

На правах рукописи

Торгунаков Владимир Григорьевич

**ТЕПЛОВОЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ВРАЩАЮЩИХСЯ
ОБЖИГОВЫХ ПЕЧЕЙ**

Специальность: 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной
среды веществ, материалов и изделий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск- 2006 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном научном учреждении
«Научно-исследовательский институт интроскопии» Томского политехнического
университета

Научный консультант:	д.т.н., профессор Вавилов Владимир Платонович
Официальные оппоненты:	д.т.н., профессор Воробьев Владимир Александрович д.т.н., профессор Кулешов Валерий Константинович д.ф.-м.н., профессор Старченко Александр Васильевич
Ведущая организация:	МНПО «СПЕКТР», г.Москва

Защита диссертации состоится 28 февраля 2006г. в 15.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «____» января 2006 г.

Ученый секретарь

Б.Б. Винокуров

диссертационного Совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационных исследований. В металлургии, целлюлозно-бумажной и цементной промышленности вращающиеся обжиговые печи являются ключевым видом промышленных установок. Печи предназначены для обжига сырьевых шихт и превращения их в полуфабрикат, например, в клинкер при производстве цемента. С точки зрения технической реализации, вращающиеся печи являются сложными агрегатами, представляющими собой одновременно физико-химический реактор и топочную камеру. Условием штатного функционирования печей является соблюдение технологических требований к тепловому режиму во внутреннем пространстве. В печах протекают взаимосвязанные механические, химические, газодинамические, тепловые и другие процессы. Большая мощность, крупные габариты, высокие температуры, вращение печи усложняют исследования перечисленных процессов в реальных производственных условиях.

В связи с утверждением в последние годы в Российской Федерации общемировой тенденции к контролю качества промышленной продукции и энергосбережению, промышленная практика в строительной индустрии начинает предъявлять повышенные требования к технологическому оборудованию, качеству сырьевых шихт, полуфабрикатов и конечных продуктов. Это требует разработки и внедрения автоматизированных систем, включающих как первичные датчики для контроля технологических режимов, так и исполнительные механизмы для управления производственными процессами. Применительно к обжиговым печам это означает необходимость многоточечного контроля температурных и механических процессов внутри и снаружи печи с возможностью их регулирования. С позиций неразрушающего контроля (НРК) качества в рамках описанной проблемы стоит задача снижения аварийности в работе печей, что связано со своевременным обнаружением и коррекцией дефектов в их тепловой защите.

Реализация вышеуказанных задач требует анализа тепловых процессов, исходящих как во внутреннем объеме печей, так и в их многослойном корпусе. С академической точки зрения, это означает необходимость, во-первых, разрабаты-

вать алгоритмы сбора и обработки информации в автоматизированных системах контроля вращающихся печей, а, во-вторых, решать обратные краевые задачи теплового неразрушающего контроля с учетом специфики конкретных объектов испытаний и условий их функционирования.

Таким образом, факторами актуальности выполненных диссертационных исследований являются: 1) общемировая тенденция к контролю качества промышленной продукции и сбережению энерго- и материальных ресурсов; 2) необходимость разработки эффективных алгоритмов управления технологическими режимами обжиговых печей; 3) необходимость разработки алгоритмов решения обратных задач теплового неразрушающего контроля для идентификации и корректировки скрытых дефектов; 4) необходимость создания автоматизированных систем контроля технологических режимов и обнаружения дефектов во вращающихся обжиговых печах, которые бы реализовали компромисс между техническими требованиями и приемлемой для современного производства стоимостью.

Актуальность работы подтверждена включением ее в соответствующие научно-технические программы (инновационную программу «Датчики» Госкомвуза РФ, 1993-1997 гг.; программу НИР и ОКР АО «Концерн Цемент», 1995-1996 гг.; программу НИР «Исследования и разработка аппаратуры теплового неразрушающего контроля многослойных оболочек энергопотребляющих объектов промышленности» по единому заказу-наряду Минобразования РФ, 1996-1999гг.); а также актами внедрения на 8-ми предприятиях Российской Федерации, в которых использованы результаты исследований.

Цель диссертационных исследований. Решение научных и практических задач технической диагностики технологических режимов вращающихся обжиговых печей, включая создание и промышленное внедрение автоматизированных систем теплового неразрушающего контроля технических параметров и скрытых дефектов указанных объектов.

Задачи диссертационных исследований:

- разработка модели тепловых и механических процессов, происходящих во вращающихся обжигowych печах, на базе решения трехмерной задачи нестационарного теплообмена;
- создание методики теплового неразрушающего контроля многослойной теплозащиты вращающихся печей на основе моделирования;
- разработка алгоритмов обнаружения и методики расчета параметров дефектов теплозащиты печи на фоне помех, обусловленных неоднородной поверхностью объекта контроля и изменениями свойств окружающей среды;
- разработка методики управления тепловым режимом обжигowych печей по результатам температурных измерений, включая корректирующие действия по снижению тепловой нагрузки на печь в дефектных зонах и восстановлению дефектов обмазки;
- исследование влияния параметров обжигowych печей и метеорологической ситуации на результаты теплового контроля и выработка требований к техническим характеристикам аппаратуры и программному обеспечению;
- создание информационных моделей ИК изображений исследуемых поверхностей для снижения психофизической избыточности экспериментальных данных, повышения достоверности и наглядности результатов контроля;
- разработка принципов построения автоматизированных строчно-сканирующих ИК систем для контроля теплового состояния и диагностики корпусов вращающихся обжигowych печей с учетом теплофизических характеристик материалов корпуса, оптических свойств внешней поверхности и условий теплообмена с окружающей средой;
- разработка программных комплексов, реализующих предложенные модели, методы и алгоритмы, для экспериментального исследования процессов в печах и применения в практических системах контроля;
- производство и мелкосерийный выпуск указанных автоматизированных систем контроля, их внедрение на предприятиях РФ.

Методы исследования. В качестве теоретической базы для решения рассматриваемых задач использован математический аппарат и специальные программы математического и статистического анализа. При разработке модели тепловых и механических процессов, происходящих во вращающейся обжиговой печи, применены методы решения уравнений математической физики, в частности, конечно-разностные методы расщепления. При проведении экспериментальных исследований использован импульсный метод определения теплофизических характеристик материалов (метод Паркера), метод статистического моделирования (метод Монте-Карло). При разработке аппаратных средств применены методы анализа и построения оптико-электронных систем.

На защиту выносятся следующие положения:

- анализ и оптимизация теплового режима работы вращающихся обжиговых печей, а также обнаружение скрытых дефектов, требуют, помимо сплошного измерения температуры наружной поверхности, моделировать тепловые и технологические процессы в печи на основе решения прямой трехмерной задачи нестационарного теплообмена и механического перемещения обжигаемого материала в печи;
- моделирование работы вращающейся обжиговой печи, представляющей собой сложную техническую систему, рекомендуется проводить путем разбиения данного объекта на множество ячеек Дирихле в трехмерных цилиндрических координатах, для каждой из которых используется метод расщепления совокупности взаимосвязанных параллельно-протекающих процессов на ряд простых последовательных процессов;
- оптимизация технологических процессов в печи и повышение качества продукции обеспечиваются решением прямой задачи тепло- и массообмена с учетом параметров функционирования обжиговых печей (температуры, формы и положения факела, теплозащитных свойств футеровки и обмазки, внешних условий);

- разработку и уточнение алгоритмов идентификации дефектов внутренней поверхности печи при наличии помех необходимо проводить на основании модельных исследований различных режимов работы печи, а также помех, обусловленных неоднородной поверхностью объекта контроля и флуктуациями свойств окружающей среды; решение обратной задачи теплопередачи на основе одномерной нестационарной модели для идентификации внутренних дефектов корпуса печи позволяет достичь компромисса между объемом вычислений и допустимой погрешностью определения толщины обмазки;

- применение активного теплового контроля, заключающегося в стимуляции наружной поверхности печи орошением водой и обдувом воздухом, позволяет повысить достоверность контроля внутренних дефектов; в частности, при орошении водой, тепловой контраст между дефектной и бездефектной зонами увеличивается в 1,5 раза;

- автоматизированные системы теплового контроля вращающихся печей целесообразно строить на базе линейных ИК сканеров, которые, помимо регистрации температурных распределений, связанных с дефектами теплозащитного слоя и технологическими параметрами печей, должны дополнительно контролировать: температуру обжигаемого материала и время обжига, угловую скорость вращения печи, число оборотов печи за смену, потери тепла через корпус, осевое смещение печи, а также осуществлять корректирующие воздействия по снижению тепловой нагрузки на печь в дефектных зонах и восстановлению дефектов обмазки.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- Разработана математическая модель вращающейся обжиговой печи, которая позволяет проводить трехмерное моделирование взаимосвязанных тепловых и механических процессов в печи и получать пространственные зависимости температуры от времени, параметров печи, характеристик внутренних дефектов, а также изменяющейся метеорологической обстановки. Существенным моментом данной модели является представление объекта исследований в виде совокупно-

сти ячеек малого размера (ячеек Дирихле с границами, соответствующими поверхностям равного влияния узлов пространственной сетки). Адекватность предложенной модели подтверждена численными экспериментами, натурными исследованиями, а также сравнением с результатами работ других авторов. Суммарная погрешность моделирования при рекомендованных шагах расчета по времени и пространству не превышает 8°C . Результаты моделирования использованы для оптимизации теплового режима работы печи, а именно, для оценки температуры в обжигаемом материале, в тепловой защите корпуса печи, а также для активного воздействия на опасные дефекты.

- Решена одномерная нестационарная обратная задача теплообмена в обжиговой печи, в результате чего предложен алгоритм оценки параметров внутренних дефектов. Идентификация дефектов в корпусе печи требует задания входных параметров (теплофизических свойств материалов и параметров окружающей среды) с точностью не хуже 10%. Ошибка определения температуры на наружной поверхности печи на уровне 10°C ведет к ошибке определения толщины обмазки в зоне дефекта около 1 см.

- Проанализированы источники помех, воздействующих на входной сигнал инфракрасных (ИК) систем теплового контроля (скол грязевой корки, флуктуации скорости ветра, флуктуации степени черноты внешней поверхности, суточные колебания температуры окружающей среды, флуктуации солнечного излучения и флуктуации интенсивности выпадения осадков), в результате чего определен вклад каждого источника, а их суммарное воздействие оценено средней амплитудой 35°C . Предложены физические способы учета указанных помех, позволившие снизить суммарный вклад помех до среднего уровня 20°C , что эквивалентно погрешности идентификации глубины дефектов в обжиговых печах - 2 см.

- Экспериментально исследованы пространственно-частотные спектры основных помех и установлено, что, например, в зоне кальцинирования пространственные частоты сосредоточены в интервале от 0,077 до $1,54\text{ см}^{-1}$. Амплитудные

оценки помех использованы для определения порога амплитудной фильтрации температурных сигналов и построения карт дефектов.

- Разработан алгоритм осуществления корректирующих воздействий для ликвидации дефектов обмазки в корпусе обжиговой печи с использованием предложенной математической модели.

- Применен принцип активного теплового контроля для повышения достоверности обнаружения и идентификации дефектов в обжиговых печах с использованием различных видов стимулирующих воздействий на внешнюю поверхность печи: естественное изменение метеорологических условий, орошение водой, обдув воздухом, воздействие воздушно-водяной эмульсией.

- Предложены информационные модели ИК изображений различных технологических зон печи, позволяющие повысить наглядность и оперативность контроля.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

- Разработана структура автоматизированных систем теплового контроля параметров вращающихся обжиговых печей, которая, в отличие от известных систем, наряду с регистрацией температурного поля поверхности печей, реализует принципы дефектометрии и активного воздействия на обнаруженные дефекты.

- Предложена методология корректировки дефектов в обмазке теплозащиты вращающихся печей по результатам контроля путем изменения формы факела, орошения водой и обдува воздухом.

