.73) не округлялись. Результаты расчета представлены в табл. 14.5.

Таблица 14.5

Характеристики сетки, разбивающей локальную область

Шаг h	Количество точек	
	на многоугольнике A	на симплексе A^S , включающем многоугольник A
1	20	455
0,5	84	2925
0,25	455	20825

Отличия предлагаемого алгоритма от существующих заключаются в том, что он позволяет строить планы (сетки) с одинаковыми шагами по всем факторам. Это необходимо при построении решетчатых планов на областях, характерных для составов сырьевых смесей и клинкера цементного производства и других силикатных строительных материалов, являющихся несимметричными многоугольниками.

15. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА РАСЧЕТА СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

15.1. ПРОГРАММА РАСЧЕТА ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Для расчета цементных сырьевых смесей разработана программа Shihta, представленная на рис. 15.1. С момента создания в 1992 г. программа интенсивно эксплуатировалась в Белгородской государственной технологической академии строительных материалов в учебном процессе кафедр цемента и энергетики тепло-технологии, научной работе, на курсах повышения квалификации работников цементной промышленности.

Программа рассчитана на рядового пользователя – лаборанта, оператора, технолога. Программа проста в эксплуатации, любой человек, даже не знакомый с компьютером, затрачивает на ее освоение не более 10...15 мин.

Назначение программы

Программа предназначена для расчета двух-, трех- и четырехкомпонентных сырьевых смесей без учета и с учетом присадки золы топлива. Дополнительно возможен расчет минералогического состава и технологических параметров клинкера по его химическому составу или химическому составу сырьевой смеси (без учета и с учетом присадки золы топлива).

Исходные данные для расчета

Химический состав сырьевых компонентов и золы топлива состоит из следующих статей: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , ППП, «Прочие». Также в химическом составе присутствуют три дополнительные статьи, названия которых можно задавать и изменять и которые рассматриваются как инертные, не вступающие в реакцию во время клинкерообразования, соединения. Например, с помощью этих статей можно учесть в составе клинкера K_2O , Na_2O , TiO_2 и другие оксиды.

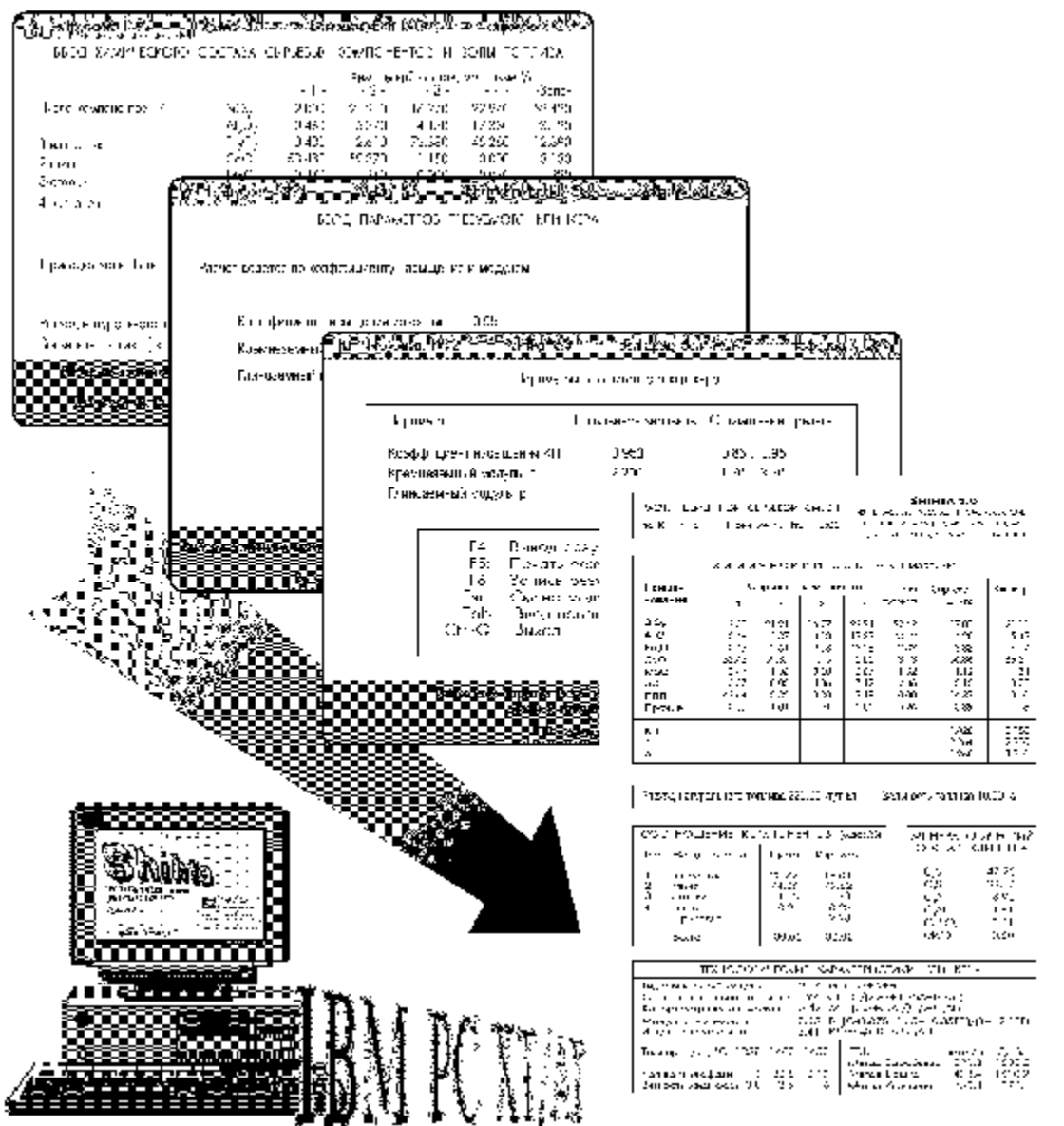


Рис. 15.1. Порядок работы с программой Shihta

Кроме ручного ввода химического состава сырья имеется возможность выбора компонентов из банка данных, разбитого на следующие разделы: карбонатные компоненты, глинистые компоненты, корректирующие добавки, золы топлив. Программа комплектуется стандартным банком химических компонентов и зол топлив цементных заводов России. Команды добавления новых и удаления существующих материалов позволяют формировать банк данных конкретного завода.

В процессе работы программа контролирует вводимые числа на допустимый диапазон (например, для оксидов он равен

0...100), что служит страховкой от грубых ошибок при вводе. Для каждого компонента выводится текущая сумма его химического состава, при несовпадении суммы со 100% можно отнести недостающую величину на статью «Прочие» или пересчитать состав на 100% путем постатейного пропорционального увеличения или уменьшения.

Доля присаживающейся золы в клинкере задается с помощью ввода значений зольности топлива и расхода натурального топлива на 1 тонну клинкера.

Количество компонентов в сырьевой смеси и наличие присадки могут изменяться в любой момент ввода исходных данных, при этом состав теряемых материалов не пропадает и числовые значения снова появляются на экране при увеличении числа компонентов или выборе наличия присадки золы топлива.

Способ задания клинкера требуемого состава

Расчет клинкера ведется по его модульным характеристикам:

- двухкомпонентная смесь, задается КН;
- трехкомпонентная смесь, задается КН и n или КН и p ;
- четырехкомпонентная смесь, задается КН, n , p .

Кроме непосредственного ввода данных характеристик возможен их расчет по химическому или минералогическому составу клинкера. При этом в рассчитанном клинкере будут соблюдаться заданные отношения между четырьмя оксидами (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO) или четырьмя минералами (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF), а абсолютное содержание этих оксидов или минералов будет пропорционально уменьшено в соответствии с содержанием в клинкере остальных соединений.

Метод расчета

Расчет производится путем решения системы линейных уравнений. При этом автоматически учитывается величина глиноземного модуля клинкера ($p < 0,638$ или $p > 0,638$).

При невозможности составить смесь согласно заданным условиям на экран выводится сообщение об этом и приводятся коэффициенты, полученные в результате расчета, анализируя которые

можно сделать заключение о характере изменения параметров клинкера для получения сырьевой смеси из заданных компонентов.

После успешного расчета на экран выводятся коэффициент насыщения и модуля полученного клинкера и предлагается выбор дальнейших действий по выводу результатов или повторению расчета.

Вывод результатов

Результаты расчета представлены в табличном виде и содержат:

- все исходные данные: названия компонентов, химический состав сырьевых компонентов и золы топлива, характеристики присадки золы;
- химические составы рассчитанных сырьевой смеси и клинкера, их модульные характеристики;
- соотношение компонентов в сырьевой смеси и клинкере;
- минералогический состав клинкера;
- некоторые характеристики клинкера: модули, количество и вязкость жидкой фазы, ТЭК.

Результаты расчета могут быть выведены на экран, распечатаны на принтере и записаны в файл.

Таким образом, программа Shihta обладает универсальностью и обеспечивает стандартные технологические расчеты, проводимые на цементных заводах и в учебном процессе.

15.2. ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА ЦЕМЕНТНОЙ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ ДВУХТИТРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Разработанный в 1990 г. программно-вычислительный комплекс расчета состава сырьевой смеси для Балаклевского цементно-шиферного комбината (БЦШК) предназначен:

- для расчета сырьевых смесей с высоким и низким титрами;
- расчета характеристик шлама в шламбассейне;
- прогнозирования свойств сырьевых смесей с различными титрами;
- прогнозирования вязкости и растекаемости шлама.

Особенности технологии сырьевых смесей БЦШК

Двухтитровая технология приготовления сырьевых смесей применяется при мокром способе производства в условиях низкой точности дозирования для двух- и трехкомпонентных сырьевых смесей. Технологическая схема двухтитрового способа приготовления сырьевой смеси БЦШК представлена на рис. 15.2, составы сырьевых компонентов и смесей – в табл. 15.1.

Особенности рассматриваемой технологии следующие. Карьерные мел и глина подразделяется на два вида. Различие известковых компонентов М1 и М2 незначительно и вызвано добычей сырья на двух уступах. Глинистые компоненты глина бурая Г1 и глина зеленая Г2 значительно различаются по составу.

Из мелов М1 и М2 путем смешивания получают компоненты М70 и М80, разделение которых вызвано большим расходом известкового компонента. Из глин Г1 и Г2 получают компонент Г. В дальнейшем путем смешивания компонентов М70, Г, а также воды В и разжижителя Р получают сырьевую смесь с низким титром С70 и аналогичным способом – сырьевую смесь с высоким титром С80.

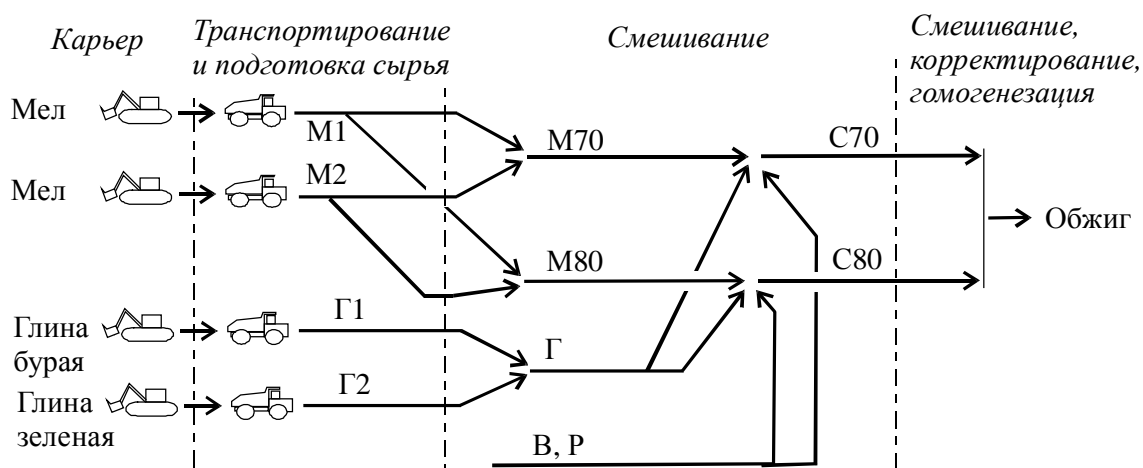


Рис. 15.2. Технология двухтитрового приготовления сырьевых смесей: М1 и М2 – известковые компоненты с двух уступов; М70 и М80 – смесь известковых компонентов; Г1 – глина бурая; Г2 – глина зеленая; Г – смесь глинистых компонентов; В – вода; Р – разжижитель шлама; С70 и С80 – сырьевая смесь с различными титрами

Составы сырьевых компонентов и смесей БЦШК

Характеристики	Сырьевые компоненты							Сырьевая смесь	
	Мел				Глина				
	М1	М2	М70	М80	Г1	Г2	Г	Титр 70	Титр 80
Состав, мас. %:									
SiO ₂	4,11	4,12	4,12	4,11	65,29	49,71	52,40	20,32	10,06
Al ₂ O ₃	1,06	0,97	1,00	1,05	14,40	12,88	13,14	5,07	2,54
Fe ₂ O ₃	0,51	0,50	0,50	0,51	7,39	6,58	6,72	2,59	1,28
CaO	52,72	52,26	52,38	52,65	9,00	10,78	10,48	38,31	47,45
MgO	0,23	0,23	0,23	0,23	1,14	0,19	0,35	0,27	0,25
SO ₃	0,21	0,00	0,05	0,18	0,20	0,67	0,59	0,23	0,23
ППП	41,16	41,82	41,65	41,26	2,58	19,18	16,32	33,15	38,19
Прочее	0,00	0,10	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,05	0,01
Титр, %	86,45	96,30	93,73	88,01	18,90	23,90	23,04	70,00	80,00
Естественная влажность, %	24,00	28,30	27,23	24,72	19,20	22,30	21,78	25,48	24,37
Плотность, кг/м ³	2300	2500	2450	2330	3400	3600	3570	2810	2480
КН	–	–	–	–	–	–	–	0,51	1,52
<i>n</i>	–	–	–	–	–	–	–	2,65	2,64
<i>p</i>	–	–	–	–	–	–	–	1,96	1,99

Задачи расчета сырьевых смесей на БЦШК

Управление приготовлением сырьевой смеси осуществляется определением отношения смешиваемых компонентов М1 : М2; Г1 : Г2; М70 : Г; М80 : Г. Отношения М1 : М2 и Г1 : Г2 являются отношениями дискретных величин, так как составляющие дозируются экскаваторами и доставляются автотранспортом. Соотношение М1 : М2 практически не влияет на состав сырьевой смеси и клинкера ввиду близкого химического состава этих компонентов.

Из-за малого содержания оксидов кремния, алюминия и железа в меле модульные характеристики n и p сырьевой смеси определяются в основном аналогичными характеристиками глинистого компонента. Поэтому глиноземный и кремнеземный модули сырьевой смеси и клинкера являются стабилизированными, что подтверждается статистическими данными завода.

Включение в один расчет всех стадий смешивания невозможно, так как в связи со случайной составляющей проектные составы смесей С70 и С80 значительно отклоняются от полученных. Задача расчета разбивается на две стадии: расчет смесей С70 и С80; расчет и корректирование сырьевой смеси из смесей С70 и С80. Для решения второй задачи существуют известные методы [294], поэтому рассмотрим решение первой задачи.

Технологические требования к смесям С70 и С80 заключаются в обеспечении следующих характеристик шлама: влажности, титра, вязкости, растекаемости.

Титр обеспечивается смешением известкового М и глинистого Г компонентов, причем последний состоит из составляющих Г1 и Г2. Если необходимо найти соотношение Г1 и Г2, то в этом случае имеет место трехкомпонентная сырьевая смесь, для расчета которой необходимы два параметра, один из которых титр. Так как модули n и p стабилизированы, то в качестве второго параметра используем КН. Для разработки уравнений расчета сырьевой смеси используются предложенные в работе методы формализации расчета. После определения отношения значения Г1 и Г2 приводятся к целому виду с использованием коэффициента k :

$$\left[\left| \text{int}(k \Gamma 1) - k \Gamma 1 \right| \leq \varepsilon \right] \wedge \left[\left| \text{int}(k \Gamma 2) - k \Gamma 2 \right| \leq \varepsilon \right], k \in N, \quad (15.1)$$

где int – отделение целой части; ε – абсолютная точность; N – множество натуральных чисел.

Если отношение Г1 : Г2 задается исходя из производственных условий, имеет место двухкомпонентная сырьевая смесь, рассчитываемая по титру, уравнения для расчета которой также разрабатываются на основе предлагаемых методик.

Для снижения вязкости шлама и снижения необходимой для транспортировки влажности в смесь вводят разжижитель. Расход воды определяется согласно следующему выражению:

$$G_{\text{вл}} = \left(\frac{100 - W_{\text{ест}}}{100 - W} \right) G_{\text{см}}^{\text{сух}} - \frac{G_{\text{разж}}^{\text{сух}}}{k_{\text{разж}}} 100, \quad (15.2)$$

где $G_{\text{вл}}$ – расход воды; $W_{\text{ест}}$ – естественная влажность смеси, мас. %; W – влажность смеси, мас. %; $G_{\text{см}}^{\text{сух}}$ – массовый расход сухой смеси; $G_{\text{разж}}^{\text{сух}}$ – массовый расход сухого разжижителя; $k_{\text{разж}}$ – концентрация разжижителя, мас. %.

Для прогнозирования вязкости и растекаемости сырьевой смеси на основании статистических данных определено, что эти параметры зависят в основном от влажности смеси W . Для диапазона влажности 35...45 мас. % получены регрессионные зависимости для вязкости η , спуз, и растекаемости r , мм, шлама Балакеевского завода:

$$\eta = -88,9 + 1,9819 \cdot W + \frac{1339,2}{W} - 0,014735 \cdot W^2, \quad (15.3)$$

$$r = -436,8 + 2220,3 \cdot \eta + \frac{38,859}{\eta} - 3236,2 \cdot \eta^2.$$

Программы расчета сырьевых смесей для БЦШК

Для расчета составов шламов с низким и высоким титром разработаны программные средства Kar'er, версии 3.1 и 2.0. Программа Kar'er 3.1 предназначена для расчета составов сырьевых смесей с высоким и низким титрами. В качестве исходных данных задаются:

- химические составы, естественная влажность, плотность и титр сырьевых компонентов М1, М2, Г1, Г2;
- необходимый титр, влажность, массовые расходы разжижителя и смесей с высоким и низким титром С70 и С80;
- концентрация и плотность раствора разжижителя.

Расчет смесей осуществляется в диалоговом режиме, представленном на рис. 15.3. В качестве параметров могут задаваться как отношения $M1 : M2$ и $G1 : G2$, так и коэффициент насыщения известью смесей. При изменении одного из этих параметров второй рассчитывается автоматически. На экране графически представляется диапазон существования КН для смесей с низким и высоким титрами и зависимость расхода влаги от значений КН. Также приводятся химические составы, характеристики, влажность и титр сырьевых смесей.

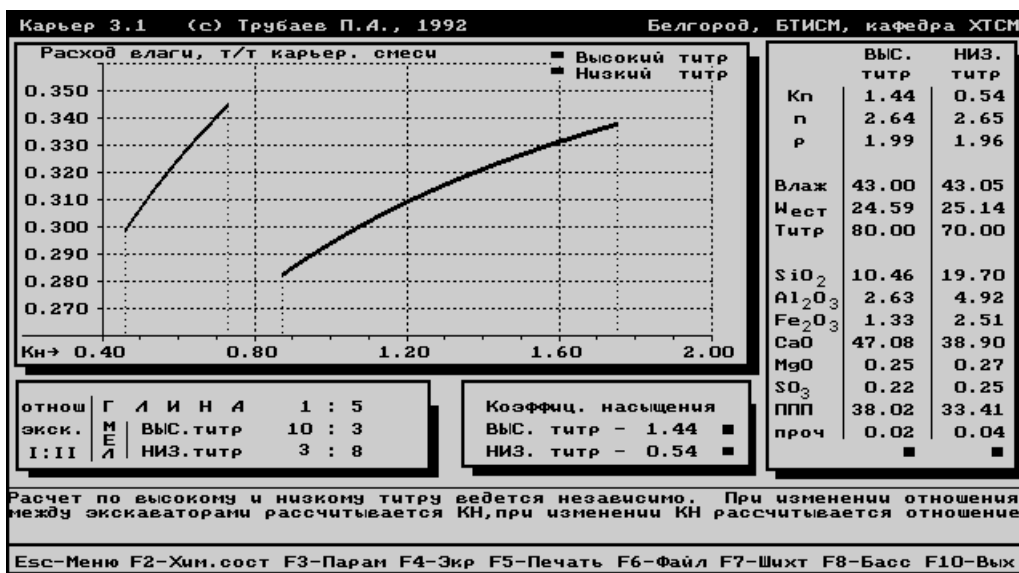


Рис. 15.3. Диалоговый режим программы Kar'yer 3.1 для расчета сырьевых смесей с высоким и низким титрами

В результатах расчета (табл. 15.2) представлены характеристики компонентов $M1, M2, G1, G2$, а также смесей $M70, M80, G, C70, C80$. Для смесей с низким и высоким титрами выводятся соотношения входящих в них составляющих, приведенные в относительных долях, объемных и массовых расходах.

В программу также включена возможность расчета характеристик шлама, поступающего в шламбассейн по объемному расходу подаваемых в них компонентов: мела, глины, воды и разжижителя, что необходимо для обработки данных контроля и прогнозирования объема и состава шлама в шламбассейне.

**Результаты расчета сырьевых шламов
с высоким и низким титрами, выводимые программой Kar'er 3.1**

Состав сырьевой смеси (титр 70, влажность 43,05 %)					
Компоненты	мас. %	об. %	т/ч	м ³ /ч	Примечания
Мел 0,680	51,99	41,20	136,04	55,53	Отношение 1:3
Глина 0,320	24,44	13,30	63,96	17,93	Отношение 1:5
Вода	22,04	42,80	57,69	57,69	0,308 т/т
Разжижитель 20,0%	1,53	2,70	4,00	3,64	0,800 сух. т/ч
Всего	100,00	100,00	261,69	134,78	200,0 т/ч

Состав сырьевой смеси (титр 80, влажность 43,05 %)					
Компоненты	мас. %	об. %	т/ч	м ³ /ч	Примечания
Мел 0,881	66,38	51,22	88,07	37,75	Отношение 20:4
Глина 0,119	8,99	4,54	11,93	3,34	Отношение 1:5
Вода	23,88	43,00	31,69	31,69	0,327 т/т
Разжижитель 20,0%	0,75	1,23	1,00	0,91	0,200 сух. т/ч
Всего	100,00	100,00	132,69	73,69	100,0 т/ч

Для моделирования характеристик смесей при различных титрах разработана программа Kar'er 2.0 (рис. 15.4).

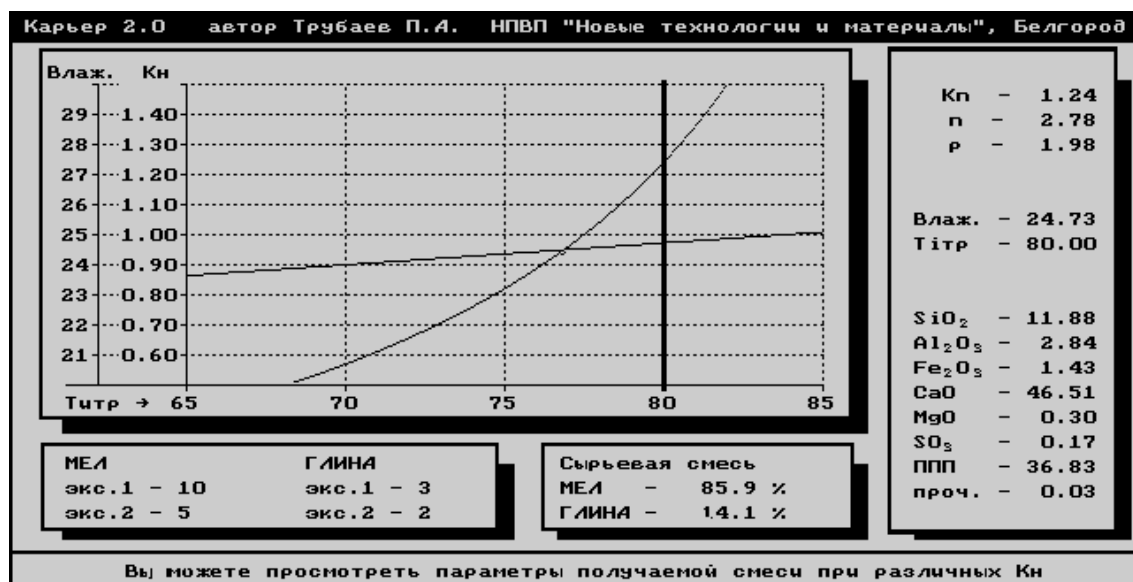


Рис. 15.4. Диалоговый режим программы Kar'er 2.0 для моделирования сырьевых смесей с различным титром

Диалоговое окно программы представляет графическую зависимость естественной влажности и коэффициента насыщения сырьевой смеси при различных титрах и позволяет получать характеристики сырьевых смесей по значениям титра и соотношению сырьевых компонентов.