- Результаты математического моделирования тепловых процессов в обжиговых печах с внутренними дефектами реализованы в компьютерных программах «Обжиг», и «Обжиг R-ф-Z» для лабораторных исследований.

- Алгоритмы моделирования, обработки и отображения экспериментальных данных, разработанные для ИК систем контроля, воплощены в специализированном программном обеспечении (последняя версия – программа «Термоинспектор 3-09»), позволяющем осуществлять автоматизированный сбор данных, представлять информацию в удобной для оператора форме в реальном масштабе времени,

осуществлять активное воздействие на параметры печей и архивировать результаты контроля в виде термограмм и карт дефектности.

- Разработаны технические условия ЖТАБ 2.820.000 ТУ на ИК систему автоматизированного контроля температуры поверхности печи обжига клинкера.

- Разработано несколько поколений ИК систем контроля обжиговых печей: «ИКСА-01», «ИКСА-02», «ИКСА-03», «ИКСА-04», «ИНТРОКОН-04», «ИНТРОКОН-05», «ИНТРОКОН-06»; на предприятиях РФ (ОАО «Мальцовский портландцемент», ОАО «Воскресенский цемент», ОАО «Катавцемент», ОАО «Искитимцемент», ОАО «Топкинский цемент», ОАО «Кокс», ОАО «Яшкинский цементный завод», ОАО «Ангарский цементный завод») внедрено 44 установки с годовым экономическим эффектом около 0,4 млн. руб. на систему контроля.

- Материалы диссертации применены в научно-исследовательских работах, проводимых в НИИ интроскопии, г.Томск; научные результаты, разработанные линейные сканеры и программный продукт использованы при выполнении дипломных и магистерских работ в Томском политехническом университете и Томском университете систем управления и радиоэлектроники.

Апробация работы. Основные положения диссертации и содержание отдельных разделов докладывались и обсуждались на 15-и отечественных и 7-и международных конференциях, симпозиумах и семинарах, в том числе: «Обработка изображений и дистанционные исследования» (Россия, 1984г, 1987г, 1990г), «Конверсия в приборостроении» (Россия, 1994г), «Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами» (Россия, 1997г), «Оптические, радиоволновые, тепловые методы и средства контроля природной среды, материалов и промышленных изделий» (Россия, 1997г), 7-й Европейской конф. по НРК (Дания, 1998г), «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике» (Белоруссия, 1998г), «Quantitative infrared thermography - QIRT» (Франция, 1998г, Польша, 2000г), KORUS-99 (Россия, 1999г), «AeroSense» (США, 2003г, 2004г), «Неразрушающий контроль и диагностика» (Россия, 1999г, 2005г).

Публикации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 43 печатные работы, получено 6 авторских свидетельств.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений, основная часть изложена на 409 страницах, содержит 150 рисунков, 20 таблиц и список литературы из 288 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследований, дана общая характеристика проблемы контроля вращающихся печей для получения детальной информации о технологических процессах и целостности корпусов тепловых агрегатов, определены цели, обозначены направления исследований и основные задачи, решаемые в диссертации.

В **1-й главе** рассмотрены конструктивные, геометрические и энергетические параметры существующих печных агрегатов, происходящие в них механические и физические процессы, выполнен обзор работ, посвященных исследованиям тепловых и других процессов в обжиговых печах, предложена классификация дефектов и контролируемых параметров, проанализированы применяемые методы

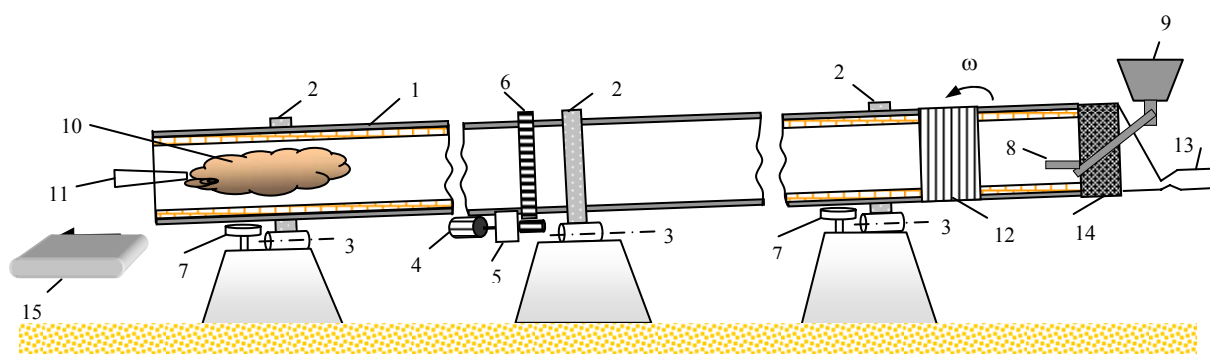


Рис. 1. Схема вращающейся обжиговой печи:

1 – цилиндрический корпус; 2 – бандажи; 3 – опорные ролики; 4 – электродвигатель; 5 – редуктор; 6 – венцовая шестерня; 7 – упорный ролик; 8 – питатель печи; 9 – дозатор; 10 – топливный факел; 11 – горелка; 12 – теплообменное устройство; 13 – дымосос; 14 – фильтр; 15 – холодильник

и средства контроля и пути их совершенствования. Обобщенная схема вращающейся печи приведена на рис.1. Вследствие углового вращения и наклонного расположения корпуса печи, загруженный в нее материал движется от верхнего (холодного) конца к нижнему (горячему). Продукты сгорания топлива (печные газы) перемещаются навстречу движущемуся шламу к холодному концу печи, нагревая обжигаемый материал и внутреннюю поверхность печи. Продукт обжига выгружается через головку печи и поступает на холодильник, где его тепло используется для подогрева воздуха, применяемого при горении топлива.

В современных вращающихся печах процесса обжига продолжается 4-5 часов и складывается из физических процессов испарения влаги, подогрева материала, периода распада первичных продуктов, периода новообразований и периода охлаждения полученного клинкера. Вращающиеся печи характеризуются большим числом конструктивно-технологических параметров. Наиболее важные из них: *уклон печи, частота вращения, степень заполнения, скорость прохождения материала* через вращающуюся печь, *производительность печи*.

С точки зрения моделирования тепловых процессов, обжиговую печь можно представить в виде двухслойной системы (рис. 2): стальная оболочка - огнеупорная футеровка. В области высоких температур, обеспечивающих появление в обжигаемом материале жидкой фазы, на поверхности футеровки образуется третий слой - *теплозащитная обмазка* (гарнисаж, настыли). Обмазка образуется за счет припекания вязкой фракции обжигаемого материала к поверхности футеровочного слоя и играет важную роль в эксплуатации печи, защищая футеровку от химического, термического и механического воздействия со стороны топочных газов и обжигаемого материала. На образование, устойчивость, разрушение защитной обмазки и долговечность кирпичного футеровочного слоя влияет комплекс обусловленных технологическим процессом взаимосвязанных факторов, основным и важнейшим из которых является температура и её распределение.

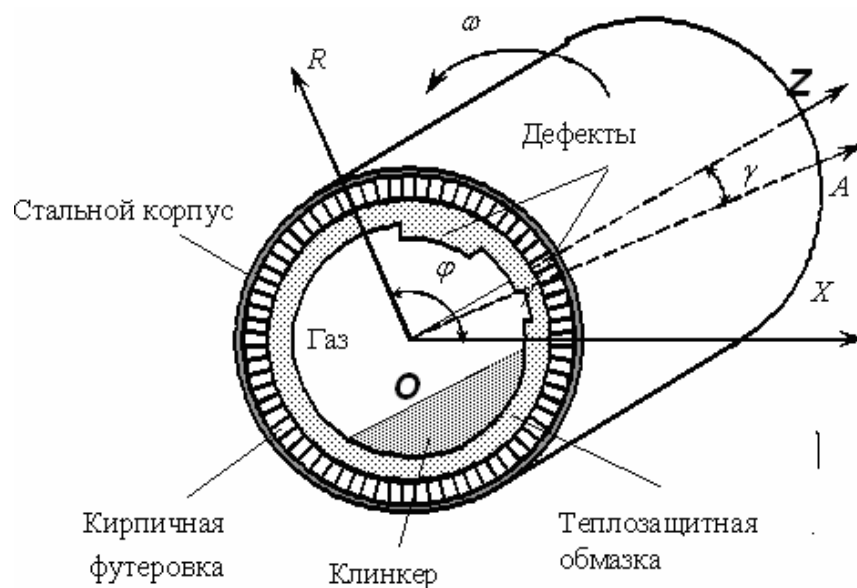


Рис. 2. Вращающаяся печь в разрезе (R - φ - Z геометрия)

Одним из широко применяемых на практике методов исследования сложных систем является метод моделирования. Из применяемых моделей можно выделить следующие типы: физические (механические) и математические (аналитические и компьютерные).

Физические модели разрабатывают для изучения протекающих в печи процессов, чтобы (на основе полученных знаний) улучшить качество проектирования печей, выбрать оптимальные режимы сжигания топлива, а также, выработать требования к условиям формирования устойчивой обмазки и стабилизации технологического режима работы печей. Тем не менее, следует отметить, что физическое моделирование не позволяет проводить детальные полномасштабные натурные эксперименты с целью оптимизации параметров, как самой печи, так и аппаратуры контроля. Это объясняется слишком большой стоимостью экспериментальных моделей, а также затрудненностью экспериментов, выходящих даже незначительно за рамки штатного функционирования печей.

Указанные трудности удастся преодолеть при использовании математического моделирования, также применяемого для исследования вращающихся печей. Известны математические модели и алгоритмы для определения толщины теплозащитной обмазки путем измерения температуры внешней поверхности и вычисления радиуса внутренней поверхности печи (их обзор приведен в тексте дис-

сертации). Эти модели незначительно различаются в деталях и позволяют производить расчеты при заданных температурах окружающей среды и внутренней поверхности. При этом предполагается стационарное протекание тепловых потоков от центра к внешней поверхности печи.

Существуют компьютерные модели и программы для расчета и анализа тепловых процессов в печи, управления работой печи. Например, в Государственной технологической академии строительных материалов (г. Белгород) разработана программа «Эксперт» для анализа работы и управления вращающимися печами. Трехмерная модель тепловых процессов цементной печи используется канадской фирмой «Лафарж» для определения температуры и состава топочных газов, тепловых потерь через корпус печи, распределения температуры на внутренней поверхности по длине печи и т.п.

В процессе анализа научно-технической литературы не найдены трехмерные модели, охватывающие во взаимосвязи основные процессы, протекающие в печи, включая вращение, перемещение обжигаемого материала, лучистый теплообмен между топочными газами, обжигаемым материалом и внутренней стенкой, теплопередачу внутри многослойной оболочки корпуса, теплообмен с внешней средой. Разработка такой модели, ориентированной на дефектометрию внутреннего слоя печи, выполнена в настоящих исследованиях.

Дефекты внутренних слоев обжиговых печей предложено классифицировать следующим образом:

- опасные дефекты обмазки – значительные выбоины (сколы) в слое обмазки;
- неопасные дефекты обмазки – незначительные выбоины (сколы),
- дефекты – выпуклости (настыли) в слое обмазки;
- дефекты футеровки.

Опасными следует считать дефекты (обрушения) футеровки, ликвидация которых может потребовать остановки печи. Дефекты обмазки представляют опасность, если их глубина превышает половину толщины обмазки в цельных областях, а поперечные размеры больше 5% от линейных размеров внутренней окруж-

ности печи. Настыли вредны тем, что изменяют скорость перемещения обжигаемого материала.

1-я глава диссертации завершается кратким историческим очерком ИК термографии и устройств бесконтактного измерения температуры. Приведен обзор отечественных и зарубежных тепловизоров, описаны строчно-сканирующие системы, в частности, разработанные в рамках данных исследований. Показана целесообразность разработки специализированных систем теплового контроля таких специфических объектов, как вращающиеся обжиговые печи.