Разработанные программные средства позволили проводить расчет сырьевых смесей с учетом особенности технологии БЦШК, что обеспечило повышение стабильности химического состава сырьевого шлама, подаваемого в печь, и увеличение оперативности управления процессом приготовления сырьевой смеси. При наличии стабильного состава сырьевых компонентов разработанные программные средства обеспечили переход на приготовление сырьевых смесей с титрами 71 и 79, что обеспечило снижение колебания титра сырьевого шлама, подаваемого в печь, с $\pm 0,35$ до $\pm 0,28$, или на 25%.

15.3. МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТА МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЫСОКОЖЕЛЕЗИСТЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ*

Особенность расчета сырьевых смесей для магнезиальных высокожелезистых клинкеров, получение которых описано в [331–333], заключается в том, что в зависимости от назначения вяжущего необходимо использовать различные характеристики клинкера.

В клинкерах рассматриваемого типа общими фазами будут C_2S , MF и C_2F . Условием получения шеннонит-магнезиоферритного клинкера является избыток кремнезема, необходимого для насыщения CaO до C_2S . Для расчета этого клинкера используют модуль

$$a = C / S$$

со значением 1,8...2,0 и модуль

* Работа выполнена совместно с д-ром техн. наук, проф. И. Г. Лугиной, канд. техн. наук Н. В. Литвишковой, канд. техн. наук, доц. Л. Д. Шаховой.

$$m_f = (C_2S - C_4AF) / (MF + C_2F),$$

имеющий значение более 1,2. Расчет саморассыпающегося дикальцево-магнезиоферритового клинкера, не доведенного до спекания, условием получения которого является наличие несвязанного СаО, производят по модулю

$$a = C / S$$

со значением 2,5...4. Для расчета высокожелезистого цемента можно применить модуль m_f , значение которого меньше 1,0. Для перечисленных видов вяжущих, содержащих оксиды магния и железа, также используются модули

$$b = M / F$$

и

$$c = C / F.$$

Так как кроме C_2S , MF и C_2F в магнезиальных высокожелезистых клинкерах имеются другие фазы, то для расчета трех- и четырехкомпонентных смесей дополнительно применяют модули

$$d = (C + M) / S$$

и

$$e = (C_3S + C_2S) / (C_2F + C_4AF),$$

а для дикальцево-магнезиоферритного клинкера, не доведенного до спекания, – модуль

$$f = M / A.$$

Характеристики, используемые при расчете различных видов магнезиальных высокожелезистых клинкеров, и их возможные значения приведены в табл. 15.3.

Для реализации расчета состава сырьевой смеси, обеспечивающей получение магнезиального клинкера, его равновесный фазовый состав выражен в общем виде с включением всех возможных фаз, присутствующих в этом клинкере. Для пентатопов,

одновременно с C_2S содержащих MF или C_2F , фазы представлены множеством $\{H\}$:

$$\{H\} = \{C_3S, C_2S, C_2F, C_4AF, MF, MA, M, C_3MS_2, C_2MS_2, CF, CF_2, C, F\}, \quad (15.4)$$

элементами которого является массовое содержание фаз, причем при отсутствии фазы в клинкере ее содержание равно нулю.

Химический состав сырьевой смеси и клинкера составляет множество $\{Z\}$:

$$\{Z\} = \{S, A, F, C, M\}, \quad (15.5)$$

а элементарные пентатопы, классифицированные по номерам согласно [334] – множество $\{P\}$:

$$\{P\} = \{2, 3, 8a, 8b, 9, 10, 20, 21, 22, 25, 27, 28\}. \quad (15.6)$$

При этом пентатопы $8a$ и $8b$ имеют одинаковый фазовый состав и различаются по типу получаемых клинкеров и набору характеристик, задаваемых при их расчете.

Расчет содержания отдельной фазы H клинкера выполняется по его химическому составу с использованием коэффициентов k :

$$H = k_S S + k_A A + k_F F + k_C C + k_M M = \sum_{j \in \{Z\}} k_j Z_j. \quad (15.7)$$

Таким образом, общее выражение для расчета фазового состава пентатопов имеет вид

$$H_{p,m} = \sum_{j \in \{Z\}} k_{p,m,j} Z_j, \quad p \in \{P\}, \quad m \in \{H\}, \quad (15.8)$$

где $k_{p,m,j}$ – трехмерный массив коэффициентов.

Расчет содержания компонентов x_i в сырьевой смеси, содержащей N компонентов, производится по следующим вышеприведенным характеристикам клинкера:

$$a = \frac{C}{S}; \quad b = \frac{F}{M}; \quad c = \frac{C}{F};$$

$$d = \frac{C + M}{S}; \quad e = \frac{C_2S + C_3S}{C_2F + C_4AF}; \quad (15.9)$$

$$f = \frac{M}{A}; \quad m_f = \frac{C_2S - C_4AF}{MF + C_2F}.$$

Количество задаваемых характеристик определяется числом компонентов и равно $N-1$. Алгоритм расчета предусматривает возможность задания различных вариантов наборов характеристик, которые используются для соответствующих пентатопов (табл. 15.3).

Таблица 15.3

Требования к составу магнезиальных высокожелезистых клинкеров

Вид клинкера	Фазовый состав и номер пентатопа согласно работе [334]	Модули, задаваемые при расчете сырьевой смеси, при числе компонентов			Значения модулей
		2	3	4	
1	2	3	4	5	6
Дикальциево-магнезитоферритный	M-C-C ₃ S-C ₂ F-C ₄ AF (№2)	a	a, c	a, c, e	$a=2,5...4,0$ $c=0,5...0,9$
	M-C ₃ S-C ₂ S-C ₂ F-C ₄ AF (№3)				
(не доведенный до спекания)	M-C ₂ S-MF-C ₂ F-C ₄ AF (№8a)	a	a, c	a, b, c	$e=0,5...1,5$ $b=3,8...4,2$

1	2	3	4	5	6
Шеннонит-магнезиоферритный (для автоклавных строительных изделий)	M-C ₂ S-MF-C ₂ F-C ₄ AF (№8b) C ₂ S-C ₂ F-C ₄ AF-CF-MF (№21)	<i>a</i>	<i>a, b</i>	<i>a, b, c</i> или <i>m_f</i>	<i>a</i> =1,8...2,0 <i>b</i> =3,8...4,2
	M-C ₂ S-C ₃ SMS ₂ -MA-MF (№10) C ₂ S-C ₃ MS ₂ -C ₂ MS ₂ -MA-MF (№20) C ₂ S-C ₂ MS ₂ -MA-MF-F (№28)	<i>a</i>	<i>a, b</i>	<i>a, b, d</i> или <i>f</i>	<i>c</i> =0,5...0,9 <i>d</i> =1,2...1,8 <i>f</i> =0,2...0,6
	M-C ₂ S-MA-MF-C ₄ AF (№9) C ₂ S-C ₄ AF-CF-MA-MF (№22) C ₂ S-CF-CF ₂ -MA-MF (№25)	<i>a</i>	<i>a, b</i>	<i>a, b, f</i>	<i>m_f</i> > 1,2
Магнезиальный высокожелезистый (для окомкования железорудных концентратов)	M-C ₂ S-MF-C ₂ F-C ₄ AF (№8b) C ₂ S-C ₂ F-C ₄ AF-CF-MF (№21) C ₂ S-C ₂ F-MA-MF-F (№27)	<i>a</i>	<i>a, b</i>	<i>a, b, c</i> или <i>m_f</i>	<i>a</i> =1,8...2,2 <i>b</i> =3,8...4,2 <i>c</i> =0,5...0,9 <i>m_f</i> < 1

При составлении систем уравнений для расчета использовалась методика формализации расчета, предложенная в подразделе 12. Получены линейные уравнения, соответствующие каждой из вышеприведенных характеристик:

$$\sum_{i=1}^N (a \cdot S_i - C_i) x_i = 0; \quad (15.10)$$

$$\sum_{i=1}^N (b \cdot S_i - C_i) x_i = 0; \quad (15.11)$$

$$\sum_{i=1}^N (c S_i - C_i)x_i = 0; \quad (15.12)$$

$$\sum_{i=1}^N (c F_i - C_i - M_i)x_i = 0; \quad (15.13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N [& \left(\sum_{j \in \{Z\}} k_{p, C_2F, j} Z_j + \sum_{j \in \{Z\}} k_{p, C_4AF, j} Z_j \right) e - \\ & - \left(\sum_{j \in \{Z\}} k_{p, C_2S, j} Z_j + \sum_{j \in \{Z\}} k_{p, C_3S, j} Z_j \right)] x_i = 0; \end{aligned} \quad (15.14)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j \in \{Z\}} k_{p, MF, j} Z_j + \sum_{j \in \{Z\}} k_{p, C_2F, j} Z_j \right) m_f - \\ - \left(\sum_{j \in \{Z\}} k_{p, C_2S, j} Z_j - \sum_{j \in \{Z\}} k_{p, C_4AF, j} Z_j \right)] x_i = 0, \end{aligned} \quad (15.15)$$

где C_i , S_i , A_i , F_i , M_i , а также Z_j – содержание оксидов в i -м сырьевом компоненте.

Системы линейных уравнений для расчета сырьевой смеси включают уравнения (15.10) – (15.15) в соответствии с выбранным вариантом расчета и номером пентатопа, для которого проводится расчет, а также уравнение материального баланса:

$$\sum_{i=1}^N x_i = 100. \quad (15.16)$$

Расчет проводится для всех пентатопов множества $\{P\}$. Условием существования p -го пентатопа является неотрицательность рассчитанного содержания компонентов и фаз:

$$(\forall x_i \geq 0 \mid I = 1 \dots N) \vee (\forall H_{p, m} \geq 0 \mid m \in \{H\}). \quad (15.17)$$

Результатами расчета являются химический состав сырьевой смеси и клинкера, содержание компонентов в сырьевой смеси и фазовые составы клинкера, удовлетворяющие условию (15.16). В дополнение к расчету сырьевой смеси алгоритм позволяет для заданного состава сырьевой смеси или клинкера определять пентатопы, соответствующие этому составу.

Разработанное методическое и программное обеспечение дает возможность производить расчет сырьевых смесей при синтезе магнезиальных высокожелезистых клинкеров, состав которых выражен различными пентатопами. Предложенная методика позволяет модифицировать и дополнять расчет, в частности, для клинкеров других видов, что достигается изменением множеств $\{Z\}$, $\{P\}$, $\{H\}$ и массива коэффициентов k .

15.4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА РАСЧЕТА СТЕКОЛЬНОЙ СЫРЬЕВОЙ ШИХТЫ

Расчет состава сырьевой шихты является частью технологического процесса получения стекла и заключается в определении соотношения компонентов, обеспечивающего заданные свойства продукта. В отличие от других стройматериалов даже небольшое отклонение состава стекла от заданного приводит к заметным изменениям его свойств. Поэтому расчеты требуют высокой точности и учета всех соединений, входящих в сырье. Известные в настоящее время методы расчета стекольных шихт [156] не систематизированы и обычно рассматриваются на частных примерах, причем некоторые из методов при наличии в сырье примесей позволяют рассчитать состав стекла лишь приблизительно. В разделе предлагается формализация математического описания расчетов шихт с учетом разных способов определения требований к стеклу и наличия в шихте или стекле компонентов с заданным расходом.

Методы расчета шихты

При получении системы уравнений расчета шихты использовался метод формализации, предложенный в этой главе, с учетом особенностей технологии стекла. Примем, что шихта состоит из N сырьевых компонентов (материалов). Химический (оксидный)

состав стекла задается множеством статей $\{S_G\}$, причем размерность множества $G \geq N$. При термообработке шихты из нее выделяются летучие вещества (так называемый угар шихты), представленные множеством $\{S'_F\}$, причем соединения из этого множества могут как присутствовать в множестве $\{S_G\}$, так и не входить в него. В первом случае это частично выгорающие соединения, массовая доля потерь при получении стекла которых

$$L \in]0;1[, \quad (15.18)$$

во втором – технологические газы, для которых

$$L = 1. \quad (15.19)$$

Состав сырьевых компонентов и шихты представлен множеством $\{S_R^0\}$, которое может быть преобразовано в эквивалентное множество

$$\{S_R^{0'}\} = \{S_G\} \cup \{S'_F\}. \quad (15.20)$$

В качестве примера приведем множества:

$$\{S_3^0\} = \{\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{CaCO}_3, \text{SiO}_2\};$$

$$\{S_4^{0'}\} = \{\text{SiO}_2, \text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}, \text{CO}_2\};$$

$$\{S_3\} = \{\text{SiO}_2, \text{Na}_2\text{O}, \text{CaO}\};$$

$$\{S'_2\} = \{\text{CO}_2, \text{Na}_2\text{O}\}.$$

Для расчета задаются требования к стеклу – содержание отдельных соединений или сумма нескольких соединений из множества $\{S_G\}$. Задаваемые требования составляют множество $\{P_Q\}$, размерность которого Q определяется видом проводимого расчета и наличием компонентов с фиксированным расходом, и каждый элемент которого P_q представляет сумму из Y элементов множества $\{S_G\}$:

$$\{P_Q\} = \left\{ P_q = \sum_{y=1}^Y S_y \mid S_y \in \{S_G\}; q = 1 \dots Q \right\} \equiv$$

$$\equiv \left\{ \sum_{y \in \bar{I} P_q} S_y \mid S_y \in \{S_G\}; q = 1 \dots Q \right\}. \quad (15.21)$$

Принятые обозначения множеств приведены в табл. 15.4.

Таблица 15.4

Обозначения множеств в уравнениях расчета стекольной шихты

Название	Обозначение	Размерность	Индексы
Сырьевые компоненты	$\{G_N\}$	N	n
Добавки в сырьевую смесь и стекло	$\{A_D\}$	D	d
Требования к составу стекла	$\{P_Q\}$	Q	q
Состав q -го требования (элемент P_q множества $\{P_Q\}$)	P_q	Y	y
Соединения (оксиды) стекла	$\{S_G\}$	G	g
Летучие соединения	$\{S_F\}$	F	f
Соединения сырья и шихты	$\{S_R^0\}$	R	r

Если в качестве требований задается массовое процентное содержание соединений в стекле в виде численных значений p_q элементов множества $\{P_{N-1}\}$, то система уравнений для расчета имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^N \left[\sum_{y \in \bar{I} P_q} \left(m_{yn} \frac{1 - L_y}{1 - L_n} \right) \right] x_n = p_q; \quad p_q \in \{P_{N-1}\}; \quad m_{yn} \in \{S_R^0\}; \\ \sum_{n=1}^N x_n = 1; \quad q = 1 \dots N - 1, \end{array} \right. \quad (15.22)$$

где m_{yn} – массовое содержание соединения y в n -м сырьевом компоненте, %; x_n – содержание n -го прокаленного сырьевого компонента в стекле, массовая доли (неизвестная величина); L_y

и L_n – потери (выход летучих) при варке соединения y и n -го сырьевого компонента, массовые доли:

$$L_n = 0,01 \sum_{r \in \{S_F\}} m_{rn} L_n. \quad (15.23)$$

По существу уравнения системы (15.22) являются материальным балансом содержания соединений в шихте. Аналогично может быть составлено уравнение для расчета по отношению масс соединений (то есть по массовым долям). Для этого размерность множества требований $\{P\}$ увеличивается до N , а из системы (15.22) удаляется последнее уравнение, задающее равенство единице суммы массы составляющих стекла, после чего она примет вид:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \left[\sum_{y \in P_q} \left(m_{yn} \frac{1-L_y}{1-L_n} \right) \right] x_n = p'_q; \\ p'_q \in \{P_N\}; q = 1 \dots N; m_{yn} \in \{S_R^0\}; \end{cases} \quad (15.24)$$

В этом случае при наличии в стекле соединений, не вошедших в множество $\{P_N\}$, содержание заданных соединений или их сумм в рассчитанном стекле не будет точно соответствовать заданным требованиям p'_q , но будет соблюдаться соотношение между массами $p'_1 : p'_2 : \dots : p'_N$. Преимущества такого расчета в том, что количество требований к стеклу не $N - 1$, а N , то есть на одно больше.

Для расчета по мольному соотношению соединений или сумм нескольких соединений в стекле $\mu'_1 : \mu'_2 : \dots : \mu'_N$ система (15.24) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{cases} \sum_{n=1}^N \left[\sum_{y \in P_q} \left(\frac{m_{yn}}{M_y} \frac{1-L_y}{1-L_n} \right) \right] x_n = \mu'_q; \\ \mu'_q \in \{P_N\}; q = 1 \dots N; m_{yn} \in \{S_R^0\}; \end{cases} \quad (15.25)$$

где M_y – молярная масса соединения y .

Системы (15.22) – (15.25) подобны и при использовании в алгоритмах расчета легко поддаются объединению.

В отличие от расчета по массовым процентам, при расчете стекла по составу, заданному в мольных процентах, не соблюдается закон сохранения, то есть количество молей исходных веществ не равно количеству молей продуктов реакций. Процентное мольное содержание μ_y соединения выражается через его массовое содержание m_y :

$$\mu_{yn} = (m_{yn} / M_y) \left(\sum_{g \in \{S_G\}} m_{gn} / M_g \right)^{-1} = \frac{m_{yn}}{M_y \mu_n}; \quad (15.26)$$

после этого, объединяя выражения (15.22) и (15.26), получаем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^N \left[\frac{\mu_q \mu_n}{100} - \sum_{y \in P_q} \left(\frac{m_{yn}}{M_y} \frac{1 - L_y}{1 - L_n} \right) \right] x_n = 0; \\ \mu_q \in \{P_N\}; q = 1 \dots N; m_{yn} \in \{S_R^0\}; \\ \sum_{n=1}^N x_n = 1; \quad q = 1 \dots N - 1, \end{array} \right. \quad (15.27)$$

где μ_n – молярная масса n -го компонента.

Предлагаемые системы уравнений (15.22) – (15.25), (15.27), предназначенные для проведения расчета четырьмя разными способами, являются частными случаями формализованного уравнения расчета силикатосодержащих многокомпонентных сырьевых смесей, в котором в качестве характеристик использовались выражения (15.21) и (15.25).

Учет компонентов с заданным содержанием

В ряде случаев при расчете необходимо учитывать материалы, содержание которых в шихте или стекле известно. Это может быть стеклобой, отличающийся по составу от получаемого стек-

ла, добавки для получения специальных стекол или необходимые для процесса варки, растворимый в стекле огнеупор. Эти материалы задаются как отдельные компоненты, и в системы уравнения (15.22) или (15.25) добавляется условие, задающее расход компонента, которое имеет вид

$$x_n = a_n / (1 - a_6), \quad (15.28)$$

где n – номер компонента; a_n – заданное содержание компонента в стекле, массовая доля; a_6 – содержание в стекле стеклобоя, массовая доля.

Каждый из таких материалов уменьшает на единицу количество требований, задаваемых к составу стекла. Так, если задано N_a материалов с известными расходами, то размерность множества $\{P\}$ в системах (15.22), (15.25) будет равна $N - N_a - 1$.

Если известно содержание компонента в шихте a_n^0 , то

$$a_n = \frac{1 - L_n}{1 - L_0} a_n^0, \quad (15.29)$$

где L_n и L_0 – потери при варке компонента и шихты, массовые доли. Так как при выражении L_0 через неизвестные содержания компонентов x получается нелинейное уравнение, то в таких случаях в алгоритмах расчета целесообразнее использовать итерационные методы с последовательным уточнением L_0 .

Учет компонентов с номерами $n1$ и $n2$, используемых в шихте в заданной пропорции $x_{n1} : x_{n2} = k_{n1} : k_{n2}$, производится путем добавления в системы (15.22) – (15.25), (15.27) уравнений

$$k_{n2} x_{n1} - k_{n1} x_{n2} = 0.$$

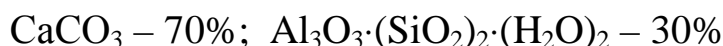
Эти уравнение также снижают размерность множества $\{P\}$.

Программа расчета стекольных шихт

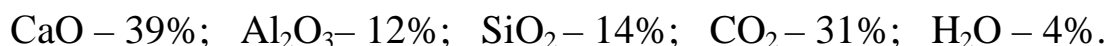
На основе представленного математического описания создана программа расчета стекольных сырьевых шихт. Она позволяет проводить расчет с любым числом сырьевых компонентов и различными составами сырья и стекол, учитывать ввод отдельных

компонентов с заданным расходом или в заданной пропорции, рассчитывать состав стекла по известному составу шихты или заданному содержанию компонентов.

Состав сырья может быть представлен как содержанием оксидов, так и естественных соединений. Например, состав мергеля задается как



или как



В программу заложена база данных, включающая описание и термодинамические свойства 200 соединений, которые можно в произвольном сочетании включать в состав сырья. Базу данных можно изменять и расширять.

Кроме указания соединений, разлагающихся при термообработке, потери при варке (выход летучих) также можно задавать как общей суммой (в виде потерь при прокаливании), так и отдельными статьями (CO_2 , H_2O и др.). При расчете учитываются щелочи и другие частично улетучивающиеся соединения. Также имеется режим учета влажности сырья.

Состав стекла задается четырьмя способами: массовыми процентами, мольными процентами, отношением масс (массовыми долями), отношением молей (мольными долями). Пример расчета по мольным долям приведен на рис. 15.5.

Стекло - Расчет шихты

Сырье Шихта и стекло Свойства Тепловой расчет шихты

ТРЕБОВАНИЯ к составу стекла моли

SiO2	64.00
CaO	9.00
Na2O+K2O	19.00

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

	Шихта		Стекло	Материал	Шихта Стекло	
	мас.%	мас.%	мол.%		на 100 кг стекла	
SiO2	54.06	68.02	68.90	Песок	54.6	52.3
CaO	7.10	8.93	9.69	Известняк	9.3	5.5
Al2O3	1.28	1.60	0.96	Сода	30.4	17.2
Na2O [щ]	17.36	19.66	19.30	Стеклобой	-	25.0
K2O [щ]	1.58	1.79	1.15	Сумма	94.4	100.0
CO2 [л]	18.63			Расход шихты 0.944 кг/кг стекла		
Прочие лет.	-			Угар шихты 20.5%		
Сумма	100.00	100.00	100.00			

Рис. 15.5. Пример расчета шихты

Так, расчет одного и того же стекла из трехкомпонентной сырьевой шихты возможно производить по следующим требованиям:

а) $\text{SiO}_2 - 70,98, \text{Na}_2\text{O} - 21,65$ мас.%;

б) $\text{SiO}_2 - 69,23, \text{Na}_2\text{O} - 23,08$ мол.%;

в) $\text{SiO}_2 : \text{CaO} : \text{Na}_2\text{O} = 70,98 : 7,37 : 21,65$ кг;

г) $\text{SiO}_2 : \text{CaO} : \text{Na}_2\text{O} = 9 : 1 : 3$ мол.

В первых двух случаях массовое и мольное содержание SiO_2 и Na_2O будет точно соответствовать заданным значениям. В третьем случае процентное содержание заданных компонентов может отличаться от заданных масс, но будут сохраняться заданные пропорции. Также вместо оксидов может быть задано содержание соединений, образующихся в стекле. Так, стекло рассматриваемого примера в программе может быть задано в виде мольных долей



Результатами расчета являются составы шихты и стекла и содержание в них сырьевых компонентов. Рассчитывается массовый состав стекла в процентах, а также молярный: в виде процентов или количества молей (за один моль может быть принято любое соединение, а содержание остальных определяется по этому значению). Содержание сырьевых компонентов в шихте и стекле может быть рассчитано в массовых процентах на 100 кг шихты, стекла или любого из компонентов.

Тепловой расчет шихты

В программе производится тепловой расчет шихты (рис. 15.6).

Для этого на основе базы данных по соединениям методами анализа многокомпонентных систем определяется естественный состав шихты и стекла.

Стекло - Расчет шихты

Сырье | Шихта и стекло | Свойства | Тепловой расчет шихты

Температуры, °C
 шихты: 10
 варки: 1400
 отх. газов: 1000

Расчет теплоемкости
 метод Шарпа и Гинтнера

Соединения, образующиеся при варке стекла
 Na₂O·3SiO₂, Na₂O·2SiO₂, K₂O·Al₂O₃·6SiO₂, CaO·SiO₂

Автоматический выбор

Также возможны следующие составы:
 CaO·SiO₂, Na₂O·3SiO₂, 2Na₂O·CaO·3SiO₂
 CaO·SiO₂, Na₂O·3SiO₂, Na₂O·2SiO₂

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Состав шихты	Состав стекла
0.65 - SiO ₂	0.44 - Na ₂ O·3SiO ₂
0.16 - CaCO ₃	0.29 - Na ₂ O·2SiO ₂
0.37 - Na ₂ CO ₃	0.07 - K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂
0.03 - K ₂ CO ₃	0.18 - CaO·SiO ₂
0.03 - Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O	0.01 - K ₂ O
1.23	1.00
	0.23 - CO ₂
	0.00 - H ₂ O
	0.23

Затраты тепла на кг стекла

Теоретические затраты на варку
 2522.9 кДж (602.6 ккал)

На варку стекла (0.750 кг)
 1892.2 кДж (451.9 ккал)

На испарение и нагрев влаги (W=5%)
 229.4 кДж (54.8 ккал)

На плавление стеклобоя (0.250 кг)
 443.0 кДж (105.8 ккал)

Всего 2564.6 кДж (612.5 ккал)

Рис. 15.6. Пример теплового расчета шихты

Расход тепла на варку стекла выполняется по способу Крегера [156], при этом теплоемкость стекла может быть рассчитана по методу Шарпа и Гинтнера или по термодинамическим данным. Различие в результатах при этом в среднем 0,5–1%.

В результате предложенная формализация расчета цементных сырьевых смесей позволила создать математическое обеспечение и программу расчета сырьевых шихт и стекла, что свидетельствует об универсальности предлагаемых методов.

16. ПРОГРАММА РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

16.1. АКТУАЛЬНОСТЬ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММЫ ОПТИМИЗАЦИИ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Эффективность процесса обжига цементного клинкера во многом определяется свойствами и составом перерабатываемого сырья. Общие принципы подбора оптимального состава сырьевой смеси в условиях конкретного производства изложены в ряде работ С. С. Сычева и Л. С. Когана [184]. Как показывает опыт передовых заводов, путем выбора оптимального сочетания сырьевых компонентов и свойств сырьевой смеси и клинкера возможно уменьшить расход топлива на обжиг, целенаправленно управлять качеством получаемого клинкера. Определение оптимального состава сырьевой смеси необходимо и при разработке энергосберегающих технологий, заключающихся в поиске и использовании при обжиге клинкера техногенных материалов, таких, как золы электростанций и шлаки металлургических производств.

Поэтому важной задачей является создание инструмента для оптимального подбора и расчета сырьевых смесей, который позволит работнику цементного завода, не вдаваясь в особенности методов расчета, оптимизации и способов пересчета заданных расходов добавок, производить оптимальный выбор состава сырьевых смесей, основываясь на сырьевой базе завода, сравнивать возможные составы сырьевых смесей, исследовать изменение характеристик и свойств рассчитываемых смесей и клинкера.

Перечислим основные требования, которым должны отвечать информационные средства расчета и оптимизации сырьевых смесей:

1. Универсальность – отсутствие ограничений на способы расчета и оптимизации, возможность настройки программы на состав применяемого сырья и выпускаемого клинкера, использование при расчете и оптимизации широкого круга характеристик с возможностью добавления новых.

2. Наличие инструментов для оптимизации сырьевых смесей по произвольно задаваемым требованиям, возможность исследо-

вания характеристик и свойств сырьевых смесей и клинкера при изменении требований к ним.

3. Реализация всех расчетов внутри программы с предоставлением пользователю удобной интерфейсной оболочки, ориентированной на специалиста-цементника.

Известные автору программные продукты перечисленным требованиям не удовлетворяют. Их главный недостаток – в отсутствии универсальности. Большинство программ, в том числе и описанные ранее, позволяют осуществлять только расчет двух-, трех- и четырехкомпонентных сырьевых смесей по фиксированным наборам характеристик – KH , n и p или выполнять оптимизацию по одному–двум критериям. При наличии в программах режима оптимизации она производится стандартными методами минимизации функции нескольких переменных, которые, как показано выше, неэффективны для многокомпонентных систем цементной технологии. Это может привести к неудаче при поиске решения или нахождению не самого оптимального результата.

Сказанное выше явилось предпосылкой для разработки специальной программы расчета и оптимизации многокомпонентных сырьевых смесей цементной технологии Rocs.

16.2. СТРУКТУРА ПРОГРАММЫ

В основе программы лежат разработанные математические методы формализации расчета многокомпонентных сырьевых смесей, методы исследования и планирования эксперимента на факторном пространстве многокомпонентных систем, численные методы оптимизации в симплексных системах координат при наличии ограничений на свойства системы.

Использование при разработке программы методов объектно-ориентированного программирования обеспечило универсальность расчета (рис. 16.1). Все объекты и классы программы основаны на трех базовых классах, описывающих сырьевой материал, характеристику и формализованный метод расчета.

Методы расчета в качестве данных используют классы, а не конкретные объекты. Поэтому в программе практически нет ограничений на сочетание и количество сырьевых материалов и ха-

рактических характеристик для расчета, что позволяет использовать в расчетах описанные стандартным способом любые виды материалов, разнообразные характеристики, производить расчет цемента любых фазовых составов, активно использовать методы исследования и анализа сырьевых смесей.

Алгоритм проведения расчета в программе представлен на рис. 16.2.

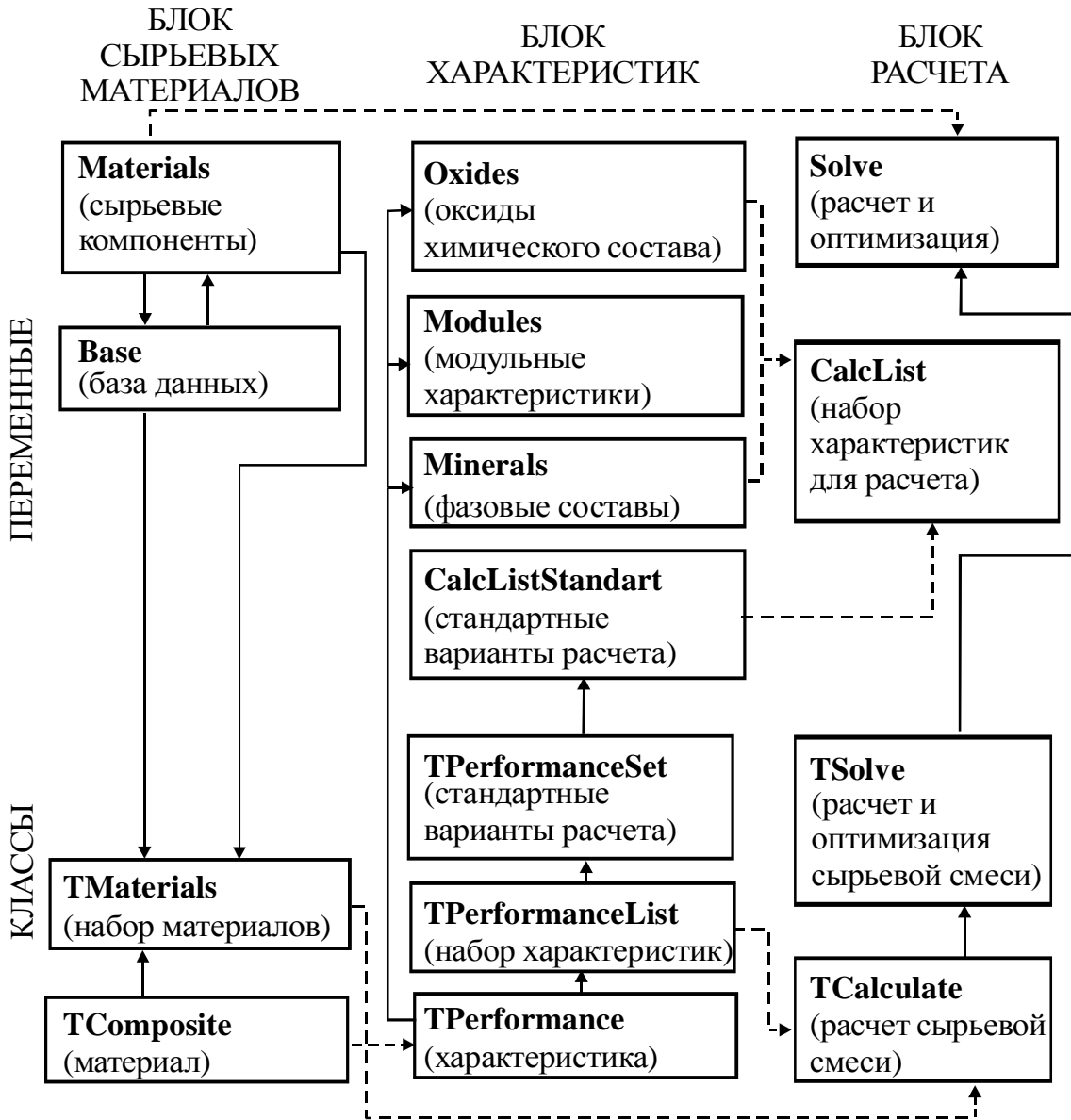


Рис. 16.1. Объектная модель программы:
 —> — наследование и описание переменных;
 - - -> — использование в качестве полей и параметров

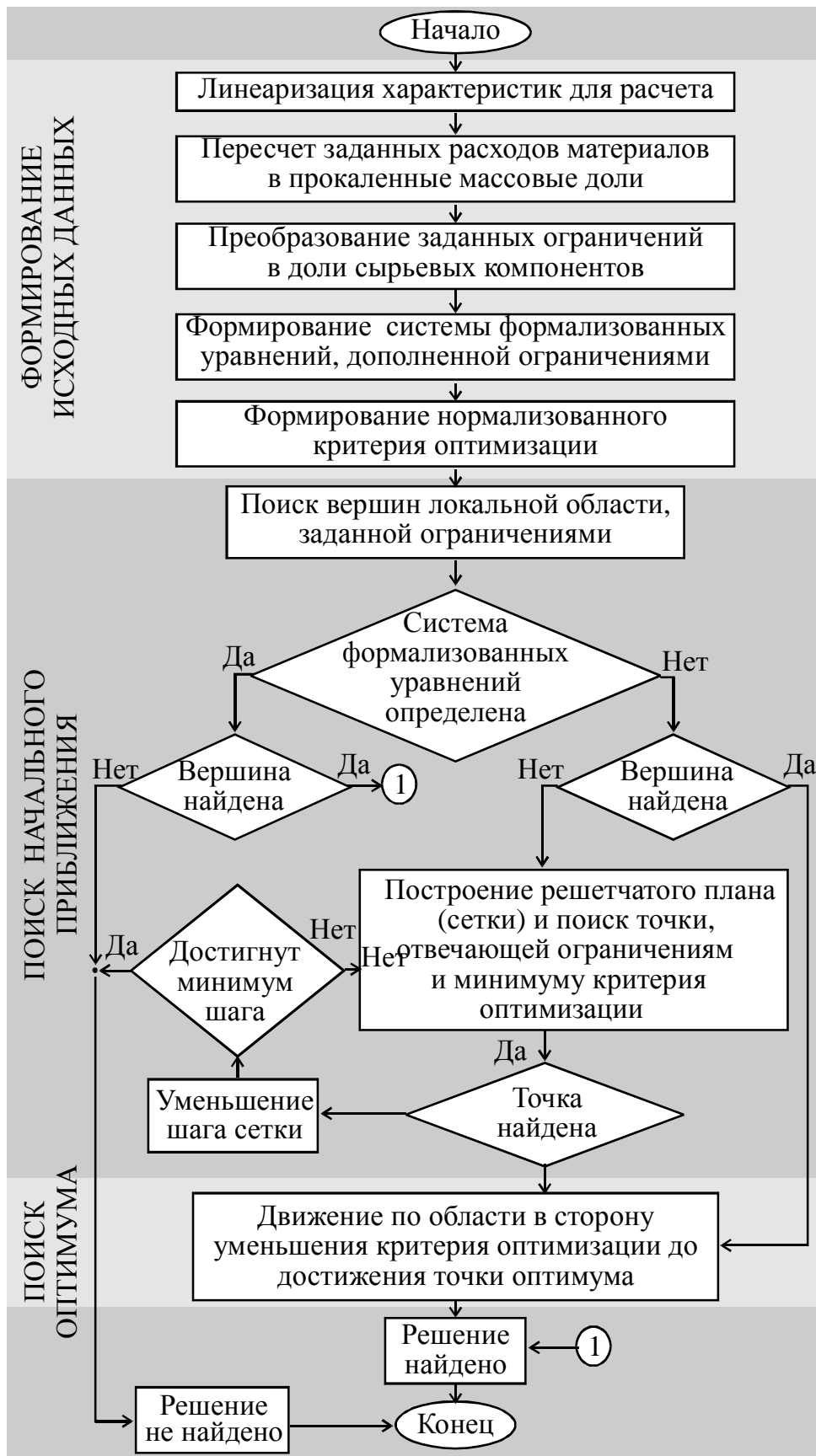


Рис. 16.2. Алгоритм расчета и оптимизации сырьевой смеси

Поиск оптимума согласно заданным критериям и ограничениям состоит из двух этапов (рис. 16.3).

1. Поиск начального приближения – смеси, которую можно составить из имеющихся сырьевых компонентов, и характеристики которой близки к заданным. Вначале для этого ищутся вершины области существования сырьевой смеси.

Особенность алгоритма состоит в том, что в обусловленных задачах, имеющих единственное решение, оно находится на первом этапе, это позволяет не разделять задачи расчета и оптимизации сырьевых смесей, а решать их на основе одного класса.

Если ни одна точка не найдена, для необусловленных задач область разбивается сеткой на отдельные точки и происходит поиск по этим точкам. Вначале накладывается грубая сетка (с большим шагом), если начальное приближение не найдено, шаг уменьшается.

2. Движение от найденного начального приближения к точке, наилучшим образом удовлетворяющей поставленным условиям (методом пофакторного спуска на симплексе). При этом выбирается направление и производится пошаговое движение. Через определенное число шагов направление уточняется. Когда процесс достигает окрестностей искомой точки и шаг в любом направлении приводит к удалению от нее, величина шага уменьшается. Движение продолжается до тех пор, пока шаг не станет очень малым.

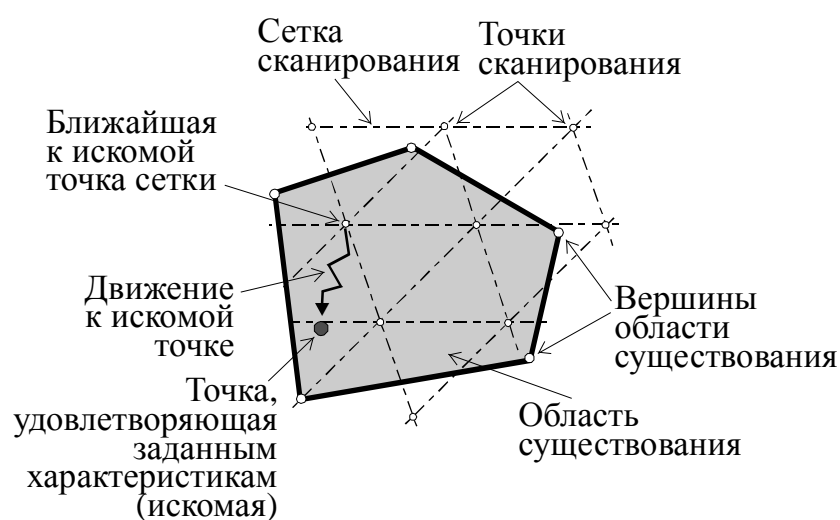


Рис. 16.3. Поиск оптимума на локальной области

Программа позволяет задавать ряд параметров, определяющих баланс между скоростью расчета и его точностью – начальный и конечный шаги сетки и движения в выбранном направлении, коэффициенты уменьшения этих шагов, время движения в выбранном направлении без его изменения.

16.3. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММЫ

Программа Rocs (рис. 16.4, 16.5) предназначена для расчета и оптимизации многокомпонентных сырьевых смесей цементного производства. Она позволяет производить расчет сырьевых смесей при получении обычных и специальных цементов, учитывать ввод в сырьевую смесь или в печь техногенных и нетрадиционных материалов.

Программа Rocs по сравнению со всеми существующими у нас в стране и за рубежом программами и методами обладает рядом новых возможностей и позволяет:

- рассчитывать смеси с любым числом компонентов;
- учитывать ввод в сырьевую смесь или непосредственно в печь неограниченного числа добавок (компонентов с заданным расходом);
- производить расчет специальных цементов и проводить расчет по различным методикам (например, применяемым в Великобритании или США);
- оптимизировать состав сырьевой смеси и клинкера по различным характеристикам, в том числе по энергоемкости получаемых смесей;
- выдавать рекомендации по составлению смесей на основе сырьевой базы конкретного завода;
- производить графический анализ характеристик смесей и клинкера, в том числе и в зависимости от расхода добавок;
- расширять и настраивать программу для учета сырьевой базы завода, выпускаемой продукции, расчета новых видов клинкеров и применения новых методик расчета.

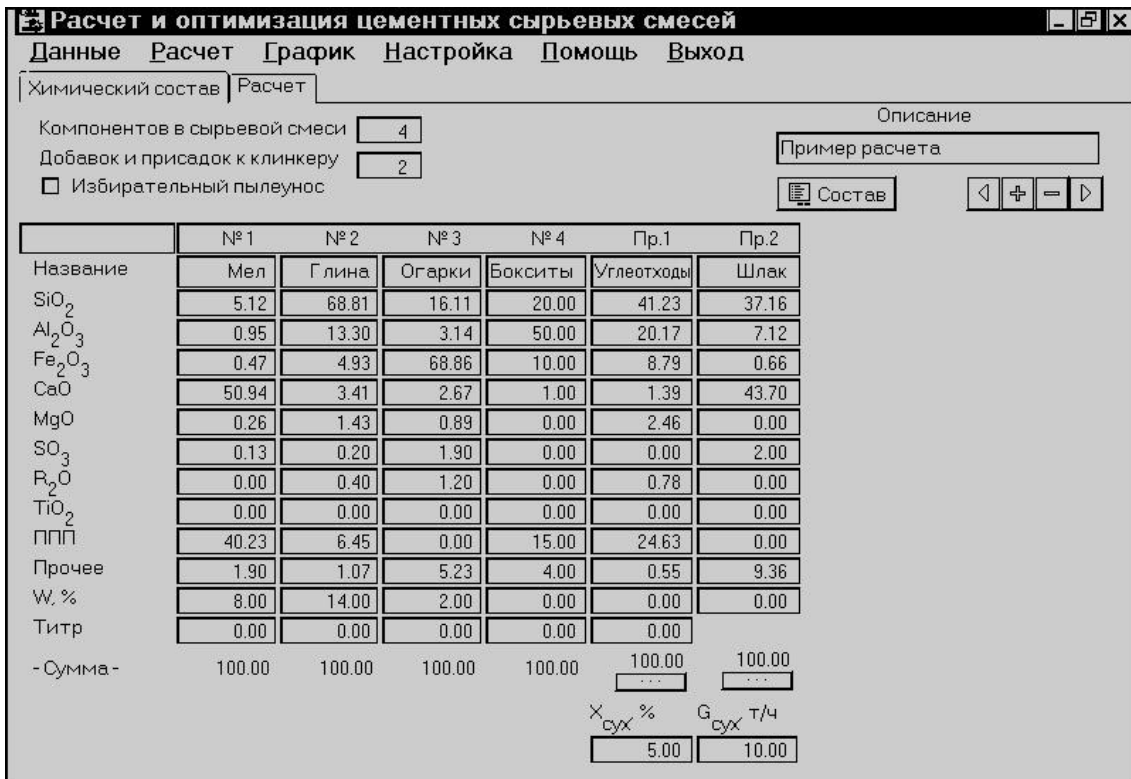


Рис. 16.4. Экран ввода химического состава

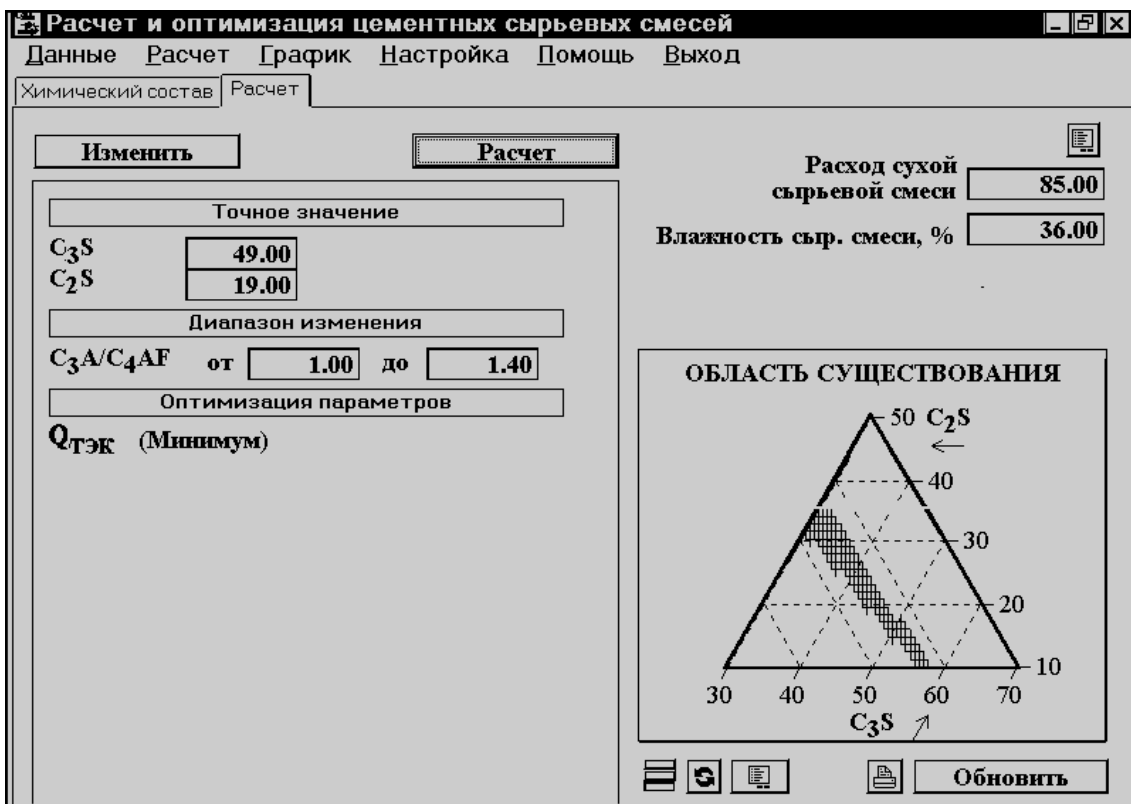


Рис. 16.5. Экран расчета и графического анализа

16.4. СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАСЧЕТАХ

Рассчитываемые сырьевые смеси могут состоять из неограниченного количества сырьевых компонентов. В химическом составе материалов дополнительно к основным оксидам и ППП можно задать содержание щелочей, пяти дополнительных оксидов с произвольными названиями, а также влажность, плотность и титр (см. рис. 16.4).