Во **2-й главе** описана разработанная трехмерная математическая модель тепловых процессов в обжиговых трубных печах, а также приводятся результаты ее исследований. На основе анализа схемы теплового взаимодействия элементов печи составлен перечень процессов, которые необходимо учесть при разработке математической модели: тепловые процессы, происходящие во время сжигания топлива; теплообмен между топочными газами, обжигаемым материалом и внутренней поверхностью корпуса печи; теплообмен внутри клинкера, обусловленный механическим перемещением материала и теплопроводностью; теплообмен между клинкером и внутренней поверхностью корпуса печи; теплообмен внутри многослойного корпуса – в обмазке, футеровке и кожухе; теплообмен между кожухом и окружающей средой. Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на форму и размер факела. Основной упор сделан на анализ процессов теплопереноса, оказывающих влияние на температурное поле поверхности вращающейся печи.

Предложенная математическая модель выражена: 1) графическим представлением печи (см. рис. 3); 2) совокупностью уравнений, представляющих собой краевую задачу трехмерной теплопроводности в цилиндрической системе координат; 3) методом решения данной задачи, сформулированной в виде совокупности уравнений теплового баланса для ячеек Дирихле (рис. 4); 4) конкретными результатами решения.

Совокупность начальных и граничных условий на наружной и внутренней поверхности корпуса печи, рассмотрены в тексте диссертации и опущены в авто-

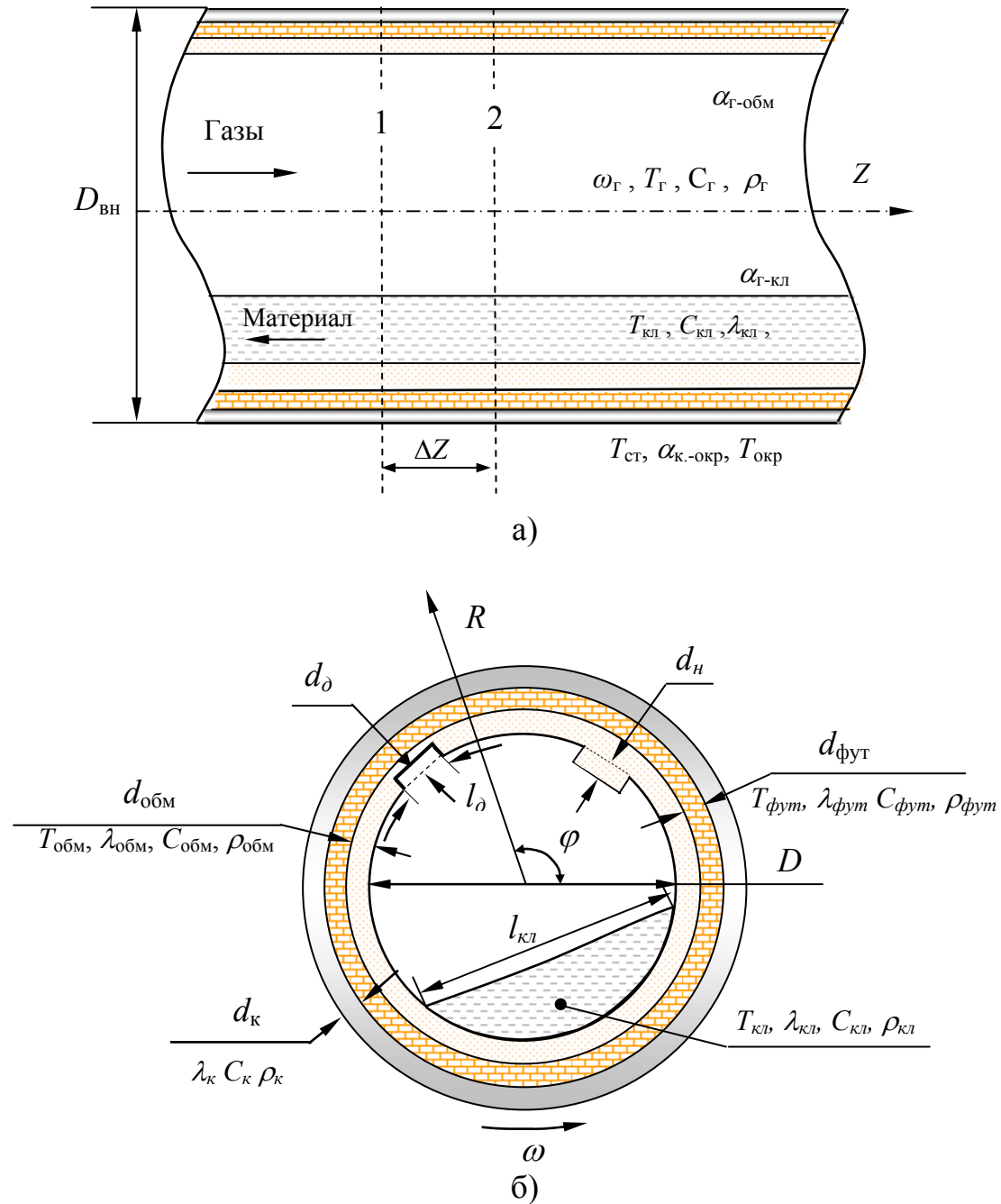


Рис. 3. Схема теплообмена во вращающейся печи
(а – осевое сечение, б – радиальное сечение печи)

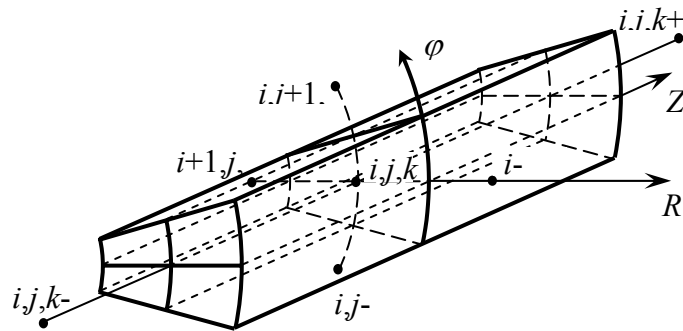


Рис. 4. Ячейка Дирихле для узла i, j, k

реферате. Например, граничное условие на *внешней* поверхности записывается в известном виде:

$$\lambda_{\kappa} \cdot \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial r} = -\alpha_{\text{корп-окр}} \cdot (T_{\kappa} - T_{\text{окр}}), \quad (2)$$

где λ_{κ} – коэффициент теплопроводности стальной оболочки корпуса; T_{κ} – температура внешней поверхности корпуса; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, $\alpha_{\text{корп-окр}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи между корпусом печи и окружающей средой, учитывающий лучеиспускание и конвекцию.

Граничное условие на *внутренней* поверхности печи можно записать как:

$$\alpha_{z-\text{обм}} \cdot (T_z - \overline{T_{\text{обм}}}) \cdot \frac{l_{\text{обм}}}{\pi \cdot D} - \alpha_{\text{обм-кл}} \cdot (\overline{T^3_{\text{обм}}} - \overline{T^3_{\text{кл}}}) \cdot \frac{\pi \cdot D - l_{\text{обм}}}{\pi \cdot D} = -\lambda_{\text{обм}} \cdot \frac{\partial T_{\text{обм}}}{\partial n}, \quad (3)$$

где $\alpha_{z-\text{обм}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи между газом и обмазкой, учитывающий лучеиспускание и конвекцию; T_z – температура газа в точке z ; $\overline{T_{\text{обм}}}$ – температура обмазки, усредненная по длине окружности, не закрываемой клинкером; $l_{\text{обм}}$ – длина окружности печи, не закрываемая клинкером; D – внутренний диаметр печи, $\alpha_{\text{обм-кл}}$ – конвективный коэффициент теплоотдачи между обмазкой и клинкером; $\overline{T^3_{\text{обм}}}$ – температура обмазки, усредненная по длине окружности, закрываемой клинкером; $\overline{T^3_{\text{кл}}}$ – средняя температура клинкера в зоне контакта с обмазкой, $\lambda_{\text{обм}}$ – коэффициент теплопроводности обмазки, n – нормаль к внутренней поверхности.

В рамках модели принято, что пространство корпуса печи состоит из множества ячеек, в каждой из которых выполняются базовые уравнения теплообмена. Для получения элементарных ячеек применена пространственная сетка с узлами (R_i, φ_j, Z_k) , $i = 0, \dots, N_R$, $j = 0, \dots, N_{\varphi}$, $k = 0, \dots, N_Z$. Вокруг каждого узла проведены поверхности равного влияния узлов. Ячейки, полученные таким способом, называются *ячейками Дирихле* (рис. 3). Внешний цилиндрический слой узлов расположен на внешней границе печи. Каждый переход от одного слоя к другому совпадает с одним из координатных слоев.

Предложенная модель основана на решении уравнений теплового баланса, записанных для ячеек Дирихле вдоль каждой координаты. Для ячеек Дирихле, расположенных в корпусе вдоль радиуса и не граничащих с газовой средой, уравнение теплового баланса записывается в виде:

$$\begin{aligned} & (C\rho_{i-\frac{1}{2},j,k} V_{i-\frac{1}{2},j,k} + C\rho_{i+\frac{1}{2},j,k} V_{i+\frac{1}{2},j,k}) \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta t} = \\ & = \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i-1,j,k}^{n+1}}{l_i} S_{i-\frac{1}{2}} + \lambda_{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i+1,j,k}^{n+1}}{l_{i+1}} S_{i+\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $C\rho_{i-\frac{1}{2},j,k}$ – произведение плотности на теплоемкость для той половины ячейки Дирихле, которая расположена между радиусами R_i и $\frac{R_i + R_{i-1}}{2}$ (радиальное расстояние между узлами может изменяться от слоя к слою); $C\rho_{i+\frac{1}{2},j,k}$ – произведение плотности на теплоемкость для той половины ячейки Дирихле, которая расположена между радиусами R_i и $\frac{R_i + R_{i+1}}{2}$; $V_{i-\frac{1}{2},j,k}, V_{i+\frac{1}{2},j,k}$ – объемы вышеописанных половин ячейки Дирихле; $\lambda_{i-\frac{1}{2},j,k}, \lambda_{i+\frac{1}{2},j,k}$ – коэффициенты теплопроводности для обеих половин ячейки; $S_{i-\frac{1}{2}}, S_{i+\frac{1}{2}}$ – площади теплообмена между ячейкой i, j, k и соседними ячейками $i-1, j, k$ и $i+1, j, k$ соответственно; $T_{i,j,k}^{n+1}, T_{i,j,k}^n$ – температуры в ячейке Дирихле в последующем и текущем временных слоях; $l_i = R_i - R_{i-1}$ – расстояние между центрами ячеек Дирихле по радиусу; Δt – промежуток времени между двумя соседними временными слоями. В случае, когда в ячейке Дирихле проходит граница между зонами с различными теплофизическими свойствами, левая и правая части уравнения (4) разбиваются на соответствующее число слагаемых. Данное замечание справедливо при рассмотрении теплопередачи вдоль оси Z и по координате φ . Подобным образом можно моделировать дефекты в корпусе печи.

Аналогично записываются уравнения теплового баланса для процессов теплопередачи вдоль координаты Z и по угловой координате φ . Полученные выраже-

ния представляет собой систему линейных уравнений. Матрица системы имеет диагональное преобладание. Для решения систем уравнений в работе применен метод прогонки.