Программа позволяет учитывать добавки (компоненты с заданным расходом), вводимые как в сырьевую смесь на стадии ее приготовления, так и непосредственно в печь. Расход этих материалов задается различными способами (рис. 16.6).

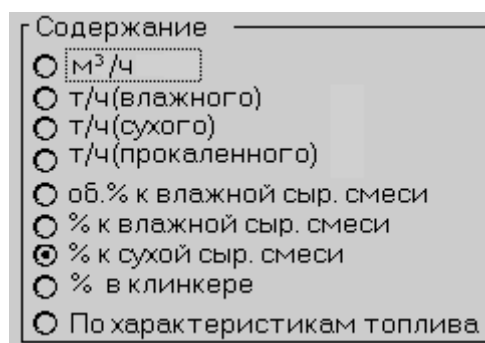


Рис. 16.6. Варианты задания расхода материалов

Например, возможно рассчитать трехкомпонентную сырьевую смесь (мел, глина, огарки), в которую дополнительно вводится гипс (5% от сырьевой смеси) и выгорающая добавка (5 т/ч), а в печь с горячего или холодного конца подается шлак (10 т/ч). При расчете также возможен учет избирательного пылеуноса из печи.

В программе имеется база данных сырья, в которой выделен раздел «Рабочий журнал». В этот раздел заносятся сырьевые материалы, используемые на заводе. Далее они могут быть вставлены в данные для расчета или использованы при подборе вариантов расчета.

16.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ И КЛИНКЕРА

В программе описаны около 20 характеристик клинкера (рис. 16.7) и шесть фазовых составов – обычного, высокожелезистого, высокоосновного и низкоосновного клинкеров (рис. 16.8).

В характеристики сырьевых смесей и клинкера включены:

– показатели основности, модульные характеристики и отношения минералов;

– содержание карбоната кальция CaCO_3 , рассчитываемое по титру с учетом наличия карбоната магния (данная характеристика применяется в США вместо титра);

– содержание щелочей, в зависимости от настройки программы включающее R_2O или K_2O и Na_2O ;

– тепловой эффект клинкерообразования, рассчитываемый по термодинамической методике с учетом вида сырьевых материалов и фазового состава получаемого клинкера;

– показатель эксергетической эффективности процесса преобразования сырьевой смеси в клинкер, характеризующий качество цемента;

– расход топлива на обжиг, рассчитываемый по упрощенному тепловому балансу с использованием дополнительных данных (рис. 16.9).

Модульные характеристики
КН - Коэффициент насыщения известью
n - Кремнеземный модуль
p - Глиноземный модуль
A+F - Сумма оксида алюминия и железа
КН при $p < 0.638$ - Коэффициент насыщения
HR - Гидравлический модуль
LSF - Коэффициент связывания известью
$(C3S+C2S)/(C3A+C4AF)$ - Соотношение минералов
$C3S/C2S$ - Соотношение силикатов
$C3S+C2S$ - Сумма силикатов
$C3A/C4AF$ - Соотношение плавней
$C3A+C4AF$ - Сумма плавней
Щелочи - Содержание щелочей
ЖФ при 1338°C , $p > 1.31$ - Количество жидкой фазы
ЖФ при 1338°C , $p < 1.34$ - Количество жидкой фазы
ЖФ при 1400°C - Количество жидкой фазы
ЖФ при 1450°C - Количество жидкой фазы
CaCO_3 - Содержание карбоната кальция в с/см
ТЭК - Тепловой эффект клинкерообразования
Gтопл - Расход топлива на обжиг
dEx - Эксергетический критерий
Всего: 20

Рис. 16.7. Характеристики, описанные в программе

Возможные фазовые составы
$C3S - C2S - C3A - C4AF - \text{CaSO}_4 - \text{MgO}$ кл
$C3S - C2S - C2F - \text{CaSO}_4 - \text{MgO}$ кл ($p < 0.638$)
$\text{CaO} - C3S - C3A - \text{CaSO}_4 - \text{MgO}$ кл ($\text{КН} > 1$)
$\text{CaO} - C3S - C2F - \text{CaSO}_4 - \text{MgO}$ кл ($\text{КН} > 1$, $p < 0.638$)
$\text{CS} - C2S - C3A - C4AF - \text{CaSO}_4 - \text{MgO}$ кл ($\text{КН} < 0.67$)
$\text{CS} - C2S - C2F - \text{CaSO}_4 - \text{MgO}$ кл ($\text{КН} < 0.67$, $p < 0.638$)
Всего: 6

Рис. 16.8. Фазовые составы, описанные в программе

Тепловой расчет

Топливо

Природный газ

Мазут

Уголь

Теплота сгорания 1 м³

Тепловые единицы

Холодильник

Колосниковый

Рекуператорный

КПД холодильника, %

Влажность шлама, %

Коэффициент избытка воздуха

Температура отходящих газов, °C

Средние потери в окружающую среду на 1 кг кл

Готово

Рис. 16.9. Данные для теплового расчета сырьевой смеси

По всем минералам, входящим в фазовые составы, и характеристикам можно проводить расчет, и их значения можно вывести в результатах расчета. Имеется возможность добавления новых характеристик и фазовых составов.

16.6. РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Расчет производится по любому произвольному сочетанию характеристик, содержанию оксидов и минералов. Программа предусматривает возможность выбора из более чем двадцати способов расчета.

Например, для трехкомпонентной смеси определены восемь способов (рис. 16.10).

Кроме уже имеющихся способов, могут быть составлены любые произвольные сочетания требований, задаваемых как для клинкера, так и для сырьевой смеси. Например, четырехкомпонентную сырьевую смесь можно

рассчитать по заданным значениям коэффициента насыщения КН и соотношению силикатов и алюминатов $(C_3S+C_2S)/(C_3A+C_4AF)$ в клинкере и сумме оксидов алюминия и железа $Al_2O_3+Fe_2O_3$ в сырьевой смеси.

Кроме расчета, когда задаются характеристики с числом, на единицу меньше числа сырьевых компонентов, а рассчитанные сырьевая смесь и клинкер в точности соответствуют заданным требованиям, в программе имеется возможность оптимизации сырьевой смеси. При оптимизации требования к клинкеру или сырьевой смеси задаются следующими способами:

- точное значение;
- приблизительное значение (программа подбирает состав смеси так, чтобы значение характеристики было как можно ближе к заданной);
- ограничение (диапазон изменения, за пределы которого значение выйти не может);
- минимальное или максимальное значение.

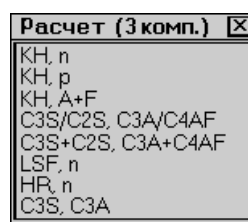


Рис. 16.10. Способы расчета трехкомпонентной смеси

Эти способы могут быть заданы в любой комбинации. Примеры требований при оптимизации трехкомпонентной смеси приведены на рис. 16.11.

Если расчет не удастся или необходимо узнать, в каких пределах можно изменять требования к сырьевой смеси, следует использовать подбор вариантов расчета (рис. 16.12).

The figure shows four separate windows for setting optimization parameters:

- Top Left:** 'Характеристики для оптимизации'. Section 'Точное значение' has KN=0,88 and p=1,20. Section 'Диапазон изменения' has n from 2,20 to 2,50 and Щелочи from 0,00 to 1,00. Section 'Оптимизация параметров' has ТЭК (Минимум).
- Top Right:** 'Характеристики для оптимизации'. Section 'Оптимизация параметров' has C3S=55,00 (Вес=10), C2S=23,00 (Вес=5), C3A=8,00 (Вес=1,00), and C4AF=11,00 (Вес=1,00).
- Bottom Left:** 'Характеристики для оптимизации'. Section 'Точное значение' has C3S/C2S=1,70. Section 'Диапазон изменения' has C3A/C4AF from 0,20 to 0,50 and Щелочи from 0,00 to 1,50. Section 'Оптимизация параметров' has ЖФ при 1450°C=30,00 (приблизительно).
- Bottom Right:** 'Характеристики для расчета'. Section 'Точное значение' has KN=0,88 and A+F=10,00. Section 'Диапазон изменения' has n from 2,30 to 2,60 and p from 1,20 to 2,00. Section 'Оптимизация параметров' has Химическая эксергия (минимум).

Рис. 16.11. Примеры оптимизации трехкомпонентной смеси

The screenshot shows a dialog box titled 'Подбор вариантов расчета (найдено 17)'. It contains a list of selection options: 'Подбор характеристики (2)', 'Подбор двух характеристик (2)', 'Замена компонента (4)', 'Замена двух компонентов (8)', and 'Изменение расхода присадок (1)'. There are 'Расчет' and 'В данные' buttons. Below the list, it shows '1) KN=0,88 ... 0,90!' and '2) n=2,26 ... 2,60'. At the bottom, there is a text box: 'Установить значение характеристики KN равное 0,88 ... 0,90'.

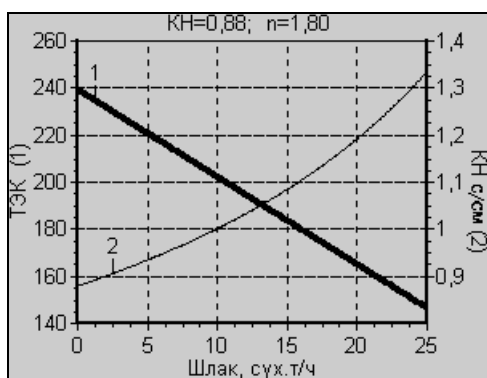
Рис. 16.12. Результаты анализа возможных вариантов расчета

Программа производит подбор следующим образом:

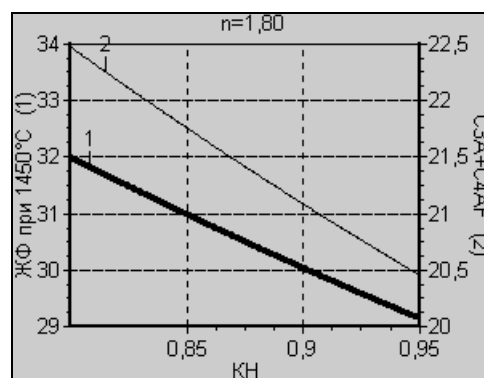
- 1) поочередно изменяет значения характеристик;
- 2) одновременно изменяет значения двух характеристик для всех их возможных комбинаций;
- 3) заменяет один или два материала на другие из базы данных;
- 4) изменяет расход добавок.

Для анализа состава сырьевых смесей выводятся графические зависимости (рис. 16.13):

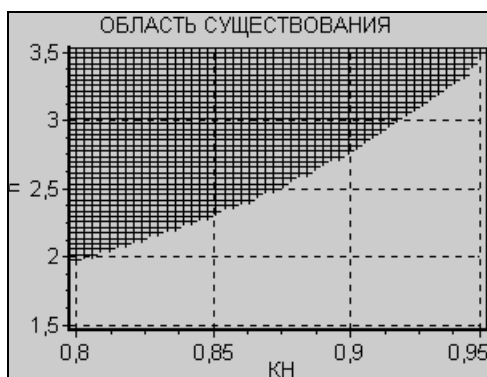
- двух характеристик от заданной характеристики или от расхода добавки;
- область существования (область возможности расчета) клинкера на факторном пространстве двух характеристик.



ТЭК и КН сырьевой смеси при изменении расхода добавки (шлака)



Количество жидкой фазы и сумма минералов-плавней при изменении КН



Область возможности расчета в декартовых координатах



Область возможности расчета на диаграмме

Рис. 16.13. Графический анализ при расчете сырьевых смесей

Таким образом, в программе Rocs имеются средства анализа вариантов расчета сырьевых смесей и свойств получаемого клинкера. Это позволяет производить сравнение различных вариантов, разностороннюю оптимизацию состава сырьевых смесей и предоставляет технологу цементного завода возможности, намного превышающие современный производственный и научный уровень.

16.7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Результатами расчета являются: объемные и массовые расходы сырьевых компонентов; их процентное содержание в сырьевой смеси и клинкере; расход воды, добавляемой в сырьевую смесь.

В программе можно задать необходимую производительность по клинкеру или необходимый расход сырьевой смеси, а также дозировку материалов на различных промежуточных стадиях смешения (например карьер – сырьевой цех). Если производительность по клинкеру не задана, выводится расход компонентов в процентах и на килограмм клинкера. Также в результатах выводятся химические составы сырьевой смеси и клинкера, фазовый состав клинкера и его характеристики, выбранные для вывода.

При просмотре результатов расчета возможен выбор выводимых таблиц, быстрый переход между ними, изменение размера и типа шрифта. Для использования программы в составе автоматизированных систем контроля и управления производством можно применять пакетный режим работы, когда все исходные данные берутся из файла данных текстового формата, созданного в формате ini-файлов Windows, в этот же файл записываются результаты расчета. Формат файла описан в документации к программе.

Далее приводятся примеры расчета сырьевых смесей в виде таблиц, выводимых программой.

Пример 1. Расчет четырехкомпонентной сырьевой смеси (мел, глина, огарки, бокситы). В сырьевую смесь также добавляется 5 % углеотходов, а в печь вводится 10 т/ч шлака.

Для расчета задано: $KH = 0,88$; $n = 1,80$; $p = 1,30$. Заданы производительность по клинкеру 56 т/ч и влажность шихты 38%.

РАСЧЕТ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ (Пример 1)

Задано: $KH=0,88$; $n=1,80$; $p=1,30$; расход 56 т/ч клинкера; $W = 38\%$

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Материалы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ППП	Прочее
Мел	5,12	0,95	0,47	50,49	0,26	–	40,23	2,03
Глина	68,81	13,30	4,93	3,41	1,43	0,40	6,45	1,27
Огарки	16,11	3,14	68,86	2,67	0,89	1,20	–	7,13
Бокситы	20,00	50,00	10,00	1,00	–	–	15,00	4,00
Углеотход	41,23	20,17	8,79	1,39	2,46	0,78	24,63	0,55
Шлак	37,16	7,12	0,66	43,70	–	–	–	11,36

ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРЬЯ, РАСХОД ДОБАВОК И ПРИСАДОК

Материалы	W, %	Заданный расход
Мел	8,00	–
Глина	14,00	–
Огарки	2,00	–
Бокситы	–	–
Углеотход	–	5,00 % к сухой сырьевой смеси
Шлак	–	10,00 т/ч сухого компонента (присадка к клинкеру)

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И КЛИНКЕРА

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ППП	Прочее
Сырьевая смесь	10,82	4,03	3,78	43,01	0,44	0,10	35,67	2,16
	Естественная влажность 7,44%							
Клинкер	20,45	6,42	4,94	62,72	0,56	0,13	–	4,78

МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Модули	Сырьевая смесь	Клинкер
КН (коэффициент насыщения известью)	1,16	0,88
n (кремнеземный модуль)	1,39	1,80
p (глиноземный модуль)	1,07	1,30
ТЭК (тепловой эффект клинкерообраз., ккал/кг)	–	338,7

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Минералы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	MgO кл.
мас. %	49,68	21,15	8,66	15,03	0,00	0,56

СОДЕРЖАНИЕ КОМПОНЕНТОВ

Материалы	Сырьевая смесь				Клинкер	
	Влажная		Сухая		т/ч	%
	т/ч	%	т/ч	%		
Рассчитано:						
мел	65,07	84,16	59,87	83,72	35,78	63,90
глина	4,01	5,18	3,45	4,82	3,22	5,76
огарки	2,55	3,30	2,50	3,50	2,50	4,47
бокситы	2,11	2,74	2,11	2,96	1,80	3,21
вода (W=38,00%)	38,01	–	–	–	–	–
Задано:						
углеотход	3,58	4,62	3,58	5,00	2,69	4,81
шлак	(10,00)	–	(10,00)	–	10,00	17,86
Сумма	115,33	100,00	71,50	100,00	56,00	100,00
	Величины в скобках в сумму не включены					

Пример 2. Расчет четырехкомпонентной сырьевой смеси (мел, глина, огарки, бокситы). Дополнительно в сырьевую смесь до-

бавляется 5 % углеотходов, а в печь вводится шлак из расчета 10 % по отношению к сухой сырьевой смеси.

- Для расчета задано: 1) точные значения $KH = 0,88$; $p = 1,30$;
 2) приблизительное содержание жидкой фазы (ж. ф.) – 30%;
 3) минимальное содержание щелочей.

РАСЧЕТ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ (Пример 2)

Задано: $KH=0,88$; $p =1,30$; ж. ф. при $1450^{\circ}C @ 30$; щелочи $@ \min$

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Материалы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ППП	Прочее
Мел	5,12	0,95	0,47	50,94	0,26	–	40,23	2,03
Глина	68,81	13,30	4,93	3,41	1,43	0,40	6,45	1,27
Огарки	16,11	3,14	68,86	2,67	0,89	1,20	–	7,13
Бокситы	20,00	50,00	10,00	1,00	–	–	15,00	4,00
Углеотход	41,23	20,17	8,79	1,39	2,46	0,78	24,63	0,55
Шлак	37,16	7,12	0,66	43,70	–	–	–	11,36

ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРЬЯ, РАСХОД ДОБАВОК И ПРИСАДОК

Материалы	W, %	Заданный расход
Мел	8,00	–
Глина	14,00	–
Огарки	2,00	–
Бокситы	–	–
Углеотход	–	5,00 % к сухой сырьевой смеси
Шлак	–	10,00% к сухой сырьевой смеси

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И КЛИНКЕРА

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ППП	Прочее
Сырьевая смесь	11,81	3,89	3,47	42,73	0,46	0,10	35,42	2,10
	Естественная влажность 7,64%							
Клинкер	20,83	6,17	4,75	63,16	0,62	0,14	–	4,35

МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Модули	Сырьевая смесь	Клинкер
KH (коэффициент насыщения известью)	1,06	0,88
n (кремнеземный модуль)	1,60	1,91
p (глиноземный модуль)	1,12	1,30
ж. ф. при $1450^{\circ}C$ (количество жидкой фазы)	–	29,95
ТЭК (тепловой эффект клинкерообраз., ккал/кг)	–	356,0

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Минералы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	MgO кл.
мас. %	50,60	21,54	8,32	14,44	0,00	0,62

СОДЕРЖАНИЕ КОМПОНЕНТОВ

Материалы	Сырьевая смесь				Клинкер
	Влажная		Сухая		
	кг/кг кл.	%	кг/кг кл.	%	%
Рассчитано:					
мел	1,211	83,35	1,114	83,10	66,60
глина	0,103	7,12	0,089	6,63	8,32
огарки	0,042	2,86	0,041	3,04	4,08
бокситы	0,030	2,06	0,030	2,23	2,54
Задано:					
углеотход	0,67	4,61	0,067	5,00	5,05
шлак	(0,134)	–	(0,134)	(10,00)	13,41
Сумма	1,453	100,00	1,341	100,00	100,00
Величины в скобках в сумму не включены					

Пример 3. Расчет трехкомпонентной сырьевой смеси (мел, глина, огарки). Дополнительно в печь вводится шлак из расчета его содержания в клинкере 10%. Для расчета задано значение КН сырьевой смеси – 1,0 и приблизительный минералогический состав клинкера: $C_3S \approx 55\%$; $C_2S \approx 23\%$; $C_3A \approx 8\%$; $C_4AF \approx 11\%$.

РАСЧЕТ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ (Пример 3)

Задано: КН сыр. см. = 1,0; $C_3S \approx 55$; $C_2S \approx 23$; $C_3A \approx 8$; $C_4AF \approx 11$

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Материалы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ППП	Прочее
Мел	5,12	0,95	0,47	50,94	0,26	–	40,23	2,03
Глина	68,81	13,30	4,93	3,41	1,43	0,40	6,45	1,27
Огарки	16,11	3,14	68,86	2,67	0,89	1,20	–	7,13
Шлак	37,16	7,12	0,66	43,70	–	–	–	11,36

ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРЬЯ, РАСХОД ДОБАВОК И ПРИСАДОК

Материалы	W, %	Заданный расход
Мел	8,00	–
Глина	14,00	–
Огарки	2,00	–
Шлак	–	10,00% (присадка к клинкеру)

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И КЛИНКЕРА

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	ППП	Прочее
Сырьевая смесь	13,73	2,62	2,52	43,66	0,43	0,08	34,93	2,04
	Естественная влажность 5,66%							
Клинкер	22,71	4,34	3,55	64,75	0,59	0,11	–	3,96

МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Модули	Сырьевая смесь	Клинкер
КН (коэффициент насыщения известью)	1,00	0,89
<i>n</i> (кремнеземный модуль)	2,67	2,88
<i>p</i> (глиноземный модуль)	1,04	1,22
ТЭК (тепловой эффект клинкерообраз., ккал/кг)	–	355,6

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Минералы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	MgO кл.
мас. %	56,79	22,26	5,48	10,81	0,00	0,59

СОДЕРЖАНИЕ КОМПОНЕНТОВ

Материалы	Сырьевая смесь				Клинкер
	Влажная		Сухая		
	кг/кг кл.	%	кг/кг кл.	%	%
Рассчитано:					
мел	1,273	84,05	1,172	84,71	70,02
глина	0,211	13,96	0,182	13,15	17,02
огарки	0,030	1,99	0,030	2,14	2,96
Задано:					
шлак	(0,100)	–	(0,100)	–	10,00
Сумма	1,515	100,00	1,383	100,00	100,00
Величины в скобках в сумму не включены					

Пример 4. Расчет четырехкомпонентной сырьевой смеси. Предварительно на двух карьерах происходит смешение известкового и глинистого компонентов, затем полученные смеси объединяются в сырьевом цехе и в них дополнительно вводится шлак. Программа выводит дозировку предварительного смешения на карьерах и дозировку смешения в сырьевом цехе.

РАСЧЕТ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ (Пример 4)

Задано: C₃S=55; C₂S=20; C₃A=10; C₄AF=13; расход 100 т/ч клинкера

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Материалы	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП	Пр.	W, %	R, кг/м ³
Мел карьера «Ближний»	2,00	1,00	0,50	54,00	0,50	42,00	–	4,00	1,80
Глина красно-бурая	64,74	12,37	6,58	3,38	1,55	11,26	0,12	12,00	2,30
Мел карьера «Дальний»	3,70	1,70	0,50	53,00	0,50	40,00	0,60	6,00	1,85
Глина каолиновая	48,77	30,94	3,74	2,62	0,62	13,06	0,25	17,00	2,10
Шлак	29,24	2,82	42,74	7,89	0,59	–	16,72	–	3,30

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И КЛИНКЕРА

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП	Прочее
Сырьевая смесь	14,00	4,24	2,79	42,94	0,65	34,71	0,66
	Естественная влажность 5,99%, плотность 1,94 кг/м ³						
Клинкер	21,45	6,50	4,27	65,78	1,00	–	1,00

МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Модули	Сырьевая смесь	Клинкер
КН (коэффициент насыщения известью)	0,89	0,89
n (кремнеземный модуль)	1,99	1,99
p (глиноземный модуль)	1,52	1,52
ТЭК (тепловой эффект клинкерообраз., ккал/кг)	–	408,16

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Минералы	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	MgO кл.
мас. %	55,00	20,00	10,00	13,00	0,00	1,00

СТАДИЯ СМЕШЕНИЯ 1 (карьер «Ближний»)

Материалы	Соотношения материалов							
	объемное		влажных		сухих		прокаленных	
	м ³ /ч	%	т/ч	%	т/ч	%	т/ч	%
Мел карьера «Ближний»	53,14	83,88	95,66	80,29	91,83	81,63	53,26	74,38
Глина красно-бурая	10,21	16,12	23,49	19,71	20,67	18,37	18,34	25,62
Сумма	63,36	100,00	119,15	100,00	112,50	100,00	71,61	100,00

СТАДИЯ СМЕШЕНИЯ 2 (карьер «Дальний»)

Материалы	Соотношения материалов							
	объемное		влажных		сухих		прокаленных	
	м ³ /ч	%	т/ч	%	т/ч	%	т/ч	%
Мел карьера «Дальний»	16,18	78,33	29,93	76,10	28,14	78,29	16,88	71,32
Глина красно-бурая	4,48	21,67	9,40	23,90	7,80	21,71	6,78	28,67
Сумма	20,66	100,00	39,34	100,00	35,94	100,00	23,67	100,00

СТАДИЯ СМЕШЕНИЯ 3 (сырьевой цех)

Материалы	Соотношения материалов							
	объемное		влажных		сухих		прокаленных	
	м ³ /ч	%	т/ч	%	т/ч	%	т/ч	%
Шлак	1,43	1,68	4,73	2,90	4,73	3,09	4,73	4,73
Мел карьера «Ближний»	63,36	74,15	119,15	73,00	112,50	73,45	71,61	71,61
Мел карьера «Дальний»	20,66	24,18	39,34	24,10	35,94	53,46	23,67	23,67
Сумма	85,45	100,00	163,21	100,00	153,17	100,00	100,00	100,00

СОДЕРЖАНИЕ КОМПОНЕНТОВ

Материалы	Сырьевая смесь						Клинкер	
	Объем		Влажная		Сухая		т/ч	%
	т/ч	%	т/ч	%	т/ч	%		
Мел карьера «Ближний»	53,14	62,20	95,66	58,61	91,83	59,95	53,26	53,26
Глина красно-бурая	10,21	11,95	23,49	14,39	20,67	13,49	18,34	18,34
Мел карьера «Дальний»	16,18	18,94	29,93	18,34	28,14	18,37	16,88	16,88
Глина каолининовая	4,48	5,24	9,40	5,76	7,80	5,09	6,78	6,78
Шлак	1,43	1,68	4,73	2,90	4,73	3,09	4,73	4,73
Сумма	85,45	100,00	163,21	100,00	153,17	100,00	100,00	100,00

Таким образом, разработана программа расчета и оптимизации цементных сырьевых смесей, позволяющая рассчитывать сырьевые смеси с произвольным числом компонентов и добавок, производить расчет и оптимизацию по произвольному сочетанию требований к клинкеру и сырьевой смеси, производить анализ возможных вариантов расчета и свойств рассчитываемого клинкера.

17. ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ОБЖИГ КЛИНКЕРА

Разработанные методы и программа расчета и оптимизации цементных сырьевых смесей позволяют проводить многосторонние расчеты сырьевых смесей, в том числе и обеспечивающие снижение энергозатрат на обжиг. В разделе показано применение программы на примере ряда расчетов сырьевых смесей.

17.1. ЭНЕРГОЕМКОСТЬ СЫРЬЕВЫХ СМЕСЕЙ

Под энергоемкостью сырьевых смесей в работе подразумеваются затраты тепла на получение цементного клинкера, зависящие от состава сырьевых смесей, а следовательно, и от состава клинкера. Состав сырьевых смесей влияет на следующие статьи теплового баланса:

- тепловой эффект клинкерообразования, на который расходуется 25...40% топлива;
- потери тепла с технологическими газами (1...2% расхода топлива);
- расход тепла на испарение физической влаги (до 50% от расхода топлива), содержание которой зависит от соотношения расходов сырьевой смеси и клинкера;
- удельные теплотери через корпус печи (10...30% от расхода топлива), которые изменяются пропорционально производительности печи.

Для оценки энергоемкости в программе с использованием составов сырья и клинкера и ряда дополнительных данных рассчитывается по упрощенной методике расход топлива на обжиг. На рис. 17.1 представлены результаты теплового расчета сырьевой смеси программы, разработанной на основе программы расчета и оптимизации цементных сырьевых смесей и используемой при обучении студентов.

В основном при изменении состава сырьевых смесей на расход топлива влияет тепловой эффект клинкерообразования. Так как эти затраты происходят главным образом в горячей части печи, характеризующейся наивысшей интенсивностью теплообме-

на, реальное снижение расхода топлива будет в несколько раз выше, чем оцененное в программе.

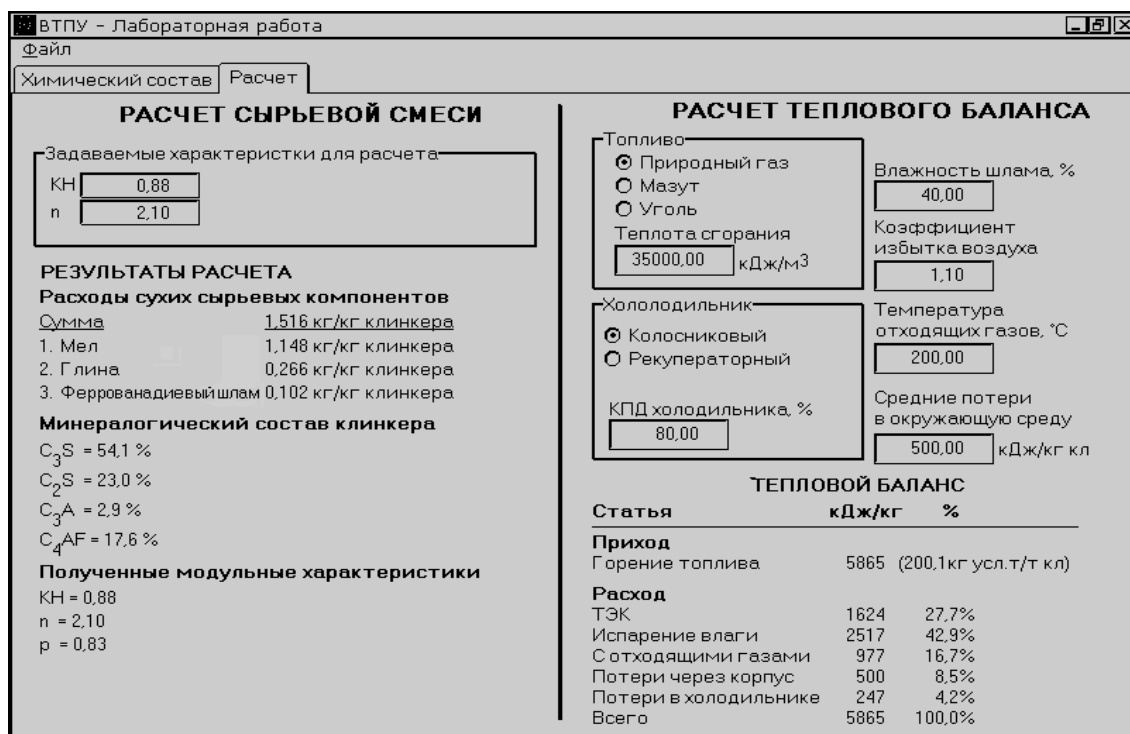


Рис. 17.1. Результаты расчета расхода топлива на обжиг клинкера

Энергоемкость сырьевых смесей можно рассматривать и с точки зрения эффективного использования подводимой в печь энергии, то есть оценивать методами эксергетического анализа. Согласно работе [335], эксергия является частью энергии, которую возможно использовать в технологическом процессе. Поэтому эксергия позволяет судить о качественной стороне преобразования энергии и степени термодинамического совершенства процессов, в том числе и химических [336]. В предлагаемой работе далее рассмотрено влияние эксергетических показателей, определяемых составом сырьевой смеси, на процесс обжига, и предложен критерий эксергетической оценки состава сырьевых смесей.

В разработанной программе возможно проведение оптимизации по тепловому эффекту клинкерообразования, расходу топлива на обжиг и критерию эксергетической оптимальности процесса преобразования сырьевой смеси в клинкер, а также вывод графических зависимостей этих показателей от состава и других характеристик сырьевой смеси и клинкера.

17.2. МЕТОДИКА ВЫБОРА СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Большинство заводов имеет возможность при приготовлении сырьевой смеси выбирать из восьми-десяти и более сырьевых компонентов [311, 337]. Для выбора оптимального сочетания компонентов, обеспечивающего минимальные затраты на обжиг, предлагается следующая методика. В качестве сырьевых компонентов задаются все возможные виды сырья. Затем производится расчет, при котором задаются требуемые модульные характеристики и ограничения и обязательно указывается необходимость минимизации критерия энергоемкости. При проведении оптимизации из состава сырьевой смеси будут исключены компоненты, увеличивающие энергопотребление, и таким образом определится необходимо количество и вид сырьевых компонентов.

Например, в работе [311] приводятся составы различных сырьевых материалов, десять из которых могут быть использованы на заводе. Для выбора была задана десятикомпонентная сырьевая смесь, а в качестве требований для расчета – $KH = 0,91$, $n = 2,30$, $p = 1,30$ и необходимость минимизации одного из критериев энергоемкости. При оптимизации по ТЭК, расходу топлива и эксергетическому критерию получены одинаковые результаты: минимальную энергоемкость обеспечивают сочетания из четырех компонентов – мела и глины СГОК, бокситов и ферросплава, содержание всех остальных шести компонентов в сырьевой смеси равнялось нулю (рис. 17.2).

Так как бокситы обычно являются дефицитным сырьем, они были исключены из расчета и оптимизация была повторена для девяти компонентов. В этом случае наилучшим сочетанием являлись мел и глина СГОК, сланец ЛГОК и ферросплав. Но в отличие от варианта с бокситами эта сырьевая смесь имеет более высокие тепловой эффект клинкерообразования (на 7 ккал/кг кл.) и расход топлива (на 1,7 кг/т кл.). Наихудшие показатели имеет сочетание мела и глины СГОК, глины семилукской и новолипецкого шлама. В этом случае тепловой эффект клинкерообразования на 38 ккал/кг кл. выше, чем в варианте с бокситами, а расход топлива выше на 9,5 кг/т кл.

РАСЧЕТ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ									
Задано: КН=0,91, n=2,30, p=1,30, G _{топл} →Min							1.01.2001 г.		
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СЫРЬЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	ППП	Прочее
Мел СГОК, уступ №1	3,73	0,60	0,27	52,31	0,30	0,16	0,01	41,11	1,51
Глина СГОК	68,15	13,05	4,53	1,63	1,20	0,10	1,60	6,84	2,90
Глина семилукская	35,55	22,62	1,45	2,82	0,36	0,04	0,15	37,01	-
Сланец ЛГОК	53,40	20,04	11,53	0,88	0,69	0,10	3,20	8,11	2,05
Бокситы архангельские	24,40	45,46	7,33	4,42	0,21	1,65	0,12	14,79	1,62
Огарки уваровские	11,17	2,79	68,93	3,40	0,81	3,43	0,40	-	9,07
Пыль колошниковая	14,40	4,78	40,57	11,07	2,20	11,90	1,77	13,01	0,30
Пыль ОЭМК	7,56	2,53	56,89	10,30	5,57	0,87	1,70	3,93	10,65
Ферросплав "Тулачермет"	15,00	1,84	41,17	10,20	2,46	9,32	0,17	-	19,84
Шлам новолыпецкий	3,71	0,67	79,54	12,53	1,15	0,84	0,24	-	1,32
СОДЕРЖАНИЕ КОМПОНЕНТОВ									
Материалы	Сырьевая смесь		Клинкер						
	кг/кг кл	%	%						
Мел СГОК, уступ №1	1,205	79,54	70,98						
Глина СГОК	0,218	14,40	20,33						
Глина семилукская	-	-	-						
Сланец ЛГОК	-	-	-						
Бокситы архангельские	0,033	2,17	2,80						
Огарки уваровские	-	-	-						
Пыль колошниковая	-	-	-						
Пыль ОЭМК	-	-	-						
Ферросплав "Тулачермет"	0,059	3,89	5,89						
Шлам новолыпецкий	-	-	-						
Сумма	1,515	100,00	100,00						

Рис. 17.2. Выбор оптимального сочетания сырьевых компонентов (результаты расчета, выводимые программой)

Подбор наиболее эффективного сочетания сырьевых компонентов возможен даже в условиях стабильной сырьевой базы предприятия. В табл. 17.1 представлен состав сырьевых компонентов, добываемых на карьере Белгородского цементного завода за шесть месяцев 1995 г. Среднее отклонение состава сырья составило менее 1 %.

Для исследования влияния различного сочетания компонентов на энергопотребление при обжиге была рассчитана 14-компонентная сырьевая смесь, включающая шесть составов мела, шесть составов глин и две корректирующие добавки – огарки и глиноземную добавку. При расчете задавались значения $KH = 0,92$, $n = 2,1$, диапазон изменения $p = 1,0 \dots 1,1$ и требования по минимуму или максимуму расхода топлива.

Таблица 17.1

Состав сырьевых компонентов

Сырьевой компонент	Химический состав, мас. %					ППП, мас. %	Средне-квадратичное отклонение
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
Мел № 1	1,20	0,63	0,12	55,04	0,28	42,68	0,08
Мел № 2	0,90	0,51	0,17	55,16	0,25	42,95	0,45
Мел № 3	1,11	0,48	0,12	55,03	0,32	42,55	0,06
Мел № 4	1,24	0,65	0,13	54,96	0,27	42,12	0,07
Мел № 5	1,64	0,74	0,13	55,12	0,28	41,99	0,35
Мел № 6	1,36	0,60	0,12	54,98	0,24	42,08	0,12
Среднее значение	1,24	0,60	0,13	55,05	0,27	42,40	–
Среднее отклонение	0,74	0,26	0,05	0,20	0,08	0,96	–
Глина № 1	66,9	14,45	4,77	1,77	1,23	8,88	1,40
Глина № 2	66,2	13,34	5,44	2,23	1,08	9,92	0,77
Глина № 3	65,82	14,47	5,4	1,75	1,23	9,6	0,64
Глина № 4	65,45	14,04	5,78	1,64	1,13	9,91	1,17
Глина № 5	68,12	13,17	5,21	1,23	1,24	9,65	3,90
Глина № 6	65,70	13,89	5,75	1,73	1,47	9,2	0,73
Среднее значение	66,37	13,89	5,39	1,73	1,23	9,53	–
Среднее отклонение	2,67	1,30	1,01	1,00	0,39	1,04	–

В результате расчета у пяти мелов из шести и у пяти глин из шести получены нулевые или очень малые расходы. Эти материалы были из смеси исключены, в результате чего осталась четырехкомпонентная смесь из одного мела, одной глины и двух корректирующих добавок. Результаты расчета этих смесей при $KH = 0,92$, $n = 2,1$, $p = 1,1$ приведены в табл. 17.2; разница в величине ТЭК для двух представленных вариантов составила 10,9 ккал/кг кл., а в расходе условного топлива – 3,6 кг/т кл.

Таблица 17.2

Состав сырьевых смесей

Карбонатный и глинистый компонент	Химический состав, мас. %					ППП, мас. %	Расход условного топлива на обжиг, кг/т кл.
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO		
Мел № 5, глина № 1	14,15	3,53	3,21	43,50	0,50	34,48	204,6
Мел № 3, глина № 4	13,99	3,49	3,17	43,00	0,52	34,93	207,2

Для исследования влияния состава мела и глины на расход топлива на обжиг были рассчитаны сырьевые смеси, где при постоянстве остальных сырьевых компонентов использовались разный мел или разная глина. Разница в расходе условного топлива при этом составила 3 кг для смесей с разным мелом и 1 кг для смесей с разной глиной (рис. 17.3), или 1,5 и 0,5% от расхода топлива. С учетом того, что в сырьевую смесь входит примерно 70% мела и 30% глины, эти отклонения более чем в 2 раза превышают среднее отклонение в составах сырья.

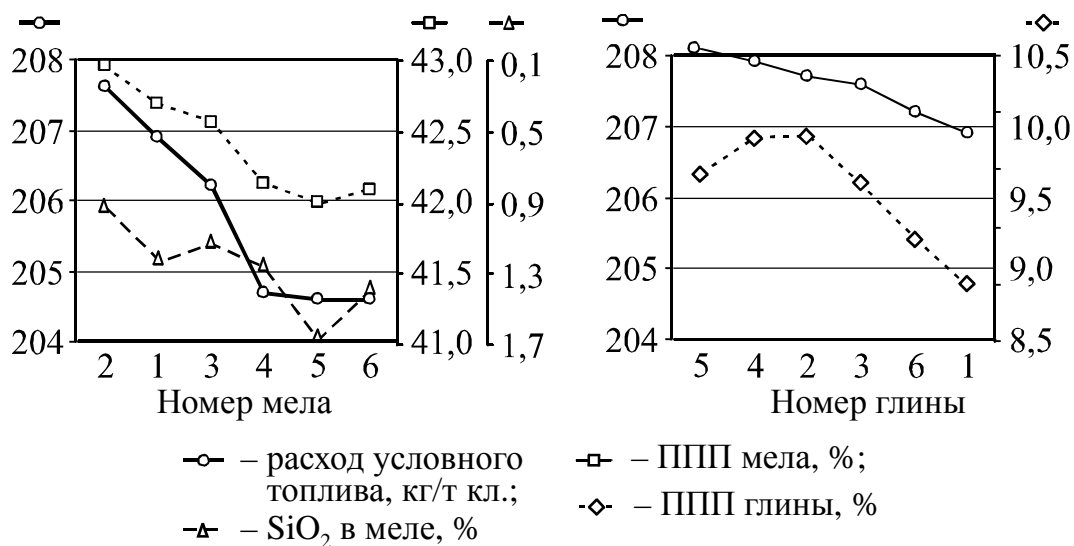


Рис. 17.3. Расход топлива при использовании мела и глины различного состава

Корреляционный анализ (табл. 17.3) показал, что на расход топлива наиболее сильно влияют потери при прокаливании сырьевой смеси, которые определяют затраты тепла на декарбонизацию и дегидратацию сырья. При изменении состава мела на расход топлива оказывает влияние содержание оксида кремния. Это связано с уменьшением содержания в меле карбоната кальция при увеличении содержания песка или кварца.

Таблица 17.3

Зависимость между составом сырьевой смеси и расходом топлива

Изменяемый компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
Мел	-0,81	-0,64	0,54	0,54	0,11	0,99
Глина	0,22	-0,63	0,39	-0,36	-0,45	0,87

Таким образом, для условий Белгородского цементного завода снижение расхода топлива обеспечивает выбор мела и глины с наименьшими потерями при прокаливании. Проведя химический анализ сырья в разных местах карьера и составив карьерную сетку, можно выбирать наиболее подходящие сочетания сырья, например наименее энергоемкого для выпуска высокомарочного клинкера и наиболее энергоемкого при выпуске низкомарочного. Это позволит за счет оптимизации режима с более высоким энергопотреблением (выпуск высокомарочного клинкера) обеспечить большую экономию топлива, чем увеличение его расхода в неоптимальном режиме с низким энергопотреблением.

Проведенные расчеты показывают, что путем оптимального подбора сырьевых компонентов без изменения KH , n и p клинкера возможно обеспечить заметное снижение расхода топлива на обжиг даже в условиях стабильной сырьевой базы предприятия.

17.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТЕХНОГЕННОГО ПРОДУКТА

Одним из способов снижения расхода топлива является использование в качестве сырья металлургических шлаков, содержащих оксид кальция, не связанный в карбонат. В работе [338] предлагается приготовление трехкомпонентной сырьевой смеси и ввод отдельно от нее в печь до 40% шлака (табл. 17.4, вариант I). Как видно из рис. 17.4, увеличение расхода шлака выше 40% ведет к увеличению кремнеземного модуля клинкера. Для фиксации этого модуля возможно приготовление четырехкомпонентной сырьевой смеси. Первоначально к исходным компонентам был добавлен сланец, но графический анализ показал, что при $KH = 0,92$, $n = 2,39$, $p = 1,20$ возможный расход шлака не увеличился и также не мог превышать 40%. С помощью функции программы «Подбор вариантов расчета» было определено, что сланец можно заменить железосодержащей добавкой (смесью одинакового количества отходов производства феррованадия и новолипецкого шлама). При этом расход шлака может достигнуть 43,3% (рис. 17.5; см. табл. 17.4, вариант II).

На рис. 17.6 приведены представленные в программе зависимости, показывающие, в каком соотношении кремнеземный и глиноземный модули обеспечивают увеличение расхода шлака

до 45 и 50%. Расчет сырьевой смеси при вводе 50% шлака представлен в табл. 17.4, вариант III.

Для определения максимально возможного снижения расхода топлива была задана десятикомпонентная сырьевая смесь, включающая девять возможных сырьевых компонентов и шлак, и проведен расчет при $КН = 0,92$, $n = 2,39$, $p = 1,20$ и минимуме ТЭК. В рассчитанной смеси расход четырех компонентов отличался от нуля (мела, глины, феррованадиевого шлама и шлака, содержание которого равнялось 45,6%). Таким образом, возможно приготовление трехкомпонентной сырьевой смеси указанного состава (см. табл. 17.4, вариант IV).

Таблица 17.4

Расчет ввода шлака в печь

Номер варианта	Сырьевые компоненты и их расход, кг/кг клинкера	Характеристики клинкера	Расход шлака, %	ТЭК, ккал/кг
I	1. Мел – 0,845 2. Глина – 0,078 3. Огарки – 0,050 Всего – 0,973	$КН = 0,92$ $n = 2,39$ $p = 1,20$	40	251
II	1. Мел – 0,819 2. Глина – 0,059 3. Огарки – 0,002 4. Железосодержащая добавка* – 0,048 Всего – 0,928	$КН = 0,92$ $n = 2,39$ $p = 1,20$	43,3	240
III	1. Мел – 0,761 2. Глина – 0,019 3. Огарки – 0,002 4. Железосодержащая добавка* – 0,051 Всего – 0,833	$КН = 0,92$ $n = 2,32$ $p = 1,20$	50	214
IV	1. Мел – 0,766 2. Глина – 0,032 3. Феррованадиевый шлам – 0,073 Всего – 0,871	$КН = 0,92$ $n = 2,39$ $p = 1,20$	45,6	210

* Смесь 1:1 феррованадиевого шлама и новолипецкого шлака.

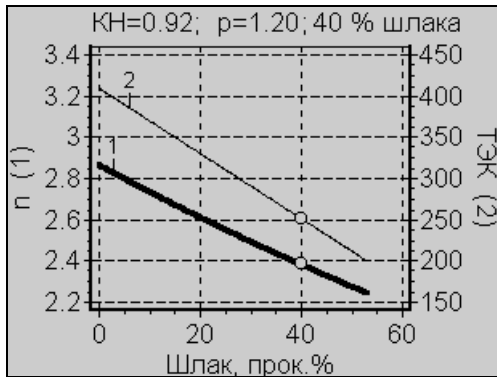


Рис. 17.4. Характеристики трехкомпонентной сырьевой смеси

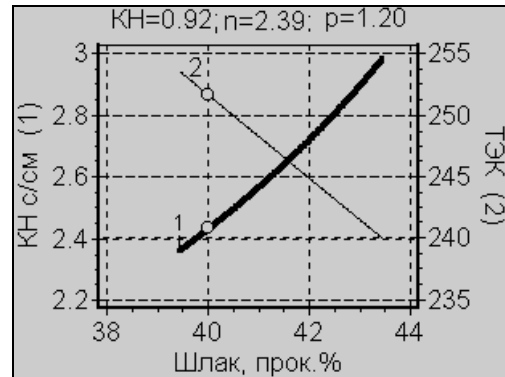


Рис. 17.5. Характеристики четырехкомпонентной сырьевой смеси

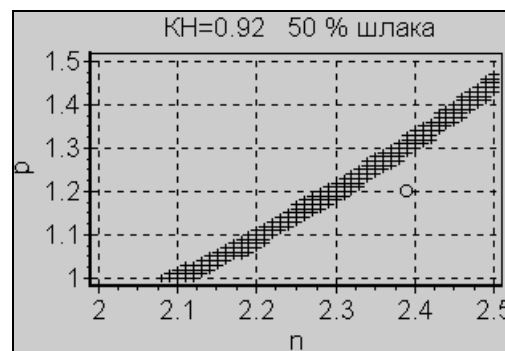
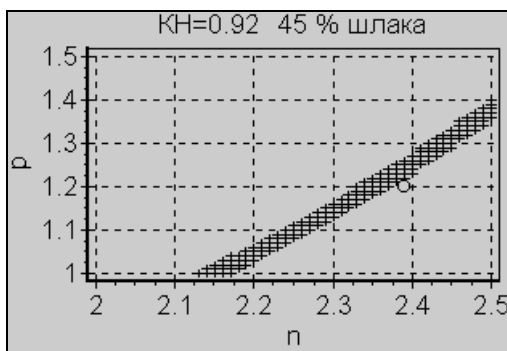


Рис. 17.6. Области возможных значений n и p при вводе 45 и 50% шлака

В результате по сравнению с работой [338] обеспечено снижение ТЭК на 15% при уменьшении расхода сырьевой смеси более чем на 10%. Аналогичного снижения показателей можно добиться и при меньших расходах шлака. Так, при различном подборе компонентов с расходом шлака 5% ТЭК изменяется на 3 ккал/кг кл., а расход топлива – на 0,8 кг/т кл.