Основные расчеты выполнены для следующих исходных данных: внешний диаметр печи 4,5 м; степень заполнения печи 4-18%; частота вращения печи 0,5-2,0 об/мин; угол наклона печи 1-3 град; температура окружающей среды 20,0 °С. Параметры слоев печи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры конструкционных материалов (слоев) печи

№ слоя	Наименование	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температуропроводность, м ² /с	Толщина, м	Число шагов вдоль радиуса
1	Стальной корпус	$\lambda_{\kappa}=38,0$	$a_{\kappa}=7,39 \cdot 10^{-6}$	$d_{\kappa}=0,05$	10
2	Футеровка	$\lambda_{фут}=0,4-3,2$	$a_{фут}=8,2 \cdot 10^{-7}$	$d_{фут}=0,23$	20
3	Обмазка	$\lambda_{обм}=0,4-2,3$	$a_{обм}=2,97 \cdot 10^{-7}$	$d_{обм}=0,15$	15

Параметры клинкера: коэффициент теплопроводности $\lambda_{кл} = 0,4-2,0$ Вт/(м·К); коэффициент температуропроводности $a_{кл} = 2,97 \cdot 10^{-7}$ м²/с; угол скатывания клинкера 40°; температура на входе в зону спекания 1100°С-1400°С.

Сравнительные исследования результатов численного моделирования переходных процессов в цементной печи показали, что математическая модель обладает свойством аппроксимации и устойчивости. Суммарная погрешность моделирования при временном шаге 10000 с и пространственном шаге 0,125 м не превысила 8°С, что позволило сделать вывод об адекватности модели.

В рамках предложенной модели были рассчитаны профили температур на внешней поверхности для дефектов различной глубины и фиксированной протяженности и определена расчетная зависимость температуры внешней поверхности печи от глубины дефектов (рис. 5). Полученные калибровочные кривые позволяют определять глубину дефекта с погрешностью не более 1 см при измерении температуры внешней поверхности с погрешностью не хуже 10°С.

При разработке математической модели наибольшие трудности представлял учет влияния клинкера на теплообмен внутри корпуса печи, а также учет теплообмена корпуса печи с топочными газами. Было проанализировано влияние температуры топочных газов на температуру внутренней поверхности печи (рис. 6).

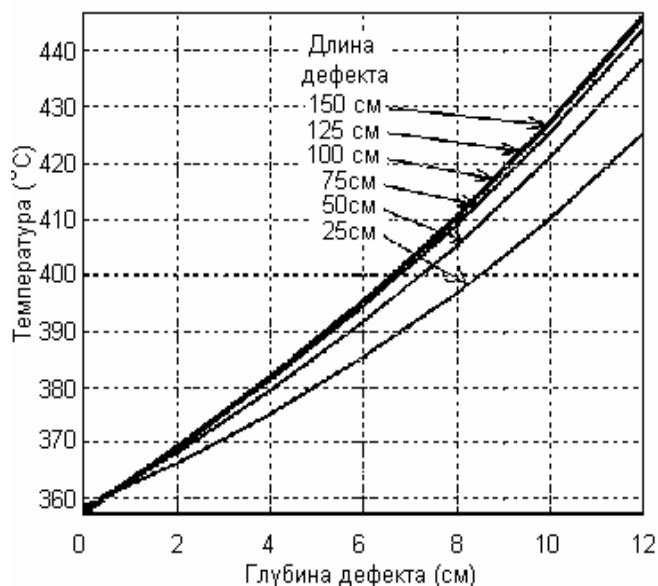


Рис. 5. Зависимость температуры внешней поверхности в зоне дефекта от его глубины

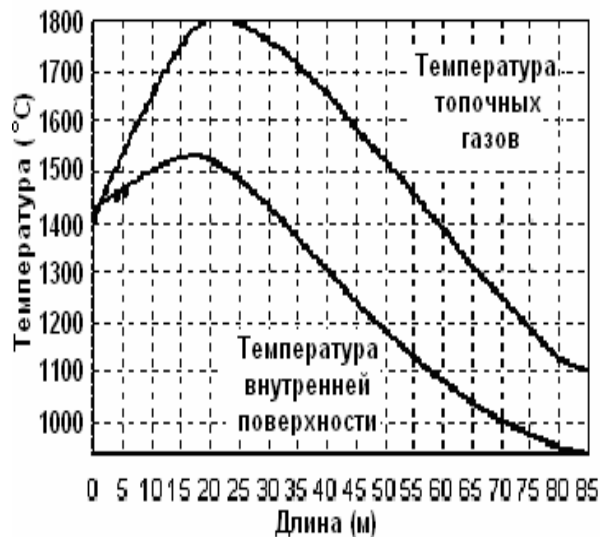


Рис. 6. Распределение температуры на внутренней поверхности печи

Очевидно, что основной перепад температуры от газов к окружающей среде происходит в слоях обмазки и кирпичной футеровки (см. рис.7, рис.8). Данный количественный результат объясняет зависимость температуры внешней поверхности от температуры клинкера, коэффициента теплообмена на внутренней стенке, частоты вращения печи и степени ее заполнения. Вариация указанных факторов приводит к изменениям наружной температуры не более, чем на несколько градусов.

Полученные результаты позволяют упростить математическую модель тепловых процессов печи путем разбиения ее на две подсистемы:

- подсистема 1, содержащая топочные газы и клинкер,
- подсистема 2, включающая процессы в корпусе печи.

Между собой подсистемы взаимодействуют однонаправлено — через теплопередачу от топочных газов к корпусу. Схема тепловых процессов в упрощенной

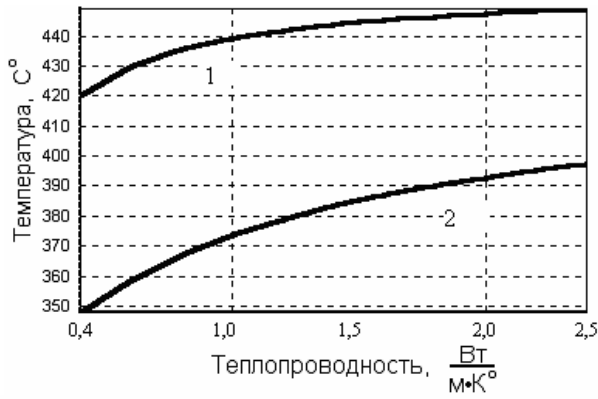


Рис. 7. Влияние коэффициента теплопроводности обмазки на температуру внешней поверхности в дефектной (1) и цельной (2) областях ($d_k=5$ см, $d_{фут}=23$ см, $\lambda_{фут}=1,7$ Вт/(м·К), $d_{обм}=15$ см, $d_\delta=12$ см, $l_\delta=125$ см)

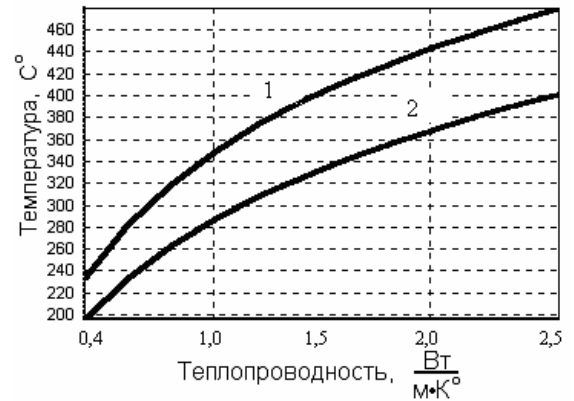


Рис. 8. Влияние коэффициента теплопроводности футеровки на температуру внешней поверхности в дефектной (1) и цельной (2) областях ($d_k=5$ см, $d_{фут}=23$ см, $d_{обм}=15$ см, $\lambda_{обм}=0,4$ Вт/(м·К), $d_\delta=12$ см, $l_\delta=100$ см)

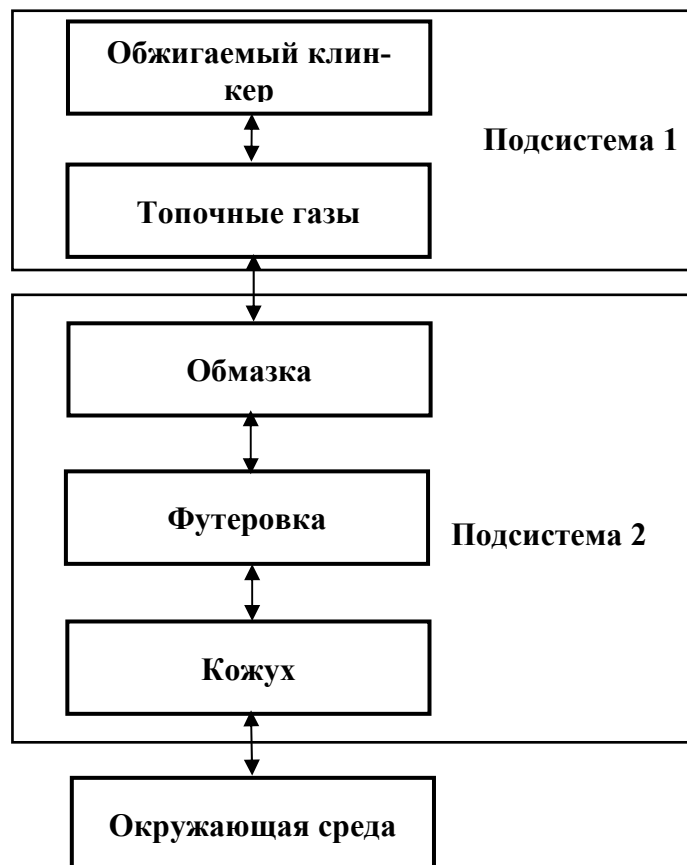


Рис. 9. Модифицирование модели тепловых процессов во вращающейся печи после численного расчета температурных полей

модели изображена на рис. 9. Подсистема 1 необходима для расчета распределения температуры топочных газов, которое используется в подсистеме 2 как исходное.

На рис. 10 показано влияние толщины футеровки на температуру внешней поверхности печи. Видно, что при износе футеровки с 24 до 10 см температура в бездефектной зоне возрастает на 60°C . Очевидно, что для адекватной идентификации толщины обмазки необходимо определять толщину футеровки с погрешностью не хуже 2 см.

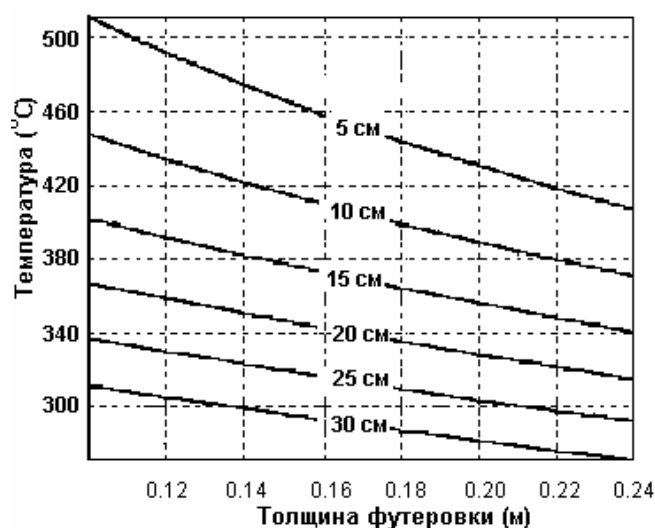


Рис. 10. Влияние толщины футеровки в зоне спекания на температуру внешней поверхности печи при различных толщинах обмазки

Рассмотрено также влияние степени черноты внешней поверхности на ее температуру и воздействие следующих параметров окружающей среды:

- температуры;
- скорости ветра;
- наличия осадков в виде дождя;
- степени черноты воздуха.

Изменения температуры внешней поверхности печи, вызванные межсезонным изменением температуры окружающей среды, значительны, однако, этот параметр можно измерять с высокой точностью.

Влияние скорости ветра учитывалось при расчете коэффициента конвективной теплоотдачи. Показано, что увеличение скорости ветра на 1 м/с приводит в

конце нестационарного процесса к уменьшению температуры на 30°C . Сделан вывод о том, что скорость ветра следует определять с погрешностью не хуже $0,5$ м/с.