17.4. СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

Предлагаемая программа позволяет проводить разносторонние альтернативные расчеты сырьевых смесей. На основе работы М. М. Сычева [184] сформулируем требования к сырьевым смесям:

- обеспечение необходимого качества и свойств клинкера;
- оптимизация процессов в зоне спекания;
- обеспечение минимальных энергозатрат на обжиг.

На разных заводах этим требованиям соответствуют сырьевые смеси различного состава. В источнике [337] проведен анализ работы цементного завода в течение пяти лет. За этот период наблюдалось значительное изменение характеристик сырьевой смеси и клинкера – в среднем 13%, а для некоторых характеристик – более 20% (табл. 17.5). Но отдельные характеристики изменялись незначительно. В первую очередь это КН, а также содержание кремнезема в сырьевой смеси, трехкальциевого силиката и сумма минералов-силикатов в клинкере. Предположим, что, поддерживая значения этих характеристик, можно получать сырьевые смеси с одинаковыми технологическими свойствами и обеспечить стабильный режим работы печи.

Таблица 17.5

Колебания характеристик сырьевых смесей и клинкера

Характеристика	Среднее значение	Вариация, %	Характеристика	Среднее значение	Вариация, %
КН	0,907	1,6	C ₃ S	60	4,0
<i>n</i>	2,54	6,9	C ₂ S	19,7	12,6
<i>p</i>	1,05	10,5	C ₃ A	4,7	21,7
SiO ₂ (сыр.см.)	14,8	2,1	C ₄ AF	15,7	33,6
Al ₂ O ₃ (сыр.см.)	3,0	9,1	C ₃ S+C ₂ S	79,7	5,8
$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (сыр.см.)	5,0	8,7	C ₃ A+C ₄ AF	20,3	22,8
			$\frac{\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S}}{\text{C}_3\text{A}+\text{C}_4\text{AF}}$	4,2	29,5

На основе сырьевой базы завода, включающей восемь видов сырья [337], были составлены сырьевые смеси, обеспечивающие минимальное энергопотребление при обжиге. Первоначально сырье выбиралось по описанной выше методике с заданием КН = 0,92, *n* = 2,4, *p* = 1,2. Результаты расчета представлены в табл. 17.6, смесь № 1. Затем требования к клинкеру были сформулированы, исходя из сделанных ранее предположений. Результаты расчета по этому варианту представлены в табл. 17.6 как смесь № 2.

Расчетные характеристики сырьевых смесей и клинкера

Характеристика	Сырьевая смесь № 1				Сырьевая смесь № 2			
Задаваемые требования	КН, n , p				КН = 0,92; $C_3S+C_2S \approx 80\%$; $C_3S \approx 60\%$; SiO_2 (сыр.см.) $\approx 15\%$; $0,9 \leq p \leq 1,2$; ТЭК \rightarrow минимум			
Модульные характеристики					КН	n	p	КН
	0,92	2,4	1,2	0,92	2,23	0,93		
Фазовый состав, %	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
	63,5	15,2	6,2	12,7	63,0	15,7	3,9	15,4
	Σ 78,7		Σ 18,9		Σ 78,5		Σ 19,3	
Теоретический расход сухой сырьевой смеси и компонентов, кг/кг кл.								
Сырьевая смесь	1,534				1,527			
В том числе:								
мел	1,192				1,177			
глина	0,272				0,264			
глиноземная добавка	0,007				—			
феррованадиевый шлак	0,064				0,086			
ТЭК, ккал/кг кл.	402,6				394,7			
Расход топлива (расчетный), кг/т кл.	206,9				205,0			

Из полученных результатов видно, что заметно снизить энергоёмкость сырьевой смеси возможно даже при поддержании постоянными коэффициента насыщения и сумм минералов-силикатов и минералов-плавней.

Сырьевая смесь и клинкер согласно представленным в табл. 17.6 альтернативным требованиям могут быть получены при значительном изменении глиноземного модуля, что видно из графика, выводимого программой (рис. 17.7).

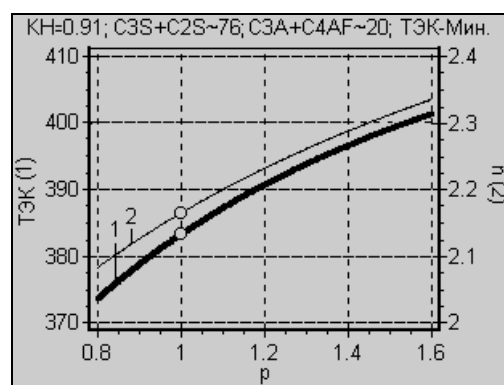


Рис. 17.7. Зависимость между характеристиками сырьевой смеси

В табл. 17.7 приведены результаты расчета сырьевых смесей Белгородского цементного завода на основе различных наборов их характеристик. Под номером 1 представлена заводская сырьевая смесь, под номерами 2, 3, 4 – смеси, рассчитанные по набору характеристик, применяемых в США [195]. Численные значения характеристик, по которым ведется расчет, в смесях 2 и 4 принимались согласно принятым в отечественной литературе рекомендациям [202], а в смеси 3 – согласно рекомендациям справочной литературы США [195].

Из табл. 17.7 видно, что использование различных методов расчета приводит к получению клинкера, значительно различающегося по составу.

Таблица 17.7

Результаты расчета сырьевой смеси

Характеристики	Номер сырьевой смеси				
	1	2	3	4	5
Характеристики, задаваемые при расчете	КН = 0,9 $n = 2,38$	$C_3S = 55$ $C_3A = 8$	КН = 0,9 $n = 3,0$	$m = 2,05$ $n = 2,4$	КН = 0,88 ИО = 3,0
Содержание компонентов в сырьевой смеси, мас. %					
Мел	77,37	77,69	78,34	77,15	76,63
Глина	20,33	21,24	20,86	20,19	20,49
Железосодержащая добавка	2,30	1,07	0,80	2,27	2,82
Модульные характеристики клинкера					
КН	0,90	0,87	0,90	0,89	0,88
n	2,38	2,88	3,00	2,40	2,23
p	1,04	1,61	1,81	1,05	0,91
Минералогический состав клинкера, мас. %					
C_3S	59,7	55,0	61,3	56,6	54,7
C_2S	19,4	25,5	19,9	22,3	23,2
C_3A	4,9	8,0	8,5	5,1	3,8
C_4AF	14,1	9,5	8,3	14,0	16,1
Индекс обжигаемости ИО (оптимальное значение 2,0...3,0)	3,1	3,2	3,2	3,0	3,0
Индекс спекаемости B (оптимальное значение 0,5...0,6)	0,56	0,58	0,57	0,53	0,54
ТЭК, ккал/кг кл.	400,8	401,3	408,9	401,8	393,5

М. М. Сычев в работе [184] отмечал, что в заводских условиях клинкер с $KH = 0,86...0,96$ обеспечивает получение цементов, практически равноценных по механической прочности. Поэтому можно сформулировать требования к оптимальному составу сырьевой смеси следующим образом: обеспечение минимального расхода топлива на обжиг, чему соответствует $KH = 0,86...0,88$, с улучшением условий спекаемости и обжигаемости сырьевых смесей. Возможность получения низкоосновных клинкеров без значительных ухудшений их прочностных показателей также подтверждается в источнике [339]. В соответствии с этими требованиями рассчитана сырьевая смесь 5. Тепловой эффект клинкообразования этой смеси по сравнению с заводской смесью 1 ниже на 7,3 ккал/кг клинкера или 1 кг усл. топл./кг клинкера. Примерно на такую же величину ТЭК смеси 5 ниже, чем смеси 2, при близких коэффициентах насыщения этих смесей.

При использовании программы необходимо задание дополнительных ограничений по другим характеристикам сырьевой смеси и клинкера. Для этого следует провести по статистическим данным работы предприятия исследование влияния состава смесей на качество клинкера и режим обжига, что возможно сделать методом эмпирической регрессии. В результате будут определены возможные диапазоны изменения и оптимальные значения характеристик, которые затем необходимо использовать в расчетах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кафаров В. В.** Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 499 с.
2. **Кафаров В. В.** Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации науки / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – М.: Наука, 1979. – 395 с.
3. **Кафаров В. В.** Моделирование биохимических реакторов / В. В. Кафаров, А. Ю. Винаров, Л. С. Гордеев. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 344 с.
4. **Кафаров В. В.** Моделирование и системный анализ биохимических производств / В. В. Кафаров, А. Ю. Винаров, Л. С. Гордеев. – М.: Лесная промышленность, 1985. – 280 с.
5. **Кафаров В. В.** Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – М.: Высш. шк., 1991. – 400 с.
6. **Кафаров В. В.** Основы массопередачи / В. В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.
7. **Кафаров В. В.** Принципы математического моделирования химико-технологических систем / В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин. – М.: Химия, 1974. – 344 с.
8. **Кафаров В. В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
9. **Кафаров В. В.** Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. Методология проектирования и теория разработки оптимальных технологических схем / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, В. Л. Перов. – М.: Химия, 1979. – 320 с.
10. **Закгейм А. Ю.** Введение в моделирование химико-технологических процессов / А. Ю. Закгейм. – М.: Химия, 1982. – 288 с.
11. **Бояринов А. И.** Методы оптимизации в химической технологии / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1975. – 576 с.
12. **Гордеев Л. С.** Оптимизация процессов химической технологии / Л. С. Гордеев, В. В. Кафаров, А. И. Бояринов. – М.: МХТИ, 1972. – 257 с.
13. **Кафаров В. В.** Основы автоматизированного проектирования химических производств / В. В. Кафаров, В. Н. Ветохин. – М.: Наука, 1987. – 623 с.
14. **Ахназарова С. Л.** Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.
15. **Кафаров В. В.** Системный анализ процессов химической технологии. Процессы массовой кристаллизации из растворов газовой фазы / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, Э. М. Кольцова. – М.: Наука, 1983. – 368 с.
16. **Кафаров В. В.** Системный анализ процессов химической технологии. Статистические методы идентификации в химической технологии / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, Л. Н. Липатов. – М.: Наука, 1982. – 344 с.
17. **Кольцова Э. М.** Методы синергетики в химии и химической технологии / Э. М. Кольцова, Л. С. Гордеев. – М.: Химия, 1999. – 256 с.
18. Принципы системных исследований металлургических процессов и производства: Сб. науч. тр. МИСиС № 144. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с.

19. О системном подходе к моделированию и управлению в металлургии: Сб. науч. тр. МИСиС № 141. – М.: Металлургия, 1982. – 151 с.
20. Применение системного анализа в металлургии: Сб. науч. тр. МИСиС № 136. – М.: Металлургия, 1982. – 143 с.
21. **Ле Суан Хай.** Принципы математического моделирования полидисперсных систем на примере процессов массовой кристаллизации в химической технологии: Автореф. ... д-ра техн. наук / Ле Суан Хай. – М.: МХТИ, 1986. – 32 с.
23. **Торопов Н. А.** Химия цементов / Н. А. Торопов. – М.: Промстройиздат, 1956. – 271 с.
24. **Бутт Ю. М.** Портландцементный клинкер / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – М.: Стройиздат, 1967. – 303 с.
25. **Бутт Ю. М.** Портландцемент / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – М.: Стройиздат, 1974. – 265 с.
26. Справочник по химии цемента / Под ред. Б. В. Волконского и Л. Г. Судакаса. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1980. – 221 с.
27. Теория цемента / Под ред. А. А. Пашенко. – Киев: Будівельник, 1991. – 168 с.
28. Справочник по производству цемента / Под ред. И. И. Холина. – М.: Стройиздат, 1963. – 851 с.
29. Изменение структуры и фазового состава доменных шлаков при нагревании / В. К. Классен, И. Н. Борисов, А. Н. Классен, В. Е. Мануйлов // Изв. вузов. Строительство. – 2002. – № 4. – С. 56–60.
30. **Коленова К. Г.** Меры по снижению клинкерного пыления / К. Г. Коленова, В. П. Рязин // Цемент. – 1972. – № 7. – С. 7–8.
31. **Кравченко И. В.** Особенности обжига клинкера в мощных вращающихся печах / И. В. Кравченко, К. Г. Коленова, Г. Г. Дмитриева // Цемент. – 1975. – № 11. – С. 1–3.
32. Причины образования и пути устранения пылевидного клинкера / В. К. Классен, И. Г. Лугинина, А. Н. Лугинин, А. Ф. Матвеев // Цемент. – 1972. – № 7. – С. 8–9.
33. **Anselm W.** Der Verbrennung – Svergang im Drehofen – Wegl zu seiner intensivierung / W. Anselm, H. Fritsch // ZKG. – 1954. – № 5.
34. **Хвостенков С. Н.** Исследование влияния физико-химических свойств сырья и некоторых технологических факторов на пылеунос из вращающихся печей: Дис. ... канд. техн. наук / С. Н. Хвостенков. – М.: МХТИ, 1961.
35. **Радун Д. В.** Влияние теплового режима на процесс обжига материала / Д. В. Радун, Б. С. Альбац, Ю. В. Уманский // Цемент. – 1972. – № 7. – С. 12.
36. **Панарина А. А.** Лабораторные исследования и промышленные испытания торфо- и углещелочных реагентов в качестве разжижителей цементно-сырьевых шламов / А. А. Панарина, В. К. Воробьева // Сб. тр. Южгипроцемента. – М., 1967. – Вып. 9. – С. 118–133.
37. **Богомолов Б. Н.** Виброобезвоживание сырьевых цементных шламов в потоке / Б. Н. Богомолов // Исследования по технологии цемента. – Красноярск: Сибницемент, 1970. – Вып. 6. – С. 29–33.

38. **Семченко И. А.** Исследование структурно-механических свойств сырьевых шламов цементного производства: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. А. Семченко. – М., 1958.
39. **Ткачев В. В.** Снижение влажности шлама путем разрушения его коагуляционной структуры / В. В. Ткачев // Цемент. – 1974. – № 5. – С. 12–13.
40. **Brückner R.** Der einfluss mechanischer schwingungen auf das fließverhalten von kaolin-wasser-mischungen / R. Brückner. // Berichte deutsche keramische gesellschaft. – 1966. – № 12. – 709–717.
41. **Эльзбугас Г.** Влияние магнитной обработки на свойства воды и некоторые технологические особенности ее применения в производстве строительных материалов // Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. – М.: НИИСтройкерамика, 1971. – С. 292–232.
42. **Белуха П. Г.** Опыт обработки воды электромагнитным полем при производстве шамотных огнеупоров / П. Г. Белуха // Огнеупоры. – 1973. – № 5. – С. 14–18.
43. **Товаров Е. И.** Повышение производительности вращающихся печей за счет применения разжижителей шлама // Е. И. Товаров, В. В. Ходоров, Ю. М. Гинзбург // Цемент. – 1950. – № 6. – С. 3–6.
44. **Кицис С. Б.** Снижение влажности шлама путем применения сульфидно-дрожжевой барды / С. Б. Кицис // Цемент. – 1972. – № 9. – С. 8–9.
45. **Пащенко А. А.** Регулирование процессов структурообразования сырьевых цементных шламов / А. А. Пащенко. – Киев: Вища школа, 1973. – 68 с.
46. **Круглицкий Н. Н.** Натриевые соли адипиновой кислоты – регуляторы пластической прочности шламов / Н. Н. Круглицкий, А. А. Пащенко, И. Ф. Руденко // Химическая промышленность Украины. – 1970. – № 3 (51). – С. 50–52.
47. **Энтин З. Б.** О некоторых особенностях разжижающего действия триполифосфата натрия / З. Б. Энтин, Г. А. Бабин // Науч. сообщ. НИИЦемент. – М., 1968. – Вып. 23(54). – С. 39–43.
48. **Руденко И. Ф.** Регулирование структурно-механических свойств цементных шламов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. Ф. Руденко. – Киев, 1971. – 22 с.
49. **Сулименко Л. М.** О механизме действия добавок-разжижителей на свойства шламов / Л. М. Сулименко // Изв. вузов. Хим. технология. – № 9. – С. 1354–1356.
50. **Боженев П. И.** Использование побочных продуктов в производстве цемента / П. И. Боженев, В. И. Кавалерова // Цемент. – 1974. – № 9. – С. 22–24.
51. **Plassman E.** // ZKG. – 1957. – № 2. – С. 41–46.
52. **Пономарев И. Ф.** Эффективные способы снижения влажности сырьевого шлама / И. Ф. Пономарев // Цемент. – 1974. – № 2. – С. 9.
53. **Pfunder V. R.** Verflüssigung von roh-schlamm / V. R. Pfunder // ZKG. – 1959. – № 11. – P. 501.
54. **Классен В. К.** Методы улучшения физико-химических свойств структурированных суспензий / В. К. Классен, В. И. Литовко, Г. Д. Краснов. – М.: Наука, 1968.
55. **Тимашев В. В.** Разжижение цементных сырьевых шламов: Обзорная информация / В. В. Тимашев, Л. М. Сулименко. – М.: ВНИИЭСМ, 1978. – 61 с.
56. **Богомолв Б. Н.** Интенсификация процесса обжига путем предварительной виброобработки сырьевых шламов / Б. Н. Богомолв // Цемент. – 1973. – № 7. – С. 9.

57. **Беседин П. В.** Действие разжижителей на реологические свойства шламов / П. В. Беседин // Цемент. – 1990. – № 8. – С. 12–14.
58. **Моспан В. И.** Регулирование технологических свойств сырьевых цементных суспензий, содержащих вторичные продукты промышленности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. И. Моспан. – М., 1990. – 17 с.
59. **Беседин П. В.** Модификация глин Балаклейского цементно-шиферного комбината с целью снижения влажности шлама / П. В. Беседин // Цемент. – 1993. – № 5/6. – С. 64–66.
60. **Азаров Ц.** Метод порошка в рентгенографии / Ц. Азаров, М. Бугер. – М.: ИЛ, 1961. – 380 с.
61. Рентгенометрический определитель минералов. – М.: Госгеолтехиздат, 1957. – 867 с.
62. **Завин Л. С.** Рентгеновские методы исследования строительных материалов / Л. С. Завин, Д. М. Хейнер. – М.: Стройиздат, 1965. – 361 с.
63. **Коновалов П. Ф.** Атлас микроструктур цементных клинкеров, огнеупоров и шлаков / П. Ф. Коновалов, Б. В. Волконский, А. П. Хагиковская. – Л.; М.: Госстройиздат, 1962. – 208 с.
64. **Бернштейн Л. А.** Новое в технологии переработки и транспортировки сырья в цементной промышленности / Л. А. Бернштейн. – М.: Стройиздат, 1965. – 215 с.
65. **Романов П. Г.** Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романов, М. И. Курочкина. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.
66. **Белкин И. М.** Ротационные приборы / И. М. Белкин. – М.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
67. **Семченко И. А.** Водоудерживающая способность цементных сырьевых шламов / И. А. Семченко // Науч. сообщ. НИИЦемент. – М., 1958. – Вып. 2(33). – С. 37–39.
68. **Рейнер.** Реология / Рейнер. – М.: Наука, 1965. – 233 с.
69. **Овчаренко Ф. Д.** Пути регулирования технологических свойств глинистого сырья / Ф. Д. Овчаренко, С. П. Ничипоренко // Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И.Менделеева. – 1971. – Т. 68. – С. 179–181.
70. **Рахимбаев Ш. М.** Регулирование технических свойств тампонажных растворов / Ш. М. Рахимбаев. – Ташкент, 1976. – 160 с.
71. Разработка технологии регулирования реологических свойств цементных шламовых суспензий БЦШК: Отчет о НИР №1/91 / НПВН «Новые технологии и материалы»; Рук. П. В. Беседин. – Белгород, 1991. – 106 с.
72. Основы технологии приготовления портландцементных сырьевых смесей / С. И. Данюшевский, Г. Б. Егоров, Л. В. Белов, Ю. В. Никифоров. – Л.: Стройиздат, 1971. – 183 с.
73. **Воробейчиков Л. Т.** Исследование процессов теплообмена в цепных завесах вращающихся клинкерообжигательных печей / Л. Т. Воробейчиков // Тр. Южгипроцемента. – М.: Стройиздат, 1967. – Сб. VIII. – С. 74–83.
74. **Мешик А. Ф.** Автореферат дис. ... канд. тех. наук / А. Ф. Мешик. – М.: НИИЦемент, 1964.
75. **Лыков А. В.** Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968.

76. **Лыков А. В.** Сушка в химической промышленности / А. В. Лыков. – М.: Химия, 1970.
77. **Юнг В. Н.** Основы технологии вяжущих веществ / В. Н. Юнг. – М.: Промстройиздат, 1951. – 547 с.
78. **Бутт Ю. М.** Некоторые вопросы ускорения реакций растворения и кристаллизации при обжиге портландцементной сырьевой смеси / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев, А. П. Осокин // Тр. НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1976. – Вып.31. – С. 43–52.
79. **Торопов Н. А.** О кинетике физико-химических процессов образования цементного клинкера / Н. А. Торопов, П. Ф. Румянцев // Цемент. – 1964. – № 6.
80. **Тимашев В. В.** Закономерности гранулирования клинкера во вращающейся печи / В. В. Тимашев, Б. С. Альбац, А. П. Осокин // Цемент. – 1978. – № 9. – С. 12–14.
81. **Тимашев В. В.** Процесс жидкофазного спекания портландцементного клинкера / В. В. Тимашев, Б. С. Альбац // Тр. VI Междунар. конгресса по химии цемента. – М., 1976.
82. **Шифрин В. Б.** Моделирование теплового поля вращающейся печи на ЭВМ / В. Б. Шифрин, А. Л. Мишулович // Тр. НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1975. – Вып. XVI (30). – С. 83–92.
83. **Гнедина И. А.** Математическое описание процессов декарбонизации и образование первичных клинкерных минералов во вращающихся печах / И. А. Гнедина // Тр. Гипроцемента. – Л.: Стройиздат, 1971. – Вып. XXXVIII.
84. **Кичкина Е. С.** Изучение процесса декарбонизации цементных сырьевых смесей / Е. С. Кичкина // Тр. Гипроцемента. – Л.: Госстройиздат, 1959. – Вып. XXI.
85. **Кичкина Е. С.** Экспериментальное определение кинетических характеристик термического разложения известняка / Е. С. Кичкина // Тр. Гипроцемента. – Л.: Госстройиздат, 1962. – Вып. XXXIV.
86. **Сычев М. М.** К вопросу о кинетике твердофазовых процессов / М. М. Сычев, Е. С. Кичкина, М. А. Астахова // Тр. Гипроцемент/ – М., Л.: Стройиздат, 1964. – Вып. XXVIII.
87. Влияние частоты вращающихся печей на физические процессы при обжиге клинкера / В. С. Ефремов, В. И. Копелович, А. Л. Мишулович, К. Т. Петкин // Тр. НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1975. – Вып. XVI (30). – С. 22–41.
88. **Хохлов В. К.** Влияние температурного режима обжига на скорость клинкерообразования / В. К. Хохлов, А. Л. Мишулович // Цемент. – 1971. – № 11. – С. 20.
89. **Копелович В. И.** Кинетические характеристики процесса клинкерообразования / В. И. Копелович, А. Л. Мишулович // Тр. НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1977. – Вып.34. – С. 33–47.
90. **Репин В. П.** Идентификация математической модели процесса спекания цементного клинкера / В. П. Репин, М. А. Вердиян // Тр. НИИЦемент. – М., 1976. – Вып. 33. – С. 51–58.
91. А. с. 1006405. Способ получения портландцементного клинкера / В. Д. Барбанягрэ и др. (СССР).
92. **Тимашев В. В.** Количественное описание процесса жидкофазного спекания портландцементного клинкера / В. В. Тимашев, Б. С. Альбац // Тр. НИИЦемент. – М.: 1975. – Вып. 29. – С.100–114.