Зависимость от интенсивности орошения (см. рис.11) во время выпадения осадков в виде дождя учитывалось при расчете введением дополнительного «отрицательного» источника тепла, которое расходуется на нагрев воды от температуры окружающей среды до $+100^{\circ}\text{C}$ и последующего ее испарения. При малых интенсивностях орошения этот параметр следует измерять с погрешностью $0,25$ г/(м²·с), а при больших – с погрешностью $0,15$ г/(м²·с).

Наряду с трехмерной моделью была предложена *упрощенная одномерная* модель печи. Сравнение температурных профилей на поверхности печи, полученных в рамках одно- и трехмерной модели, показывает, что значимые различия наблюдаются только в переходных зонах, так как в одномерной модели не учитывается теплопередача по Z -координате. Поскольку в тепловом контроле оперируют с температурами в центрах дефектных зон, то одномерные модели часто ис-

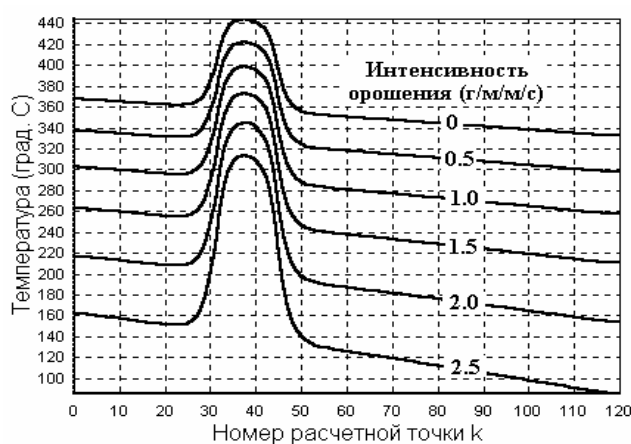


Рис. 11. Влияние интенсивности орошения на температуру наружной поверхности печи ($T_{окр}=25^{\circ}\text{C}$, $T_в=25^{\circ}\text{C}$, $d_k=5$ см, $d_{фут}=23$ см, $d_{обм}=15$ см, $d_о=12$ см, $l_о=175$ см)

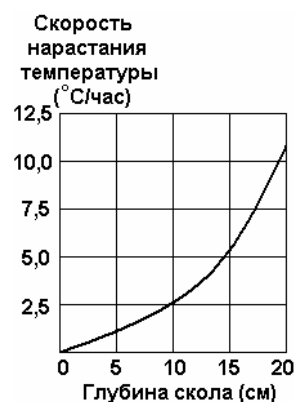


Рис. 12. Зависимость скорости нарастания температуры внешней поверхности печи от глубины скола обмазки ($d_{фут}=23$ см, $d_{обм}=24$ см)

пользуют для решения задачи *идентификации* параметров дефектов, или *обратной задачи* теплового контроля (*дефектометрии*). В настоящем исследовании для этой цели применен метод дихотомии, причем искомым параметром является внутренний радиус корпуса печи. В среднем погрешность оценки глубины опас-

ных дефектов не превосходит 1 см. Величина погрешности возрастает для дефектов малой длины ($l_d < 0,5$ м). Итогом численного анализа является вывод о достаточной адекватности модели, реализующей упрощенную постановку обратной задачи для целей идентификации опасных дефектов внутренней поверхности печи.

В 3-й главе диссертации рассмотрены различные факторы (помехи), сопровождающие тепловой контроль наружной поверхности вращающихся обжиговых печей, на основе чего сформулированы требования к аппаратуре и программному обеспечению.

Источниками помех (шумов) являются:

- изменение коэффициента излучения внешней поверхности вследствие образования окалины, образования и скола грязевой корки, а также других причин;
- влияние солнечного излучения на результаты тепловизионных измерений вследствие дополнительного нагрева объекта контроля и переотражений;
- кратковременные тепловые воздействия со стороны внешней среды (суточные колебания температуры окружающей среды, кратковременные осадки, облачность и др.);
- нестационарные процессы, вызванные неидентифицированными изменениями параметров внутренней поверхности печи, клинкера и топочных газов.

Моделирование скола обмазки и изменения формы факела показало, что стабильное, наблюдаемое в течение 1-3 часов увеличение температуры внешней поверхности может трактоваться как скол обмазки, величина которого, в первом приближении пропорциональна временному градиенту температуры внешней поверхности (см. рис. 12).

На наружной поверхности печи часто образуется грязевая корка, толщина которой может достигать 10 мм. Поскольку корка служит теплоизолятором, температура корпуса под ней может увеличиваться (в среднем на 25°C). На поверхности корки она уменьшается на 3-5°C. Во время вращения печи происходят локальные сколы корки. Были исследованы эффекты, возникающие после скола

грязевой корки при различных соотношениях коэффициентов излучения стального корпуса и корки. Неучет присутствия данного мешающего фактора при идентификации дефектов приводит к погрешности определения толщины обмазки на уровне 2 см.

Показано, что изменения температуры наружной стенки запаздывают по времени от вызывающих данные изменения суточных колебаний окружающей среды приблизительно на 2 ч и не превышают 3°C. Следовательно, эти колебания можно не учитывать при идентификации дефектов внутренней поверхности печи.

Амплитуды шумовых воздействий, обусловленных различными факторами, приведены в табл. 3. С учетом коррелированности ряда факторов суммарная амплитуда эквивалентного температурного шума оценена на уровне ~35°C. Это приводит к погрешности идентификации границы внутренней поверхности не менее 3-4 см. С первым и четвертым из приведенных факторов можно бороться путем периодической очистки внешней поверхности печи. Окраска кожуха позволяет также снизить влияние третьего фактора. Тем не менее, даже с учетом возможных мероприятий, средний уровень помехи достигает 20°C, что является пороговой величиной при проектировании аппаратуры контроля и разработке алгоритмов дефектометрии.

Таблица 3

Влияние различных шумовых факторов на температуру внешней поверхности

№№ п/п	Шумовой фактор	Величина максимального отклонения, °C
1	Скол грязевой корки	51
2	Флуктуации скорости ветра	20
3	Флуктуации степени черноты внешней поверхности	18
4	Наличие грязевой корки	25
5	Суточные колебания температуры окружающей среды	3
6	Флуктуации солнечного излучения	4
7	Флуктуации интенсивности выпадения осадков	3

Существенной частью исследований, описанных в 3-й главе, явился анализ возможности осуществления активного теплового контроля (дополнительной тепловой стимуляции печи) с целью повысить сигналы в дефектных зонах. В качестве инструмента тепловой стимуляции предложено применять орошение поверхности печи водой или обдув воздухом. Основными выводами по возможности активного теплового контроля дефектов во вращающихся печах являются следующие: 1) при ступенчатом воздействии на внешнюю поверхность печи путем орошения температурный сигнал в области дефектов возрастает монотонно и приблизительно по экспоненциальному закону (в 1,5 раза), причем величина сигнала выше уровня шумов для опасных дефектов; 2) при ступенчатом воздействии на внешнюю поверхность печи путем обдува перепад температуры сначала быстро уменьшается, а затем на протяжении длительного времени возвращается к первоначальному значению; это объясняется различными постоянными времени переходных процессов для сравниваемых точек; при этом величина сигнала ниже установленного уровня шумов.

Процедуры дефектометрии, помимо оценки глубины дефектов, должны включать определение их размеров в поперечном направлении (по Z -координате). В диссертации сравнены как амплитудный, так и градиентный метод. Как упоминалось ранее, амплитудный метод сопровождается размытием температурного сигнала по краям дефектов, в то время как вычисление первой производной от температуры по Z -координате позволяет надежно оценить размеры дефекта практически независимо от глубины их залегания и размеров. Основной трудностью применения градиентного метода является то, что дифференцирование зашумленных сигналов приводит к возрастанию шумов.

Модельные эксперименты, посвященные исследованию влияния различных факторов на тепловые поля в цементной печи, показали, что многие из них могут использоваться в качестве управляющих воздействий для ведения технологических процессов. В диссертации рассмотрены следующие традиционные управляющие воздействия:

- изменение формы распределения теплового излучения с целью создания необходимого профиля температуры внутренней поверхности футеровочного слоя печи;
- применение водяного орошения внешней поверхности печи для снижения температуры внутренней стенки футеровки до требуемого уровня;
- применение обдува корпуса с той же целью.

Промоделированы стационарные режимы печи для пяти разных форм распределения теплового излучения, которые представлены соответствующими распределениями температуры топочных газов (см. рис. 16). В качестве примера на рис. 17 показано влияние формы распределения теплового излучения на температуру клинкера. Видно, что только распределение теплового излучения с относительно далеко смещенным от горячего среза печи центром (кривая 3) вызывает недогрев клинкера; остальные формы факела не приводят к изменениям, влияющим на качество продукции.

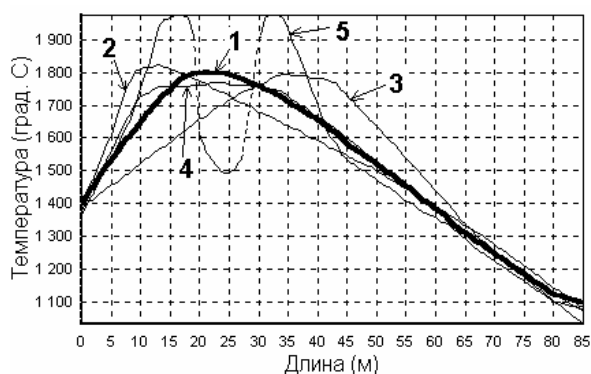


Рис. 16. Распределения температуры топочных газов, соответствующие различным формам факела (1-идеальная; 2-смещенная назад; 3-смещенная вперед; 4-плоская; 5-двугорбая)

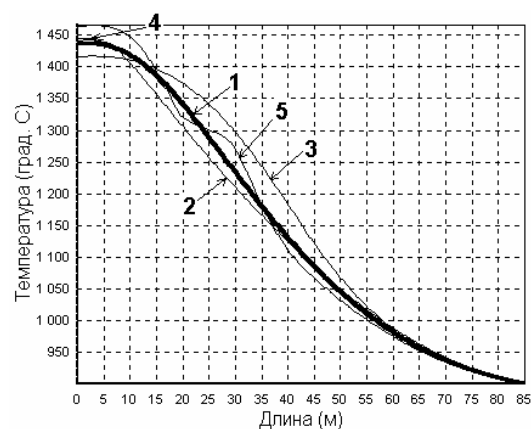


Рис. 17. Распределения температуры обжигаемого материала для различных форм факела

Два других управляющих воздействия, связанные с орошением и обдувом, были рассмотрены в стационарном режиме. В динамическом режиме для оптимального управления температурой внутренней стенки футеровки в зоне дефекта предложено вначале применить орошение с интенсивностью порядка 4-5 г/(м²·с),

а после достижения требуемой величины снизить интенсивность орошения до 0,2-1 г/(м²·с). Обдув приводит к требуемым результатам при соответствующем подборе мощности вентиляторов. Выбор конкретного метода охлаждения зависит от конкретных обстоятельств (наличия ветра, стоимости воды и орошающего оборудования и т.п.).

Заключительной стадией анализа рассматриваемой модели явилась экспериментальная (лабораторная и натурная) проверка результатов расчетов. Идентификация дефектов внутренней поверхности была проверена путем построения профилограммы обмазки после остановки печи.

Проверка теоретических результатов по сколу грязевой корки проводилась 12.12.2004 на цементной печи №7 ОАО «Искитимцемент». После очистки загрязненного участка печи с помощью скребков изменение температуры внешней поверхности регистрировали с помощью аппаратуры теплового контроля и одновременно рассчитывали теоретически. Зафиксированные скачки температуры имели значение в диапазоне от 30°С до 60°С, что соответствовало результатам моделирования.

На рис. 18 показан пример наблюдения скола обмазки на печи №1 ОАО «Искитимцемент», произошедшего 18.06.2002г. Дефект расположен на пересечении горизонтальной и вертикальной линий на термограмме контролируемого участка внешней поверхности. Температура в зоне дефекта превышала 500°С.

Глава 3 завершается обоснованием концепции применения разработанной математической модели печи для: 1) контроля за текущими параметрами технологических процессов; 2) дефектоскопии и дефектометрии; 3) автоматизированного управления режимами работы печи. Внедрение такой концепции требует значительно бóльшего объема входных данных, чем это предусмотрено в действующих системах контроля. В главе 3 даны рекомендации по необходимому набору данных и сформулированы требования к аппаратуре контроля.

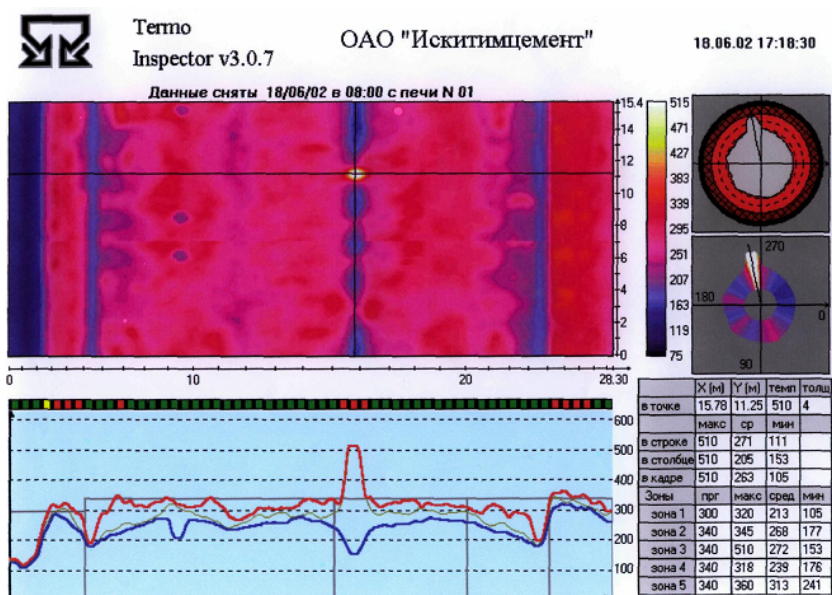


Рис. 18. Идентификация скола обмазки

В **4-й главе** описана информационная модель мониторинга температурных полей вращающихся цилиндрических объектов - обжиговых печей, на основе которой разработаны стратегия и алгоритмы идентификации температурных аномалий. Основной целью создания информационной модели являлась оптимизация задачи НРК с точки зрения сокращения избыточности информации при поиске температурных аномалий, обусловленных скрытыми дефектами, по результатам сканирования температурного поля поверхности печи и представления данных в виде бинарных или полутоновых массивов (черно-белых и/или цветных изображений).

В рамках предложенной графической модели описан подход к сокращению избыточной информации, основанный на знании статистического распределения дефектных и шумовых отметок во вращающихся обжиговых печах, которое получено из опыта эксплуатации систем контроля на нескольких предприятиях. Акцент сделан на то, как оператор производит анализ температурного поля поверхности печи на экране монитора. При этом происходит преобразование температурного поля вращающегося цилиндра в «плоское» изображение на экране, представляющее собой развертку цилиндра.

Ввиду большой поверхности обжиговых печей и относительно небольшого размера типичных аномалий, информация, поступающая с линейного сканера,

обладает определенной избыточностью, которую можно сократить, используя пространственное (линейное) сжатие данных (в научно-технической литературе использую также термины «уплотнение данных», «сжатие сообщений», «адаптивная дискретизация» и т.п.). Сжатие производится путем разбиения бинарного пространства размером $N_1 \times N_2$ на квадратные площадки со стороной k отсчетов, где k называют коэффициентом кратности линейного сжатия, и дизъюнкции отсчетов внутри площадок. Вновь сформированное пространство дефектных признаков размером $n_1 \times n_2$ отображается на экране монитора.

Рассмотрена информационная модель тепловых помех обжиговых печей, заимствованная из ИК аэросъемки. Тепловое поле печи считается однородным центрированным с изотропным распределением свойств помех $T(x,y)$. Стандартным приемом обнаружения сигналов на фоне помех в случайных полях такого вида является пороговая фильтрация на уровне T_0 , что снижает уровень ложной тревоги, но одновременно ведет к пропуску малых дефектов, т.е. снижает вероятность правильного обнаружения. В полях такого вида среднее число выбросов, приходящихся на единицу площади, равно:

$$N_{л.г.}(T_0) = \frac{T_0}{(2\pi)^{1.5} K_{11}} \sqrt{\frac{K_{22}K_{33} - K_{23}^2}{K_{11}}} \exp\left(-\frac{T_0}{2K_{11}}\right), \quad (5)$$

где элементы корреляционной матрицы равны:

$$\begin{aligned} K_{11} &= K(0,0); \quad K_{23} = -\frac{\partial^2 K(x,y)}{\partial x \partial y} \Big|_{x=y=0}; \quad K_{14} = -\frac{\partial^2 K(x,0)}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = -K_{22}; \\ K_{33} &= -\frac{\partial^2 K(0,y)}{\partial y^2} \Big|_{y=0}; \quad K_{44} = -\frac{\partial^4 K(x,0)}{\partial x^4} \Big|_{x=0}; \\ K_{12} &= K_{13} = K_{24} = K_{34} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку характеристики дефектов и помех сходны, среднее число ложных дефектных отметок $\bar{N}_{л.о.}$, приходящихся на единицу поверхности печи, равно:

$$\bar{N}_{л.о.}(T_0, \bar{r}) = N_{л.г.}(T_0) \int_{\bar{r}} P_0(T_0, \bar{r}) d\bar{r}, \quad (7)$$

где P_0 - плотность вероятности распределения ложных отметок; $\bar{r}$ - вектор геометрических размеров ложных отметок. Окончательное выражение для $\bar{N}_{л.о.}$ предложено в виде:

$$\bar{N}_{л.о.} = -\frac{K''(0)C}{(2\pi)^{1.5}} \exp(-0.5C^2) \{ \exp[0.125K''(0)C^2r_{\min}^2] - \exp[0.125K''(0)C^2r_{\max}^2] \}, \quad (8)$$

где $C = T_0 / \sigma_n$; σ_n -среднеквадратическое отклонение плотности мощности излучения (температуры) теплового поля печи; r -скалярный аргумент (поперечный размер ложной дефектной отметки); $r_{\min}, r_{\max}$ -нижняя и верхняя границы диапазона поперечных размеров (диаметров) ложных дефектных отметок.

Показано, что автокорреляционная функция (АКФ) может быть аппроксимирована одним из следующих выражений:

$$K(\eta) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\eta^2}{r_k^2}\right); \quad K(\eta) = \sigma^2 \left(1 + \frac{\eta^2}{r_k^2}\right)^{-1.15}; \quad K(\eta) = \sigma^2 \left(1 + \frac{\eta^2}{r_k^2}\right)^{-1}, \quad (9)$$

для которых соответственно:

$$K''(0) = \frac{2}{r_k^2}; \quad K''(0) = \frac{1}{r_k^2}; \quad K''(0) = \frac{2}{r_k^2}; \quad r_k \text{ -радиус корреляции.}$$

Знание АКФ позволяет оценить энергетический спектр помех (спектр Хинчина-Винера) на поверхности печи, например, используя следующее выражение:

$$g(\nu) = 2\left[1 + 2\sum_{i=1}^{N-1} K(i) \cos(2\pi\nu i)\right], \quad (10)$$

где $g(\nu)$ -нормированная спектральная плотность помехи; ν -пространственная частота. Установлено, что основная мощность помехи сосредоточена в интервале пространственных частот от 0,077 до 1,54 см⁻¹.

Глава 5 посвящена описанию принципов проектирования и параметров разработанных ИК систем теплового контроля вращающихся обжиговых печей. Основное внимание уделено описанию установок, разработанных в рамках диссертационных исследований в ФГНУ «НИИ интроскопии»: «ИКСА-01», «ИКСА-02», «ИКСА-03», «ИКСА-04», «ИНТРОКОН-04Ц», «ИНТРОКОН-05Ц».

Обобщенная структурная схема этих систем показана на рис. 19. Первичным датчиком указанных систем является оригинальный линейный сканер, выходной сигнал которого после предварительного усиления обрабатывается микропроцессорным блоком по специализированному алгоритму, позволяющему обнаружить дефекты внутренней оболочки (теплозащитной обмазки) печи, определить их ко-

ординаты, размеры, степень опасности и оценить надежность печного агрегата. Полученная информация используется для оперативного устранения критических дефектов без остановки печи. Зарегистрированные термограммы подлежат архивированию и хранятся в течение длительного времени, что позволяет просле-

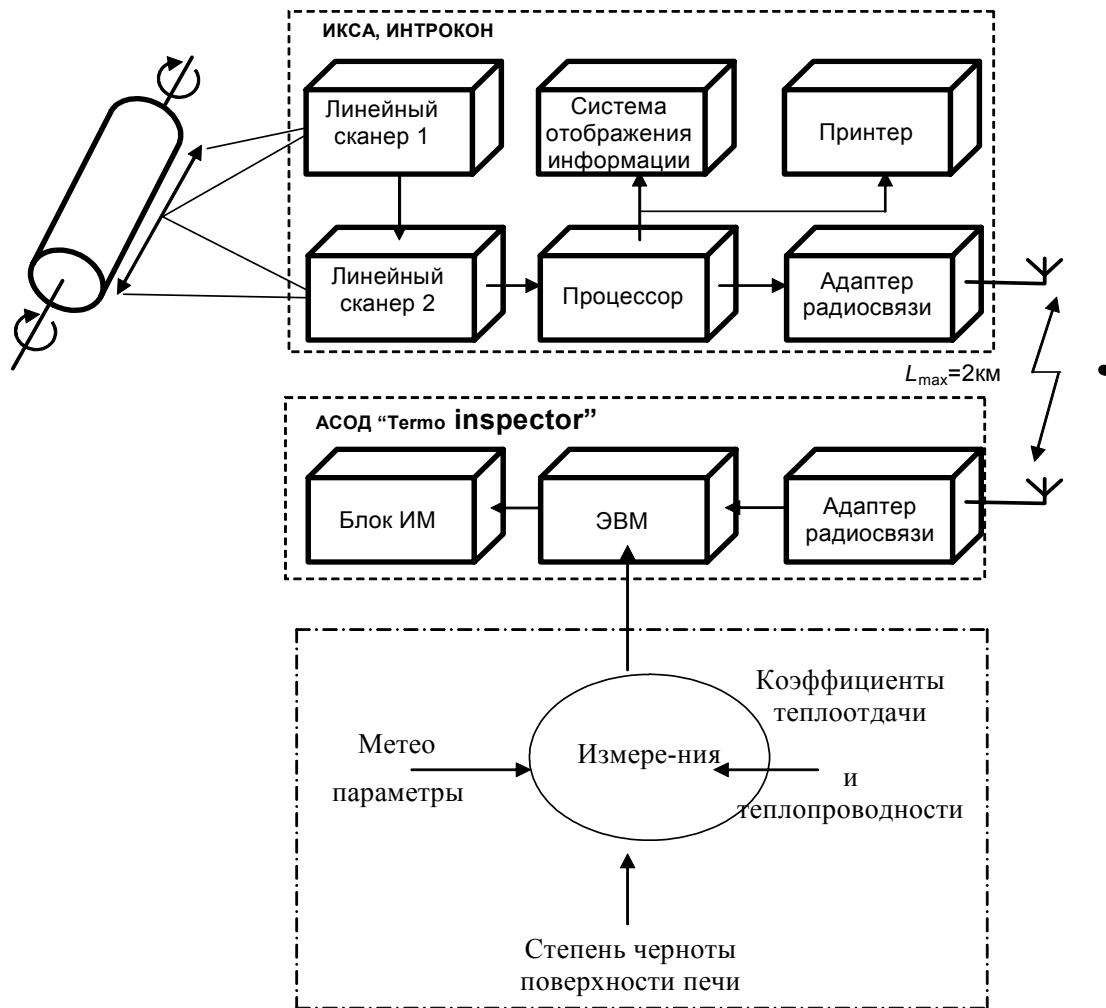


Рис. 19. Обобщенная структурная схема ИК строчно-сканирующих систем

дить процесс износа внутренней поверхности печи за межремонтный, а при необходимости, и более продолжительный период. Системы оснащены одним или двумя линейными сканерами, лазерным указателем угла поля обзора, датчиком синхронизации и измерения угловой скорости вращения и осевого смещения печи, могут комплектоваться цифровым каналом радиосвязи. Технические пара-

метры разрабатываемого оборудования отражены в табл. 4. Структурная схема монтажа оборудования на вращающихся печах приведена на рис. 20.