93. **Беседин П. В.** Влияние технологических параметров процесса обжига клинкера на скорость движения материала во вращающейся печи / П. В. Беседин, В. К. Классен, А. И. Литвинов и др. // Цемент. – 1978. – № 10. – С. 21–23.
94. Изучение движения материала в 185-метровых вращающихся печах при обжиге портландцементного клинкера / В. К. Классен, П. В. Беседин, В. М. Коновалов и др. // Реф. информ., серия «Цементная и асбестоцементная промышленность». – М.: ВНИИЭСМ, 1978. – Вып. 7
95. **Тимашев В. В.** Физико-химические основы формирования структуры и свойства клинкера / В. В. Тимашев, А. П. Осокин // Цемент. – 1982. – № 9. – С. 4–6.
96. **Жаров Е. Ф.** Химическая технология вяжущих материалов / Е. Ф. Жаров, Б. Ф. Блудов, Е. И. Ведь; Под общ. ред. Е. И. Ведь. – Белгород, 1973. – 203 с.
97. **Левеншпиль О.** Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. – М.: Химия, 1969. – 622 с.
98. **Eigen H.** Untersuchung der beiden Warmesysteme des Drehofens für Portlandzement / H. Eigen // Tonindustrie-Zeitung. – 1953. – В. 77, № 1/2. – S. 2–8.
99. **Eigen H.** // Tonindustrie-Zeitung. – 1959. – № 19.
100. **Folliot A.** La transmission de Chaleur dans le four rotatif à Ciment / A. Folliot // Revue des matériaux de construction. – 1954. – № 469–471; 1955. – № 472–475.
101. **Классен В. К.** Обжиг цементного клинкера / В. К. Классен. – Красноярск: Стройиздат, 1994. – 323 с.
102. **Классен В. К.** Уменьшение теплотерь в горячей части печи эффективно снижает расход топлива / В. К. Классен // Цемент. – 1978. – С. 18–19.
103. **Классен В. К.** О некоторых теплотехнических закономерностях, проявляющихся при обжиге клинкера во вращающихся печах / В. К. Классен // Химическая технология строительных материалов. – М., 1980. – С. 25–41.
104. **Классен В. К.** Оптимизация сжигания топлива во вращающихся печах / В. К. Классен // Цемент. – 1981. – № 9. – С. 6–8.
105. **Классен В. К.** Расчет некоторых теплофизических свойств газового потока во вращающихся печах / В. К. Классен // Цемент. – 1981. – № 6 – С. 4–5.
106. **Классен В. К.** Влияние различных факторов на расход тепла при обжиге клинкера / В. К. Классен // Цемент. – 1980. – № 8. – С. 8–11.
107. **Вальберг Г. С.** Интенсификация производства цемента / Г. С. Вальберг, И. К. Гринер, В. Я. Мефодовский. – М.: Стройиздат, 1971. – 145 с.
108. **Сибирякова И. А.** Особенности производства высокопрочных портландцементов и исследование влияния основных технологических факторов / И. А. Сибирякова.
109. **Кичкина Е. С.** Принципы конструирования цепных завес / Е. С. Кичкина // Тр. НИИЦемент. — М., 1977. – Вып. 39.
110. **Абрамов В. Я.** Исследование закономерностей работы цепных теплообменников: Дис. ... канд. техн наук / В. Я. Абрамов. – М.: ВАМИ, 1966.
111. **Киселев А. В.** Исследование скорости вращения печей на тепловую подготовку и гранулометрический состав обжигаемого материала / А. В. Киселев // Исследования по технологии цемента. – Красноярск, 1973. – Вып. 7.
112. **Вальберг Г. С.** Увеличение скорости вращения печей повышает их производительность / Г. С. Вальберг // Цемент. – 1968. – № 5.

113. **Ходоров Е. И.** Движение материала во вращающейся печи / Е. И. Ходоров. – М.: Промстройиздат, 1957.
114. **Ходоров Е. И.** Печи цементной промышленности / Е. И. Ходоров. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1968. – 456 с.
115. **Крикулин В. Н.** Движение материала в печных агрегатах / В. Н. Крикулин // Цемент. – 1971. – № 1. – С. 7.
116. **Лугинина И. Г.** О причинах появления клинкерной пыли / И. Г. Лугинина, В. П. Захаров, В. К. Классен // Цемент. – 1961. – № 3.
117. **Ходоров Е. И.** Исследование процесса пылеуноса на модели вращающейся печи / Е. И. Ходоров // Тр. ВАМИ. – 1971. – № 94.
118. **Фрайман Л. С.** Пылеобразование во вращающейся печи в зависимости от режимных параметров // Л. С. Фрайман, Ю. С. Шлионский // Цемент. – 1966. – № 9.
119. **Кичкина Е. С.** Изучение движения материала и пылеобразования во вращающихся печах методом меченых атомов / Е. С. Кичкина // Цемент. – 1967. – № 4. – С. 6–8.
120. **Классен В. К.** Изучение процессов образования клинкерной пыли во вращающихся печах: Автореферат дис. ... канд. техн. наук / В. К. Классен. – Л.: ЛПИ, 1969.
121. **Ээнмаа Т. Э.** Оптимизация технологических процессов цементного производства на основе статистических исследований: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т. Э. Ээнмаа. – Л.: ЛТИ, 1971. – С. 7.
122. **Гофман Г. М.** Статистические исследования технологических параметров процесса обжига / Г. М. Гофман, Н. М. Базылева, Л. П. Полетаева // Тр. НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1968. – Вып. 23 (54).
123. Влияние угла раскрытия газового факела на положение зон печи и клинкерообразования / И. Г. Лугинина, А. Н. Лугинин, М. А. Шапошников и др. // Цемент. – 1973. – № 6. – С. 6–10.
124. **Ходоров Е. И.** Механизм движения материала во вращающейся печи и условия его оптимизации / Е. И. Ходоров // Цемент. – 1975. – № 7. – С. 6–7.
125. **Заболотны В.** Применение радиоактивных материалов при исследовании скорости движения материала в печи / В. Заболотны, З. Виш // Цемент. – 1975. – № 4.
126. **Кичкина Е. С.** К вопросу исследования движения материала во вращающихся печах / Е. С. Кичкина // Тр. Гипроцемента. – Л.: Стройиздат, 1971. – Вып. 39.
127. **Чеботарев В. Л.** О динамических закономерностях движения материала во вращающейся печи 4x150 / В. Л. Чеботарев, Т. Э. Ээнмаа // Цемент. – 1973. – № 2. – С. 9–10.
128. **Rutle J.** // Pit and Quarry. – 1955. – Vol. 48, № 1. – P. 120–136.
129. **Sullivan I. D.** Technical paper bureau of miens / I. D. Sullivan, Ch. G. Maier, O. C. Ralstan. – 1927. – № 384.
130. **Bayard R. A.** // Chemistry and metallurgical engineering. – 1945. – March.
131. **Ворошилов А. П.** Современные проблемы сушильной механики / А. П. Ворошилов. – ГОНТИ, МКТП СССР, 1938.

132. **Saeman W. S.** // Pit and Quarry. 1951. – V. 45, № 4.
133. **Гиги Г.** Термодинамика цементной печи / Г. Гиги, Ф. Гюи // Третий Международный конгресс по химии цемента. – М.: Госстройиздат, 1958. – С.346–370.
134. **Абрамов В. Я.** Вращающиеся печи для спекания глиноземистых (нефелиновых) шихт / В. Я. Абрамов // Сб. тр. ЦНИИЦветмета. – М., 1961.
135. **Мазуров Д. Я.** Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов / Д. Я. Мазуров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1982. – 288 с.
136. **Ходоров Е. И.** Унос материала из вращающихся печей / Е. И. Ходоров // Цемент. – 1957. – № 5. – С. 23–28.
137. **Хвостенков С. Н.** Влияние профиля вращающейся печи на пылеунос / С. Н. Хвостенков // Цемент. – 1951. – № 6. – С. 8–10.
138. **Срибнер Н. Г.** Унос пыли сыпучих материалов из полых вращающихся барабанов / Н. Г. Срибнер // Тр. ВАМИ. – М., 1976. – № 94.
139. **Ходоров Е. И.** Механизм и закономерности пылеуноса из вращающихся печей сухого способа производства / Е. И. Ходоров // Цемент. – 1976. – № 10. – С. 17–19.
140. **Вальберг Г. С.** Некоторые особенности движения материала в мощных печах при повышенных оборотах / Г. С. Вальберг, А. З. Кулешенко // Цемент. – 1971. – № 7. – С. 10–11.
141. **Koch G.** Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen / G. Koch // Leipzig. Sonderdruck. "Radioactive Isotope und das Bauwesen", 1961.
142. Применение меченых атомов на цементных заводах // Б. Н. Никишин, А. Х. Колесов, Ю. Н. Стребков, В. Н. Майдан // Цемент. – 1973. – № 1. – С. 13–14.
143. **Lee T. H.** Computer process control: Modeling and optimization / T. H. Lee, G. E. Adams, W. M. Gaines. – N. Y., 1968.
144. **Мартин Ф.** Моделирование на вычислительных машинах: Пер. с англ.; Под ред. Коваленко И. Н. / Ф. Мартин. – М.: Советское радио, 1972. – 288 с.
145. **Абрамсон И. Г.** Ядерно-физические методы в исследованиях и контроле цементного производства / И. Г. Абрамсон, Е. И. Павлов, А. Г. Судакас. – Л.: Стройиздат, 1975.
146. **Беседин П. В.** К методике определения интенсивности пылеобразования во вращающихся печах / П. В. Беседин, В. К. Классен // Химическая технология строительных материалов. – М., 1980. – С. 3–1.
147. **Frish V.** Möglichkeiten zur Optimierung des Brennprozesses in Zementdrehrohröfen / V. Frish, R. Jeschar // ZKG. – 1983. – Vol. 36, № 10. – P. 549–560.
148. **Перескок С. А.** Разработка алгоритма расчета эффективности работы колосникового холодильника / С. А. Перескок, С. Ф. Миндолин, П. А. Трубаев // Тез. докл. междунар. конф. – Белгород, 1993. – Ч. I. – С. 24–25.
149. Математическое моделирование охлаждения клинкера в колосниковом холодильнике / С. А. Перескок, П. А. Трубаев, В. К. Классен и др. // Компьютерное моделирование: Сб. науч. тр. – Белгород, 1998. – С. 330–336.
150. **Воробьев Х. С.** Теплотехнические процессы и аппараты силикатных производств / Х. С. Воробьев, Д. Я. Мазуров, А. А. Соколов. – М.: Высш. шк., 1962. – 420 с.
151. **Соколинская М. А.** Разработка метода контроля и способа восстановления обмазки в зоне спекания цементных вращающихся печей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. А. Соколинская. – М., 1983. – 24 с.

152. **Малышев А. П.** Механические и теплофизические свойства сырья / А. П. Малышев // Цемент. – 1968. – № 2. – С. 5–7.
153. **Дульнев Г. Н.** Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1991. – 248 с.
154. **Казанцев Е. И.** Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев – М.: Metallurgia, 1964. – 452 с.
155. **Проселков Ю. М.** Теплофизические свойства портландцементного камня / Ю. М. Проселков, Л. А. Чувакин // Цемент. – 1975. – № 8. – С. 18–20.
156. **Матвеев М. А.** Расчеты по химии и технологии стекла: Справочное пособие / М. А. Матвеев, Г. М. Матвеев, Б. Н. Френкель. – М.: Стройиздат. – 1972. – 239 с.
157. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / Под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
158. **Кржижановский Р. Е.** Теплофизические свойства неметаллических материалов / Р. Е. Кржижановский, З. Ю. Штерн. – Л.: Энергия, 1973. – 336 с.
159. **Freeman S.** Thermal Conductivity of amorphous solids / S. Freeman, A. Anderson // Phys. Rev. B.: Condens. Mater. – 1986. – № 8, pt. 2. – P. 5684–5690.
160. **Vasquer A.** Thermal conductivity of hydrocarbon mixtures: A perturbation approach / A. Vasquer, J. Driano // Ind. and Eng. Chem. Res. – 1993. – № 1. – P. 194–199.
161. Стекло: Справочник / Под ред. Н. М. Павлушина. – М.: Стройиздат, 1973. – 466 с.
162. **Бек Дж.** Некорректные обратные задачи теплопроводности: Пер. с англ. / Дж. Бек, Б. Блакулл, Ч. Сент-Клэр. – М.: Мир, 1989. – 312 с.
163. **Беляев Н. М.** Методы нестационарной теплопроводности / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М.: Высш. шк., 1978. – 253 с.
164. **Кудряшов Л. И.** Приближенные решения нелинейных задач теплопроводности / Л. И. Кудряшов, Н. Л. . Меньших. – М.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
165. **Карташов Э. М.** Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.
166. **Зарубин В. С.** Инженерные методы решения задач теплопроводности / В. С. Зарубин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.
167. **Усов А. Т.** Приближенные методы расчета температур нестационарно нагреваемых твердых тел простой формы / А. Т. Усов. – М.: Машиностроение, 1973. – 108 с.
168. **Stolz G.** Numerical Solutions to an Inverse Problem of Heat Conduction for Simple Shapes / G. Stolz // Heat Transfer. – 1960. – № 82. – P. 20–26.
169. **Beck J.** Criteria for Comparison of Methods of Solutions of the Inverse Heat Conduction Problem // Nucl. Eng. Des. – 1979. – № 53. – P. 11–22.
170. **Кузнецов В. А.** Математическое моделирование тепловой работы цементной вращающейся печи: Учебное пособие / В. А. Кузнецов. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ. – 1994. – 80 с.
171. Теплопроводность твердых тел: Справочник / Под ред. А. С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
172. **Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар. – М.: Мир, 1968.

173. **Харламов А. Г.** Теплопроводность высокотемпературных изоляторов / А. Г. Харламов. – М.: Атомиздат, 1980. – 100 с.
174. **Даниэльс Ф.** Физическая химия: Пер. с англ. / Ф. Даниэльс, Р. Олберти. – М.: Мир, 1978. – 648 с.
175. **Rippin D.** Statistical methods for experimental planning in chemical engineering / D. Rippin // Proc. MATCHEM: Conf. Math. Methods. Chem. Eng., Balatonfured, 5–8 May. 1986: 333th event Eur. Fed. Chem. Eng. Vol. 1. – Budapest, S. A. – P. 20–40.
176. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкостей / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
177. ГОСТ 7076–87. Материалы строительные. Метод определения теплопроводности. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 6 с.
178. **Пустовалов В. В.** Определение теплопроводности огнеупоров до 1200 °С методом стационарного теплового потока / В. В. Пустовалов // Огнеупоры. – 1959. – № 4.
179. **Clements J.** The thermal conductivity of some refractory materials / J. Clements, J. Vyse // Trans. Brit. Ceram. Soc. – 1957. – Vol. 56. – P. 296–308.
180. **Kingery W.** Thermal conductivity: X, Data for several pure oxide materials corrected to zero porosity / W. Kingery, J. Francl // J. Amer. Ceram. Soc. – 1954. – Vol. 37, № 2, Part. II. – P. 107–110.
181. **Осипова В. А.** Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
182. **Дульнев Г. П.** Теплопроводность смесей со взаимно проникающими компонентами / Г. П. Дульнев // Инженерно-физический журнал. – 1970. – Т. 19, № 3.
183. **Петров-Денисов В. Г.** Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции / В. Г. Петров-Денисов, Л. А. Масленников. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
184. **Сычев М. М.** Технологические свойства сырьевых цементных шихт / М. М. Сычев. – Л.: Госстройиздат, 1962. – 136 с.
185. **Дешко Ю. И.** Наладка и теплотехнические испытания вращающихся печей на цементных заводах / Ю. И. Дешко, М. Б. Креймер, Т. А. Огаркова. – М.: Стройиздат, 1962. – 244 с.
186. **Дуда В.** Цемент: Пер. с нем. / В. Дуда. – М.: Стройиздат, 1981. – 270 с.
187. **Бард Й.** Нелинейное оценивание параметров: Пер. с англ. / Й. Бард. – М.: Статистика, 1979. – 349 с.
188. **Maria G.** Estimarea parametrilor modelelor proceselor chimice / G. Maria // Rev. Chim. (RSR). – 1989. – № 1. – С. 45–49.
189. Качество продукции цементной промышленности СССР за 1988 год. – М., 1989. – 312 с.
190. Цементная промышленность СССР в 1987 году. – Вып. XLV. – М.: НИИЦемент, 1988. – 518 с.
191. **Бабушкин В. И.** Термодинамика силикатов / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, Мчедлов-О. П. Петросян. – М.: Стройиздат, 1986. – 408 с.
192. **Кутателадзе С. С.** Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие / С. С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
193. **Кутателадзе С. С.** Справочник по теплопередаче / С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.

194. **Карслоу Х. С.** Теплопроводность твердых тел / Х. С. Карслоу, Д. К. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
195. **Kurt E. Peray** Cement Manufacturer's Handbook / Kurt E. Peray. – N. Y.: Chemical Published Co., Inc. – 1979.
196. **Гельфанд Я. Е.** Управление цементным производством с использованием вычислительной техники / Я. Е. Гельфанд. – Л.: Стройиздат, 1973. – 178 с.
197. **Ксаминг Л.** Новые модули и расчет минералогического состава для контроля качества клинкера / Л. Ксаминг // Реф. журн. Химия. 19М. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов. – 1989. – № 23. – С. 65.
198. Интенсификация процессов спекания портландцементного клинкера // Обзор. информ. ВНИИЭСМ. Пром-сть строит. материалов. Сер. 1. Цементная и асбестоцементная промышленность. – М., 1988. – 60 с.
199. **Lea F.** The chemistry of portland cement / F. Lea, C. Desch. – London, 1935.
200. **Duda W.** Cement-Data-Book / W. Duda. – Bauverlag GmbH: Wiesbaden, Berlin, 1984. – V. 2.– 426 p.
201. **Бленкс Р.** Технология цемента и бетона / Р. Бленкс, Г. Кеннеди. – М.: Промстройиздат, 1957. – 328 с.
202. **Бутт Ю. М.** Технология цемента и других вяжущих веществ / Ю. М. Бутт. – М.: Стройиздат, 1976. – 407 с.
203. **Chatterjee A.** Chemical-Mineralogical Characteristics of Raw Materials / A. Chatterjee. // Adv. Cem. Technol.: Crit. Rev. and Stud.: Manuf. Qual. Control, optimization. and use. – Oxford, 1983. – P. 38–67.
204. Усреднение цементного сырья // Обзор. информ. ВНИИЭСМ: Пром-сть строит. материалов. Сер. 18. Цементная и асбестоцементная промышленность. – М., 1988. – Вып. 1.– 57 с.
205. **Николаев А. П.** Активность известкового компонента цементной сырьевой смеси и ее связь с процессами формирования клинкерных минералов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. П. Николаев. – М., 1985. – 24 с.
206. V Международный конгресс по химии цемента. – М.: Стройиздат, 1973.
207. **Волков В. В.** Тр. МХТИ / В. В. Волков, Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – Вып. XI. – М., 1963.
208. Оценка погрешностей химических анализов цементных сырьевых смесей и клинкера / Г. Б. Егоров, Л. В. Белов, И. В. Богданова и др. // Цемент. – 1972. – № 4. – С. 16–18.
209. **Bogue R.** The Chemistry of Portland Cement / R. Bogue. – N. Y., 1950. – 326 p.
210. Контроль цементного производства. – Т. II. Технологический контроль / Под ред. А. Ф. Семендяева. – Л.: Стройиздат, 1974. – 304 с.
211. Формирование портландцементного клинкера // В. И. Корнеев, М. М. Сычев, Ф. Мюле, Г. Н. Касьянова. – Л.: ЛТИ, 1973.
212. **Milgley H.** // Cem. Tech. – 1971. – № 4.
213. **Hancen W. C.** Potential Compound Compositions of Portland Cements / W. C. Hancen // Journal of materials. JMLSA. – 1969. – Vol. 4. – № 3.
214. **Стрелков М. М.** // Строительные материалы, строительное производство: Сб. тр. МИСИ. – Л., 1973.
215. **Glauser A.** // ZKG. – 1970. – № 7.

216. **Тимашев В. В.** Технический анализ и контроль производства вяжущих материалов и асбоцемента / В. В. Тимашев, В. Е. Каушанский. – М.: Стройиздат, 1974. – 280 с.
217. **Такашима** // ZKG. – 1960. – № 12.
218. **Рояк С. М.** // Тр. НИИЦемент. – М.: Промстройиздат, 1952. – Вып. 5.
219. **Фатеева Н. И.** // Цемент. – 1966. – № 4.
220. **Инслей Г.** Микроскопия керамики и цементов / Г. Инслей, В. Д. Фрешет. – М.: Госстройиздат, 1960.
221. **Волконский Б. В.** Технологические физико-механические и физико-химические исследования цементных материалов / Б. В. Волконский, С. Д. Макашев, Н. П. Штейерт. – Л.: Стройиздат, 1972. – 304 с.
222. Влияние состава и дисперсности сырья на стойкость футеровки печей / Ю. В. Никифоров, Л. И. Скобло, Ю. А. Щупак, Б. Л. Казанович // Цемент. – 1982. – № 2. – С. 14–16.
223. **Ференс Н. И.** Интенсификация процессов обжига портландцементного клинкера / Н. И. Ференс // Науч.-технический прогресс в цементной промышленности: Тр. НИИЦемент. – М., 1976. – Вып. 38. – С. 13–19.
224. Проектирование цементных заводов / Под ред. П. В. Зозули, Ю. В. Никифорова. – СПб.: Синтез, 1995. – 446 с.
225. **Chatterjee A.** Burn ability and Clinkerization of Cement Raw Mixes / A. Chatterjee. // Adv. in Chem. Reviews and Studies. – 1983. – P. 63–113.
226. **Коган Л. С.** // Цемент. – 1950. – № 5.
227. Технология вяжущих веществ / Ю. М. Бутт, С. Д. Окорочков, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. – М.: Высш. шк., 1965. – 620 с.
228. **Scheubel B.** Rohmaterialeigenschaften und Temperaturprofil. Einflussfaktoren auf Klinkerqualität und fuerfeste Ausmauerung / B. Scheubel // ZKG. – 1989. – № 10. – P. 532–529.
229. Регрессионная модель теплового эффекта процесса клинкерообразования / А. П. Белов, В. В. Волгин, Н. Е. Середа, В. В. Усенко // Теоретическое и экспериментальное исследования новых методов производства клинкера и цемента: Тр. НИИЦемент. – М., 1976 г. – Вып. 19. – С. 27–33.
230. Математическое моделирование активности клинкера / Г. Б. Егоров, Л. В. Белов, Т. Э. Ээнмаа и др. // Цемент. – 1975. – № 3. – С. 18–19.
231. Сопровождение по ископаемому сырью: Тез. докл. – М.: Изд-во АН СССР, 1937.
232. **Кравченко В. И.** Высокопрочные и особотвердеющие портландцементы / В. И. Кравченко. – М.: Стройиздат, 1971.
233. **Кюль Г.** Химия цемента в теории и практике / Г. Кюль. – М.: Изд-во. Всехимпром ВСХН СССР, 1930.
234. **Ээнмаа Т. Э.** Гарантия марки цемента и расчетное определение его активности / Т. Э. Ээнмаа // Цемент. – 1972. – № 8.
235. **Ээнмаа Т. Э.** Поиск оптимальных режимов обжига портландцементного клинкера / Т. Э. Ээнмаа // Цемент. – 1971. – № 7.
236. **Бутт Ю. М.** Влияние фазового состава портландцементных клинкеров на вяжущие свойства цементов / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев // Тр. НИИЦемент. – М.: Госстройиздат, 1962. – Вып. 17.