Таблица 4

Параметры ИК строчно-сканирующих систем, используемых для контроля вращающихся обжиговых печей

Параметр	«ИКСА-01-02»,	«ИКСА-03», «ИКСА-04»	«Интрокон-04Ц»	«Интрокон-05Ц»
Год выпуска	1990-92	1994-98	2000	2002
Спектральный диапазон приемника, мкм (материал детектора)	2,0-20,0 (пироприемник)	2,0-20,0 (пироприемник)	1,2-5,3 (интерференционный фильтр от 2,8 мкм) (селенид свинца), (охлаждаемый/ не-охлаждаемый)	1,2-5,3 (интерференционный фильтр от 2,8 мкм) (селенид свинца) (охлаждаемый/ не-охлаждаемый)
Пространственное разрешение, мрад,	7 (при 50 % мод.)	7 (при 50 % модуляции)	5 (при 50 % модуляции)	5 (при 50 % модуляции)
Диапазон измеряемых температур, °С	100-400	100-450	100-500	50-600
Погрешность, °С	(+/-) 4	(+/-) 4	+/-2,5	+/-2,5
Частота сканирования, Гц	1	2	5	8
Угол поля обзора, град	60	60	101	105
Рабочий диапазон температур окружающей среды, °С	-15-55	-15-55	-30-60 (с подогревом)	-30-60 (с подогревом)
Габаритные размеры сканера, мм	300x200x190	230x190x190	260x230x170	200x180x160
Масса сканера, кг	10	8	7	6

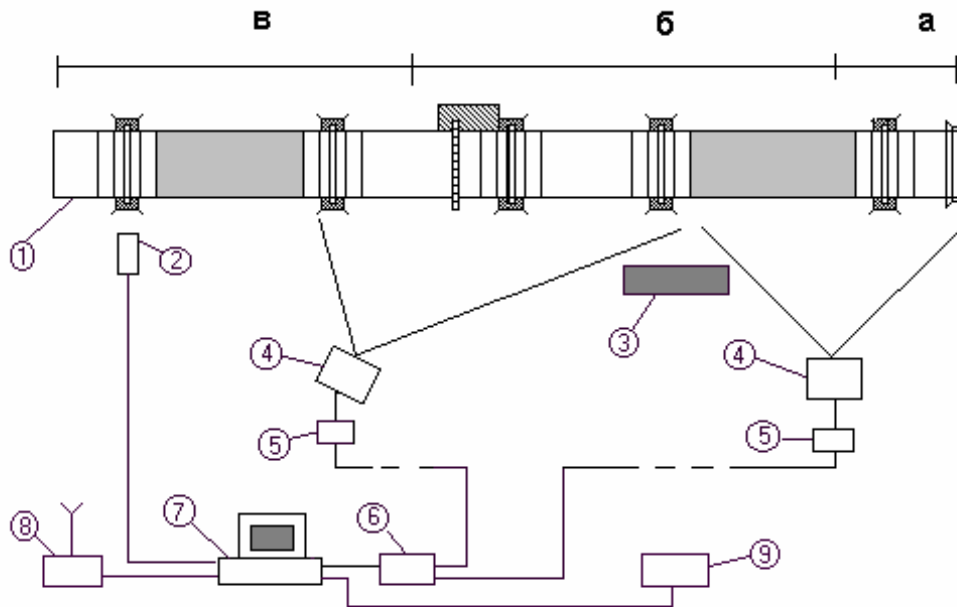


Рис. 20. Стандартная схема монтажа систем «ИНТРОКОН»

(1-контролируемый объект, 2-датчик нулевой строки (вращения), 3-элемент конструкции, закрывающий зону контроля, 4-линейный сканер, 5-монтажная коробка, 6-адаптер каналов связи, 7-компьютер, 8-блок измерения метеопараметров, 9-контроллер исполнительных механизмов, а-зона охлаждения, б-зона спекания, в-экзотермическая зона)

Программное обеспечение «Термоинспектор», входящее в комплект системы, выполняет следующие задачи:

- сбор, накопление, архивацию данных, поступающих с аппаратуры теплового контроля, для многоуровневой обработки;
- оперативную обработку данных для контроля текущих технологических параметров печи;
- периодическую проверку состояния внутренней поверхности печи;
- моделирование тепловых процессов цементной печи для сравнения получаемых данных с расчетными;
- прогнозирование последствий тех или иных управляющих воздействий на технологические процессы в печи;

- обработку накопленной информации для автоматизированного (под управлением оператора) формирования охлаждающих воздействий в дефектных зонах.

Структура программного обеспечения показана на рис. 21. Программное обеспечение позволяет осуществлять следующие виды обработки поступающих данных в режиме on-line и off-line: 1) представление карты температурных полей вращающейся печи в различных видах (плоской развертки, трехмерной термограммы, мультирежима и т.п.); 2) настройку расположения сканера с учетом геометрии контроля; 3) работу с архивом термограмм; 4) настройку аварийной сигнализации при отклонении технологических параметров печи от нормы; 5) идентификацию дефектов внутренней поверхности печи (на основе разработанных алгоритмов дефектометрии; 6) моделирование тепловых процессов в печи (программа “Обжиг R-ф-Z”); 7) прогнозирование последствий управляющих решений (программа “Обжиг R-ф-Z”); 8) визуализацию результатов моделирования.

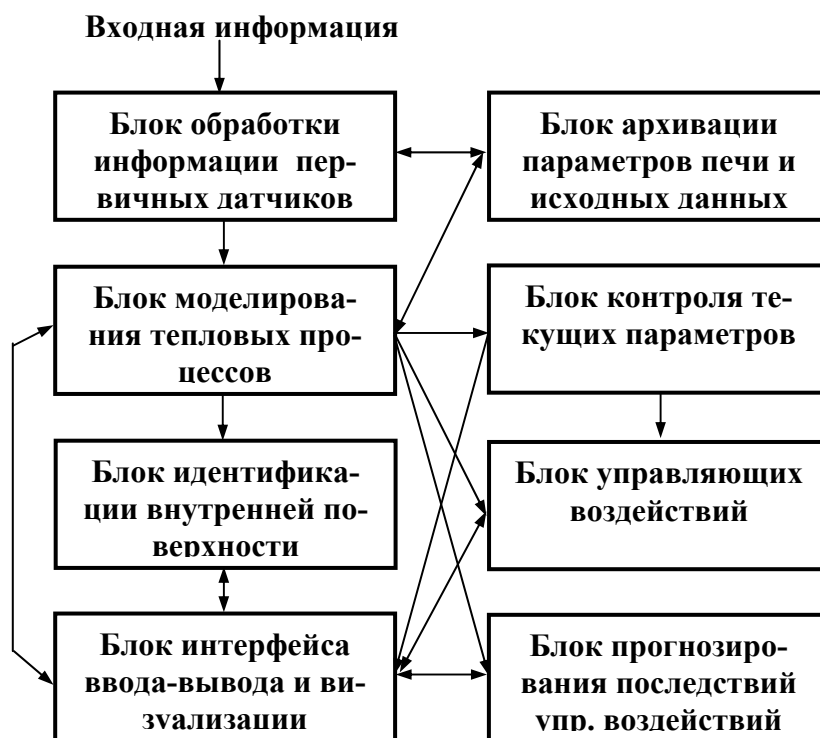


Рис. 21. Структурная схема программного обеспечения системы контроля тепловых процессов цементной печи «Термоинспектор»

На рис. 22 приведен внешний вид и условия эксплуатации разрабатываемых систем контроля.



а)



б)

Рис. 22. Внешний вид ИК строчно-сканирующих систем:
а – «Интрокон-04Ц», «Интрокон-05Ц»; б – контроль печи оператором

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен системный анализ процессов и параметров, влияющих на теплообмен во вращающихся обжиговых печах, что позволило выделить и оценить степень воздействия на тепловые режимы наиболее важных, к которым относятся: топливный факел, уклон печи, частота вращения, степень заполнения, скорость прохождения материала через вращающуюся печь, производительность печи, теплофизические характеристики материалов корпуса печи, излучательные свойства внутренней и внешней поверхности, метеорологические параметры окружающей среды.

2. Предложена математическая модель тепловых процессов вращающейся обжиговой печи, на базе которой разработаны методики расчета температурных полей в корпусе и на границах конструктивных слоев печи, алгоритмы идентификации дефектов внутренней поверхности и сформулированы требования к аппа-

ратуре и программному обеспечению систем теплового контроля. Основой для разработки математической модели тепловых процессов печи явилось аналитическое описание элементарных тепловых процессов, каждый из которых моделируется в совокупности ячеек Дирихле в трехмерных цилиндрических координатах.

3. На основе обзора методов решения задач тепло- и массопереноса выбран численный метод решения задачи теплового контроля вращающейся печи в цилиндрической системе координат с использованием метода расщепления. Разработанная математическая модель описывает динамические тепловые процессы в обжиговых печах, включая влияние дефектов обмазки и футеровки на температурные распределения. Модель обладает свойством аппроксимации и устойчивости. Суммарная погрешность моделирования при рекомендованных шагах по пространству и времени не превышает 8°C .

4. Для идентификации дефектов внутренней поверхности печи предложена упрощенная одномерная модель тепловых процессов и на ее основе решена обратная задача определения внутренней границы обмазки. Для определения глубины дефекта с погрешностью не более 1 см необходимо измерять температуру внешней поверхности с погрешностью не более 10°C .

5. Исследовано влияние флуктуаций различных эксплуатационных параметров на температурные распределения в обжиговых печах и точность идентификации дефектов. Суммарное воздействие всех шумовых факторов составляет 35°C , вследствие чего погрешность идентификации границы внутренней поверхности печи достигает 3-4 см. Предложены физические способы воздействия (учета) вышеуказанных помех, позволившие снизить суммарный вклад помех до среднего уровня 20°C , что эквивалентно средней погрешности идентификации глубины дефектов в обжиговых печах около 2 см.

6. Рассмотрены способы активного теплового воздействия на тепловые режимы обжиговых печей, а также способы повышения надежности теплового контроля дефектов путем орошения водой и обдува воздухом; показано, что, например, орошение внешней поверхности водой обеспечивает увеличение контраста на 50%.

7. Для уточнения границ скрытых дефектов теплозащитной обмазки рекомендовано использовать алгоритм вычисления градиента температурного отклика на поверхности печи.

8. На основе математического моделирования предложена концепция теплового контроля параметров обжиговых печей и дефектов в них, в результате чего сформулированы требования к программному обеспечению и аппаратным средствам контроля, которые были учтены в разработанных автоматизированных системах теплового контроля.

9. Предложены информационные модели теплового контроля обжиговых печей, обеспечивающие сжатие избыточной информации, пороговую фильтрацию и бинаризацию сигналов, что позволяет представить оператору информацию о количестве обнаруженных температурных аномалий (дефектов), их площади, координатах и степени опасности.