237. **Бойков В. А.** Образование обмазки в зоне спекания вращающейся печи / В. А. Бойков, М. М. Сычев, Г. Б. Егоров // Цемент. – 1978. – № 1. – С. 19–21.
238. **Скобло Л. И.** Зависимость состава и содержания жидкой фазы клинкера от характеристик сырьевой шихты / Л. И. Скобло // Цемент. – 1984. – № 3. – С. 21–22.
239. **Скобло Л. И.** Расчет на ЭВМ количества и состава расплава в клинкере / Л. И. Скобло // Цемент. – 1980. – № 3. – С. 13–14.
240. **Тимашев В. В.** Определение рациональных параметров обжига в мощных вращающихся печах // В. В. Тимашев, Б. С. Альбац, М. Л. Быховский // Тр. НИИЦемент. – М., 1978. – Вып. 43. – С. 15–25.
241. Влияние минералогического состава сырьевой смеси на процессы клинкерообразования / О. П. Мчедлов-Петросян, Т. Ю. Щеткина, Н. И. Сапожникова, Л. Н. Скрынник // Цемент. – 1980. – № 1. – С. 7–9.
242. **Глебов С. В.** // Тр. Всесоюз. ин-та огнеупоров. – 1939. – Вып. 18.
243. **Matousek J.** // Stavivo. – 1960. – № 9. – P. 38.
244. **Кузнецова Т. В.** Современные представления о процессах формирования портландцементного клинкера (по материалам 9-го Междунар. конгресса по химии цемента) / Т. В. Кузнецова, Л. Н. Гринкевич // Цемент. – 1995. – № 3. – С. 24–30.
245. **Ли Ф. М.** Химия цемента и бетона / Ф. М. Ли. – М.: Госстройиздат, 1961. – 645 с.
246. **Вальберг Г. С.** Некоторые вопросы высокотемпературной технологии получения клинкера / Г. С. Вальберг. // Бюл. техн. информ. Южгипроцемента № 2 (25). – Харьков. — 1958.
247. **Hiroshi U.** Influence of chemical module of raw meal on burning degrees, character of clinker, hydration characteristics and property of cement / U. Hiroshi, U. Shunichiro, S. Tokuhiko // Rev. 42nd Gen. Meet., Techn. Sess., Tokyo, May, 1988. – Tokyo, 1988. – С. 30–33.
248. **Дворкин Л. И.** Количественные связи между технологическими факторами, определяющими спекаемость сырьевых шихт / Л. И. Дворкин // Цемент. – 1968. – № 2.
249. **Сычев М. М.** Регрессионный анализ для оценки спекания сырьевых смесей / М. М. Сычев, А. В. Сланевский // Цемент. – 1968. – № 3. – С. 4–5.
250. **Левкин Н. И.** // Цемент. – 1951. – № 3.
251. Перспективы разработки автоматизированных рабочих мест персонала лаборатории цементного завода / Г. Я. Гельфанд, С. К. Дороганич, Л. М. Яковис и др. // Тр. НИИЦемент. – М., 1976. – Вып. 95. – С. 309–310.
252. **Гнедина И. А.** Прогнозирование производительности и расхода тепла при реконструкции печей мокрого способа производства / И. А. Гнедина, Г. Ф. Ермаков // Цемент. – 1978. – № 11. – С. 7–8.
253. **Гнедина И. А.** Расчет производительности реконструируемых печей мокрого способа производства / И. А. Гнедина, Г. Ф. Ермаков // Цемент. – 1977. – № 10. – С. 8–9.
254. **Гнедина И. А.** Расчет производительности и удельного расхода тепла печей мокрого способа производства / И. А. Гнедина, Г. Ф. Ермаков // Цемент. – 1991. – № 3–4. – С. 55–56.
255. Fours rotativ pour b'industrie du cement Fives call badcock. – P., 1980.

256. **Никифоров Ю. В.** Науч.-технические предпосылки создания химико-технологических процессов производства цемента / Ю. В. Никифоров, Л. Г. Судакас // Цемент. – 1986. – № 9. – С. 1–2.
257. **Мчедлов-Петросян О. П.** Развитие теории о реакциях в твердых фазах и минералообразование клинкера / О. П. Мчедлов-Петросян, Т. Ю. Щеткина, Н. И. Сапожникова // Цемент. – 1978. – № 5. – С. 8–9.
258. Состав, теплота образования и гидравлическая активность низкоосновных клинкеров / Л. Г. Судакас, А. Ф. Крапля, М. В. Коугия и др. // Цемент. – 1984. – № 3. – С. 14–16.
259. **Зедгинидзе И. Г.** Планирование эксперимента при исследовании многокомпонентных смесей / И. Г. Зедгинидзе, Ф. С. Новик, Т. А. Чемлева // Применение математических методов для исследования многокомпонентных систем. – М.: Металлургия, 1974. – С. 3–11.
260. **Чемлева Т. А.** Применение симплекс-решетчатого планирования при исследовании диаграмм «состав-свойство» / Т. А. Чемлева, Н. Г. Микешина // Новые идеи планирования эксперимента. – М.: Наука, 1969. – С. 191–208.
261. **Микешина Н. Г.** Планирование экспериментов на симплексе (изучение свойств смесей) / Н. Г. Микешина // Новые идеи в планировании эксперимента. – М.: Наука, 1969. – С. 177–190.
262. **Новик Ф. С.** Применение метода симплексных решеток для построения диаграмм «состав-свойство» / Ф. С. Новик, В. С. Минц, Ю. С. Малков // Заводская лаборатория. – 1967. – № 7. – С. 840–847.
263. **Маркова Е. В.** Математическое планирование химического эксперимента / Е. В. Маркова, А. Е. Рохваргер. – М.: Знание, 1971. – 31 с.
264. **Налимов В. В.** Статистические методы планирования экстремальных экспериментов // В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – С. 285–289.
265. **Новик Ф. С.** Математические методы планирования экспериментов в металлведении / Ф. С. Новик. – М.: МИСиС, 1971. – 148 с.
266. **Зедгинидзе И. Г.** Математическое планирование эксперимента для исследования и оптимизации свойств смесей / И. Г. Зедгинидзе. – Тбилиси: Мицниереба, 1971. – 149 с.
267. Планирование эксперимента при исследовании многокомпонентных систем // Материалы Всесоюз. конф. / Под ред. И. Г. Зедгинидзе. – Тбилиси, 1972. – 96 с.
268. **Чемлева Т. А.** Планирование эксперимента при построении диаграмм «состав-свойство» / Т. А. Чемлева, Ю. П. Адлер // Применение математических методов для исследования многокомпонентных систем. – М.: Металлургия, 1974. – С. 11–42.
269. **Leserek K.** Optimum experiment design for identification of large scale system / K. Leserek // 5th Int. Conf. Syst. Eng., Fairborn, Ohio, Sept. 9–11, 1987. – N. Y., 1987. – P. 589–593.
270. **Schubert E.** Versuchsplanung zuz Parameter. Prazisierung. Vergleich verschiedener methoden / E. Schubert, H. Bakemeir // Chem. Ing. Techn. – 1988. – № 12. – P. 1076–1077.
271. **Мокрушкин А. Н.** Об устойчивости статистического анализа данных заводских испытаний / А. Н. Мокрушкин // Цемент. – 1995. – № 2. – С. 30–31.

272. **Бутт Ю. М.** Химическая технология вяжущих материалов / Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. – М.: Высш. шк, 1980. – 472 с.
273. **Дороганич С. К.** Управление приготовлением цементной шихты / С. К. Дороганич, А. Я. Макеев // *Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении: Тез. докл. Всесоюз. науч. конф.*, 23–25 мая 1989 г. – Ч. 9. Управление сложными техническими объектами и технологическими процессами в промышленности строительных материалов. – Белгород, 1989. – С. 35–36.
274. **Droste W.** Automation der Rohmellaufbereitung nach Verfehrenstechnischen Entscheidungskriterien / W. Droste. // *ZKG*. – 1982. – В. 35., № 23. – S. 140–146.
275. Использование микро-ЭВМ в цементном производстве / А. А. Сендеров, А. И. Здоров, В. Б. Хлусов, Л. А. Маслова // *Цемент*. – 1987. – № 4. – С. 13–20.
276. **Полищук Э. Р.** Подбор рационального компонентного состава сырьевой смеси для Чернореченского цементного завода / Э. Р. Полищук, М. В. Коугия, В. Е. Лавренов // *Ускорение науч.-технического прогресса в промышленности строительных материалов и строительной индустрии: Тез. докл. Восьмых науч. чтений БТИСМ*. – Белгород, 1987. – Ч. 2. – С. 30–31.
277. Исследование процесса приготовления многокомпонентных сырьевых смесей / Ю. Т. Селиванов, М. Г. Казаков, В. Ф. Пермин, Ф. Г. Ткачев // *Тез. докл. науч. конф.*, Тамбов, 10–11 марта 1994 г. – Тамбов, 1994. – С. 81–82.
278. **Warren L.** How two compounded computerized processing and quality control / L. Warren // *Plast. Technol.* – 1988. – № 8. – P. 15, 17, 19.
279. Разработка рационального состава сырьевой смеси при использовании материалов неоднородного состава / Э. Р. Полищук, М. В. Коугия, Л. В. Бородинская и др. // *Тр. НИИЦемент*, 1986. – № 89. – С. 12–20.
280. **Pozzetto J.** Raw meal automation at the Bussan plant / J. Pozzetto, I. Berland // *World Cem.* – 1988. – № 5. – P. 209–213.
281. **Удачкин И. Б.** Тенденции развития цементной технологии / И. Б. Удачкин // *Цемент*. – 1991. – № 3/4. – С. 4–10.
282. Основные положения управления химическим составом сырьевой шихты при поточной технологии ее приготовления / Г. Б. Егоров, Л. В. Белов, Е. П. Ткаченко, В. А. Савулькин // *Науч.-технический прогресс в цементной промышленности: Тр. НИИЦемент* – М., 1976. – Вып. 38. – С. 3–13.
283. **Шифрин В. Б.** Применение ЭВМ для расчета сырьевых смесей / В. Б. Шифрин, А. И. Церковный // *Цемент*. – 1970. – № 5. – С. 3–4.
284. Управление химико-технологическими процессами приготовления многокомпонентных смесей / Я. Е. Гельфанд, Л. М. Яковис, С. К. Дороганич и др.; Под ред. Я. Е. Гельфанда. – Л.: Химия, 1988. – 288 с.
285. **Бизюк Н. Г.** Интенсификация приготовления шлама в потоке с помощью управляющей вычислительной машины / Н. Г. Бизюк, В. И. Шапиро, В. Б. Шифрин // *Совершенствование процессов переработки сырья: Тр. НИИЦемент*. – М.: Стройиздат, 1974. – Вып. XV (28). – С. 79–99.

286. Базовый алгоритм управления приготовлением сырьевой смеси в поточных технологических схемах / Я. Е. Гельфанд, Ю. Г. Френкель, И. А. Кацнельсон и др. // Цемент. – 1977. – № 2. – С. 17–18.

287. **Дудников Е. Е.** Методика расчета составов шлама с использованием вычислительной техники / Е. Е. Дудников, Л. К. Чигарькова // Цемент. – 1970. – № 3. – С. 11–13.

288. **Селюгин А. А.** Ситуационное управление в АСУ процессом обжига цементного клинкера: Дис. ... канд. техн. наук / А. А. Селюгин. – Фрунзе, 1975. – 214 с.

289. **Holmblad L.** Erfahrungen mit der automatischen Ofenüberwachung durch einen Computer und Fuzzy Logic / L. Holmblad // Verfahrenstechnik der Zementherstellung: VDZ Kongress' 85. – Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1987. – S. 539–547.

290. **Löbbering D.** Effektive Automatisierungslösungen für die Zementindustrie / D. Löbbering, J. Petruschke, W. Clemens и др. // ZKG. – № 9. – 1999. – S. 467–472.

291. Поточное корректирование химического состава сырьевого шлама / Л. В. Белов, Г. Б. Егоров, Е. П. Ткаченко и др. // Цемент. – 1973. – № 3. – С. 13–14.

292. **Бутт Ю. М.** Практикум по технологии вяжущих материалов / Ю. М. Бутт. – М.: Высш. шк., 1973. – 503 с.

293. Приготовление сырьевого шлама заданного химического состава в потоке на Себряковском цементном заводе / Е. П. Ткаченко, В. А. Савулькин, Л. В. Белов, Г. Б. Егоров // Химия и технология портландцемента: Тр. НИИЦемент. – М., 1977. – Вып. 37. – С. 4–10.

294. **Беседин П. В.** Проектирование портландцементных сырьевых смесей: Учеб. пособие / П. В. Беседин, П. А. Трубаев. – Белгород, 1994. – 126 с.

295. **Арбузов В. А.** Использование ЭВМ при системном проектировании АТК сырьевых переделов / В. А. Арбузов, С. К. Дороганич, Л. М. Яковис // Цемент. – 1989. – № 7. – С. 13–14.

296. Анализ эффективности многокаскадных систем управления в составе АТК приготовления многокомпонентных смесей / М. Г. Адаскин, В. А. Арбузов, С. К. Дороганич, Л. М. Яковис // Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении: Тез. докл. Всесоюз. конф. 23–25 мая 1989 г. – Ч. 9. Управление сложными техническими объектами и технологическими процессами в промышленности строительных материалов. – Белгород, 1989. – С. 5–6.

297. **Сычев М. М.** Оптимизация технологических параметров цементного производства / М. М. Сычев // Цемент. – 1975. – № 12. – С. 4–5.

298. **Егоров Г. Б.** Химико-технологические взаимосвязи и оптимизация производства портландцемента: Дис. ... д-ра. техн. наук / Г. Б. Егоров. – Л., 1982. – 346 с.

299. **Никифоров Ю. В.** Совершенствование технологии производства цемента / Ю. В. Никифоров // Цемент. – 1991. – № 5. – С. 15–20.

300. **Гельфанд Я. Е.** Модульный принцип построения АСУТП цементного производства / Я. Е. Гельфанд, И. Н. Лукач // Цемент. – 1979. – № 3. – С. 16–18.

301. Новое направление в повышении энергетической эффективности цементного производства / М. А. Вердиян, В. Б. Хлусов, О. Е. Адаменко, В. Н. Третьяков // Цемент. – 1994. – № 5/6. – С. 27–29.

302. Эксергетические расчеты технических систем / Б. М. Бродянский, Г. П. Верхивнер, Я. Я. Карчев и др. – Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с.
303. Гельфанд Я. Е. Оперативная оптимизация приготовления и помола цементной шихты / Я. Е. Гельфанд, Л. М. Яковис, А. Е. Маслов // Цемент. – 1986. – № 7. – С. 15–17.
304. Новые принципы организации процессов приготовления и обжига комбинированной сырьевой смеси / М. А. Вердиян, В. Б. Хлусов, О. Е. Адаменко, В. Н. Третьяков // Цемент. – 1995. – № 2. – С. 20–23.
305. Яковис Л. М. Математическое моделирование процесса управления приготовлением сырьевой смеси / Л. М. Яковис // Управление, моделирование и оптимизация технологических процессов производства цемента: Тр. НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1976. – Вып. 35. – С. 69–75.
306. Шутов В. В. Совершенствование автоматизированной системы управления процессом приготовления сырьевой смеси / В. В. Шутов, А. В. Сафонов, В. А. Чурюмов // Цемент. – 1979. – № 5. – С. 13.
307. Левин Л. А. Математические предпосылки создания систем автоматического управления процессом приготовления цементно-сырьевой смеси / Л. А. Левин, А. З. Шхель // Тр. Южгипроцемента. – 1968. – Вып. X. – С. 5–28.
308. Бабищев Г. Н. Автоматизация процессов производства цемента / Г. Н. Бабищев, Я. Е. Гельфанд // Тр. V Всесоюз. науч.-техн. совещ. по химии и технологии цемента. – М.: Изд-во НИИЦемент. – С. 101–104.
309. Эксергетический анализ при снижении энергозатрат в производстве цемента / М. А. Вердиян, Д. А. Бобров, О. Е. Адаменко и др. // Цемент. – 1995. – № 5–6. – С. 35–44.
310. Исследование состава сырьевых шихт с учетом различных видов компонентов и изменений модульных характеристик шлама / А. В. Брыжик, Е. В. Текучева, В. М. Семенова и др. // Цемент и его применение. – 1999. – № 3. – С. 40–43.
311. Комплексная оценка свойств сырьевых компонентов / А. В. Брыжик, Е. В. Текучева, В. М. Семенова и др. // Цемент и его применение. – 1999. – № 5–6. – С. 42–46.
312. Графические методы и расчеты при оптимизации состава трехкомпонентных цементных сырьевых смесей / В. Б. Шифрин, Л. В. Белов, Г. Б. Егоров и др. // Химия и технология портландцемента: Тр. НИИЦемент. – М., 1977. – Вып. 37. – С. 11–20.
313. Баг Фам Куанг. Алгоритм расчета сырьевой смеси в условиях неопределенности исходной информации / Баг Фам Куанг, В. Л. Перов, А. Ф. Егоров // Тр. НИИЦемент. – М., 1976. – Вып. 95. – С. 285.
314. Ерошкин А. К. Использование ФСА для определения функциональной структуры АСУТП обжига клинкера / А. К. Ерошкин, З. В. Знайченко // Цемент. – 1989. – № 8. – С. 20–21.
315. Tat Y. Convergence of a single run simulation optimization algorithm / Y. Tat, S. Rajan // Proc. Amer. Contr. Conf., Atlanta, Ga, June 15–17, 1988. – Vol. 1. – Green Valley (Ariz.), 1988. – P. 440–444.
316. Чуд Г. Х. Системотехника / Г. Х. Чуд, Р. Э. Макол. – М.: Мир, 1962.
317. Трубаев П. А. Моделирование и оптимизация технологических процессов производства строительных материалов: Учебное пособие / П. А. Трубаев. – Белгород, 1999. – 178 с.

318. **Барский Л. А.** Критерии оптимизации разделительных процессов / Л. А. Барский, И. Н. Плаксин. – М.: Наука, 1967.
319. **Гофман Г. М.** Выбор критерия оптимизации процесса обжига / Г. М. Гофман, Н. А. Кулакова, А. Н. Люсов // Автоматизация производства цемента: Тр. НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1971. – Вып. 19. – С. 62–73.
320. **Васильев В. А.** Расчеты сырьевых смесей методом электронных таблиц для ведения технологических процессов и для АСУ / В. А. Васильев, В. В. Васильев // Вестн. ХГПУ. – Харьков, 2000. – Вып. 75. – С. 19–22.
321. **Сивков С. П.** Использование электронных таблиц Excel для расчета и оптимизации многокомпонентных сырьевых смесей при производстве специальных цементов / С. П. Сивков, В. Б. Игнатъев // Цемент. – 1999. – № 5. – С. 27–30.
322. **Коугия М. В.** Применение системы MathCad при технологических расчетах состава портландцементных сырьевых шихт / М. В. Коугия // Цемент. – 2001. – № 3. – С. 30–31.
323. **Зедгинидзе И. Г.** Тр. проблемной лаборатории АВТ / И. Г. Зедгинидзе, Н. В. Гогоберидзе. – Тбилиси, 1972. – 279 с.
324. Применение математических методов для исследования многокомпонентных смесей / Под ред. И. Г. Зедгинидзе и др. – М.: Metallurgy, 1974. – 176 с.
325. Synthesis of operating procedures for complete chemical plants. II. A nonlinear planning methodology / R. Lakshmanan, G. Stephanopoulos // Comput. and Chem. Eng, 1988. – № 9 – P. 1003–1021.
326. Использование ЭВМ при планировании и анализе экспериментов с целью получения геометрического сечения поверхности отклика / В. Т. Прохоров, В. А. Поголяев, Т. М. Осина и др. – Шахты, 1990. – 30 с.
327. **Насонин Г. А.** Методика сокращения объема эксперимента для многокомпонентных систем / Г. А. Насонин. – Киев, 1989. – 106 с.
328. **Кошкарров Ж. А.** Расчетно-экспериментальный метод исследования фазового комплекса Т-х диаграмм многокомпонентных систем с различными типами химических взаимодействий / Ж. А. Кошкарров, М. В. Мохосоев // 7 Всесоюз. совещ. по физ.-хим. анализу: Тез. докл., Фрунзе, 4–6 окт. 1988 г. – Фрунзе, 1988. – С. 60.
329. **Thompson W.** Response surface design for experiments with mixtures / W. Thompson, R. Myers // Technometrics. – 1968. – V. 10. – № 4. – P. 739–765.
330. **Murty G.** Design and analyses of experiments with mixtures / G. Murty, M. Das // Ann. Math. Statist. – 1968. – V. 39. – № 5. – P. 1517–1539.
331. **Шахова Л. Д.** Магнезиальные высокожелезистые цементы / Л. Д. Шахова, И. Г. Лугинина // Цемент. – 1986. – № 1. – С. 12–15.
332. Пат. 1802943 СССР, МКИ 6 С 04 В 7/38. Сырьевая смесь для получения саморассыпающегося шеннонит-магнезиоферритного клинкера / И. Г. Лугинина, Н. В. Литвишкова, Л. Д. Шахова и др; Белгородский технологический институт строительных материалов; № 4899219/33; Заявлено 3.01.91; Опубл. 20.08.96; Бюл. № 23.
333. Заявка № 95106047/03(010745). Сырьевая смесь для получения саморассыпающегося клинкера / И. Г. Лугинина, Н. В. Литвишкова. Положительное решение о выдаче патента РФ от 22.05.96.

334. **Кордюк Р. А.** Расчет равновесного фазового состава в пятикомпонентной системе $\text{CaO-MgO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ / Р. А. Кордюк // Сб. науч. тр. Укр. НИИОгнеупоры. – М.: Metallurgy, 1963. – С. 160–172.
335. **Бродянский В. М.** Эксергетический метод и его применение / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
336. **Сажин Б. С.** Эксергетические методы в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. – М.: Химия, 1992. – 208 с.
337. О влиянии состава портландцементных сырьевых смесей на обжигаемость и химический состав клинкера / А. Ф. Матвеев, Е. А. Сычева, И. В. Дерина, А. В. Черкасов // Энерго- и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: Сб. докл. науч. конф. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. – Ч. 1. – С. 212–215.
338. **Брыжик А. В.** Энергосберегающая технология производства портландцементного клинкера / А. В. Брыжик, Е. В. Текучева, В. М. Коновалов. // Энерго- и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: Сб. докл. науч. конф. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. – Ч. 1. – С. 67–70.
339. **Судакас Л. Г.** Проблемы низкоосновных клинкеров / Л. Г. Судакас // Цемент. – 1992. – № 2. – С. 65–70.

Научное издание

БЕСЕДИН Павел Васильевич

ТРУБАЕВ Павел Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИИ
ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**

Редактор Г. Н. Афонина

Изд. лиц. № 00434 от 10.11.99. Подписано в печать 26.04.04.
Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 24,41. Уч.-изд. л. 26,25. Тираж 500 экз.
Заказ Цена договорная

Отпечатано
в Белгородском государственном технологическом университете
им. В. Г. Шухова

308012, Белгород, ул. Костюкова, 46