10. Для определения порога фильтрации температурных сигналов получены энергетические спектры Хинчина-Винера, в результате чего установлено, что, например, в зоне кальцинирования, пространственные частоты основных помех сосредоточены, в интервале от 0,077 до 1,54 см⁻¹.

11. Результаты математического моделирования тепловых процессов в обжиговых печах с внутренними дефектами воплощены в специализированном программном обеспечении (последняя версия – программа «Термоинспектор 3-09»), позволяющем осуществлять автоматизированный сбор данных, отображать информацию в удобной для оператора форме и архивировать результаты.

12. Разработано несколько поколений ИК систем контроля температуры поверхности вращающихся обжиговых печей (в соответствии с техническими условиями ЖТАБ 2.820.000 ТУ): «ИКСА-01», «ИКСА-02», «ИКСА-03», «ИКСА-04», «ИНТРОКОН-04», «ИНТРОКОН-05», «ИНТРОКОН-06». На предприятиях Российской Федерации (ОАО «Мальцовский портландцемент», ОАО «Воскресенский цемент», ОАО «Катавцемент», ОАО «Искитимцемент», ОАО «Топкинский цемент», ОАО «Кокс», ОАО «Яшкинский цементный завод», ОАО «Ангарский

цементный завод») внедрено 44 установки с годовым экономическим эффектом около 0,4 млн. руб. на установку.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Торгунаков В.Г. Сжатие и отображение информации при дефектоскопии большеплощадных изделий // Промышленность, техника, энергетика, связь: Сб. трудов IV рег. научно-техн. конф. – Томск, 1983. – С. 85-87.
2. Мацкевич В.С., Торгунаков В.Г., Хан В.А. Исследование индикатрис рассеяния и излучения лакокрасочных покрытий в ИК области спектра // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1984, №2. – С. 27-28.
3. Торгунаков В.Г. Комплекс алгоритмов для повышения производительности микропроцессорных систем, включающих звено «Оператор-ВКУ» // Микропроцессорные системы: Сб. трудов Всесоюз. научно-техн. конф. – Челябинск, 1984. – С. 168.
4. Торгунаков В.Г. Обработка изображений при экспресс-контроле изделий со сложным профилем // Обработка изображений и дистанционные исследования: Сб. трудов Всесоюз. научно-техн. конф. – Новосибирск, 1984. – С. 77-78.
5. Торгунаков В.Г. Информационные модели изображений при экспресс-анализе сложно-профильных изделий // Обработка изображений и дистанционные исследования: Сб. трудов Всесоюз. научно-техн. конф. – Новосибирск, 1987. – С. 178-179.
6. Епифанцев Б.Н., Торгунаков В.Г. и др. Использование различия теплофизических свойств несмешивающихся жидкостей для контроля и управления уровнями их расслоения: Сб.: Мат-лы П отрасл. совещания специалистов Минхимпрома, АН СССР и Госкомитета по народ. обр., по проблемам и перспективам развития ПО «Нефтехим». – Томск, 1988. – С. 61-62.
7. Почуев Н.А., Торгунаков В.Г. и др. Автоматизированная система управления технологическим процессом пропарки железобетонных плит // Инф. ЦНТИ. – № 136-88. – Томск, 1988. – 3 с.
8. Почуев Н.А., Торгунаков В.Г. и др. Система активного теплового контроля уровня цемента в силосах // Инф. ЦНТИ. – №142-88. – Томск, 1988. – 2 с.
9. Казаков Ю.Г., Торгунаков В.Г. и др. Устройство для дистанционного контроля тепловых контрастов на твердых поверхностях // Инф. ЦНТИ. – №147-88. – Томск, 1988. – 3 с.
10. Казаков Ю.Г., Торгунаков В.Г. Устройство для контроля тепловых контрастов на твердых поверхностях // Автоматизация и ее роль в реализации программы «Ускорение-90»: Сб. трудов научно-практ. конф. – Томск, 1988. – С. 56-57.
11. Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т. и др. Сигнализатор жидких и сыпучих сред // Инф. ЦНТИ. – №19-90. – Томск, 1990. – 4 с.
12. Казимир И.П., Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т. Контроль уровня мелкодисперсных сред ИК сигнализатором // Проблемы и перспективы развития ПО «Томский нефтехимический комбинат»: Сб. мат-лов отрасл. совещания специалистов Минхимпрома, АН СССР и Госкомитета по народ.обр. – Томск, 1990. – С. 158-160.
13. Торгунаков В.Г. Применение информационных моделей ИК изображений объектов контроля для оценки их качества // Обработка изображений и дистанционные исследования: Сб. трудов Всесоюз. научно-техн. конф. – Новосибирск, 1990. – С. 47.
14. Торгунаков В.Г., Гефле Г.Х. и др. Специализированный тепловизор // Инф. ЦНТИ. – 112-91. – Томск, 1991. – 3 с.

15. Торгунаков В.Г. ИК система автоматизированного контроля температуры поверхности вращающихся печей – «ИКСА-02» // Цемент.– 1992, №3. – С. 29.
16. Торгунаков В.Г., ИК система автоматизированного контроля температуры поверхности вращающейся печи // Конверсия в приборостроении: Материалы научно-техн. семинара. – Томск, 1994. – С. 18.
17. Казимир И.П., Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т., Яманаев М.С. Контроль футеровки цементных печей с помощью сканирующего пирометра: Сб.: Перспективы применения физ. методов и средств контроля на предприятиях хим. и маш. комплексов - 94. – Томск, 1994. – С. 47-49.
18. Торгунаков В.Г. Стационарная ИК система автоматизированного дистанционного контроля температуры корпуса вращающейся печи для обжига клинкера // Цемент.– 1995, №4. – С. 9.
19. Торгунаков В.Г. Состояние и перспективы развития индикационных сканирующих систем теплового неразрушающего контроля // Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами: Материалы XVII Уральской рег. научно-техн. конф. – Екатеринбург, 1997. – С. 83-84.
20. Торгунаков В.Г. Использование информационных моделей ИК изображений поверхности контролируемых объектов в индикационных дефектоскопах // Качество во имя жизни: Тез. докл. П обл. научно-практ. конф. – Томск, 1997. – С. 24-25.
21. Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т., Яманаев М.С. Автоматизированная система сбора и обработки данных термографического контроля промышленных теплоагрегатов // Качество во имя жизни: Тез. докл. П обл. научно-практ. конф. – Томск, 1997. – С. 119-120.
22. Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т., Яманаев М.С. Двухуровневая система термографического контроля промышленных теплоустановок // Оптические, радиоволновые, тепловые методы и средства контроля природной среды, материалов и промышленных изделий: Сб. трудов VII междунар. научно-техн. конф. – Череповец, 16-18 сентября 1997. – С. 45-46.
23. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S. Computer Model of Thermal Processes in a Cement Kiln for Application in IR Defectoscopy // 7th European Conference on NON-destructive testing. – Copenhagen, Denmark, 26-29 May, 1998. – P. 2676-2679.
24. Торгунаков В.Г. Линейные сканирующие ИК системы теплового неразрушающего контроля // Неразрушающий контроль и диагностика: Известия ТПУ / Изд. н.-т. литературы. – Томск, 1998. – С. 50-57.
25. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S., Vavilov V.P., Yamanaev N.M. The rotating cement kiln 3D computer model oriented toward solving thermal nondestructive testing problems // Quantitative Infrared Thermography "QIRT-98": Proceedings of Eurotherm Seminar №60. – Lodz, Poland, 7-10 September, 1998. – P. 97-100.
26. Суханов М.С., Торгунаков В.Г. Решение обратной задачи теплопроводности для оценки параметров дефектов теплозащитной оболочки вращающейся печи обжига материалов // Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике: Сб. трудов II междунар. научно-техн. конф. – Минск, 1998. – С. 47-49.
27. Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т., Яманаев М.С. Стационарные системы ИК контроля высокотемпературных технологических процессов и оборудования // Неразрушающий контроль и диагностика: Сб. трудов XV Российской научно-техн. конф. – Москва, 1999. – С. 81.
28. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S. Inverse problem of Heat conduction in NDT Problems of dynamic objects // KORUS 99: The 3^d Russian-Korean Symposium on Science and Technology. – Novosibirsk, Russia, 22-25 June. – 1999. – Vol.1. – P. 209.
29. Суханов М.С., Торгунаков В.Г. Имитационная модель тепловых процессов цементной печи // Цемент и его применение.–1999, №5-6. – С. 37-41.
30. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S., Vavilov V.P. Analysis of thermal processes in cement kiln by using the 2D and 3D numerical models // Quantitative Infrared Thermography "QIRT-

- 2000”: Proceedings of Eurotherm Seminar №64.– Reims, France, 18-21 July. – 2000. – P. 184.
31. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S., Vavilov V.P. Analysis of thermal processes in cement kiln by using the 2D and 3D numerical models // Quantitative Infrared Thermography “QIRT-2000”: Proceedings of Eurotherm Seminar №64. – Reims, France, 18-21 July. – 2000. – P. 150-155.
 32. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2000610040. Автоматизированная система дистанционного контроля температуры промышленных установок («Термоинспектор») /Торгунаков В.Г., Яманаев Н.М., Яманаев М.С. – РФ, РОСПАТЕНТ, г. Москва, 18 января 2000г.
 33. Торгунаков В.Г., Суханов М.С., Яманаев М.С., Чигарев С.Т. Идентификация дефектов внутренней поверхности цементной печи // Известия ТПУ. – Томск, 2002. – Т. 305, №. 5. – С.179-184.
 34. Torgunakov V.G., Vavilov V.P. Inspecting rotating kilns used in cement production: a line IR scanner and processing // SPIE,s: 17th International Simposium “AeroSense”. – Orlando, Florida, USA, 21-25 april, 2003. – Vol.5073. – С. 339-344.
 35. Торгунаков В.Г., Вавилов В.П., Ширяев В.В., Иванов А.И., Нестерук Д.А. Тепловой неразрушающий контроль в Томском НИИ интроскопии // Известия ТПУ. – Томск, 2003. – Т.306, №1. – С. 110-118.
 36. Торгунаков В.Г. Тепловой неразрушающий контроль вращающихся обжиговых печей // В мире неразрушающего контроля. – 2003, №2(20). – С. 13-17.
 37. Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т., Яманаев М.С., Яманаев Н.М. Термографическая система контроля и диагностики «ИНТРОКОН 05Ц» // Контроль. Диагностика. – 2003, №11. – С. 48-52.
 38. Torgunakov V.G., Vavilov V.P. Using the theory of heat conduction in the IR thermographic inspection of rotating cement kilns // SPIE,s: 18th International Simposium “AeroSense”. – Orlando, Florida, USA, 12-16 april, 2004. – Vol. 5405. – С. 431-441.
 39. Торгунаков В.Г. Тепловой контроль вращающихся печей // Неразрушающий контроль и диагностика: Сб. трудов 17 Российской научно-техн. конф. – г.Екатеринбург, Россия, 5–11 сентября, 2005. – С. 45.
 40. Торгунаков В.Г., Суханов М.С., Чигарев С.Т., Яманаев М.С. Влияние внешних факторов на ИК-термометрию корпуса вращающейся печи // Цемент и его применение. – 2005, № 4. – С. 57–61.
 41. Торгунаков В.Г., Суханов М.С. Активный тепловой контроль вращающихся печей // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 5. – С. 110–114.
 42. Торгунаков В.Г. Применение 3D моделирования в ИК термографическом контроле вращающихся печей // Дефектоскопия. – 2006, № 1. – С. 3–10.
 43. Вавилов В.П., Торгунаков В.Г., Нестерук Д.А., Маринетти С., Бизон П., Гринцато Э. Определение теплофизических характеристик материалов методом ИК термографии // Известия Томского политехнического университета. – 2006, № 2 (в печати).