

научных дисциплин. Специфически к общепрофессиональным дисциплинам относятся: статистика, технология и организация производства продукции и услуг, управление качеством, экономическая теория, экономическое управление организацией, менеджмент, финансовый и управляемый учет, управление персоналом, квалиметрия, основы метрологии, стандартизации и сертификации, методы и средства измерений, испытаний и контроля, информатика, информационное обеспечение, базы и банки данных, компьютерная графика, сети ЭВМ и средства коммуникаций, хозяйственное право, безопасность жизнедеятельности, информационные технологии в управлении качеством и защита информации, всеобщее управление качеством (TQM), средства и методы управления качеством, управление процессами, осуществление TQM, сертификация систем качества.

УДК 621.384.3

В.Г. ТОРГУНАКОВ, М.С. СУХАНОВ, М.С. ЯМАНАЕВ, С.Т. ЧИГАРЕВ

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦЕМЕНТНОЙ ПЕЧИ

Приведены результаты теоретического анализа влияния теплофизических и геометрических параметров цементной печи на тепловое излучение ее внешней поверхности. Дана классификация дефектов печи. Проведено ранжирование параметров печи по степени влияния на точность количественной идентификации дефектов внутренней поверхности печи.

Для дефектоскопии корпусов вращающихся печей обжига цемента и контроля их теплового баланса используется специализированная термографическая аппаратура [1-2]. При таком контроле локальные отклонения экспериментальных данных от данных, полученных расчетным путем, используются для качественной идентификации дефектов корпуса печи. Количественная идентификация затруднена из-за сложной взаимосвязи протекающих внутри печи процессов, поскольку необходимо не просто решить обратную задачу теплопереноса, но и учесть процесс перемещения обжигаемого материала (клинкера) при вращении печи, теплообмен с топочными газами, теплообмен с внешней средой.

Для постановки задачи количественной идентификации дефектов внутренней поверхности печи необходимо определить требования к погрешностям аппаратного измерения тех или иных параметров печи и окружающей среды, а также требования к адекватности модели, принятой за основу для решения обратной задачи. С этой целью были предприняты исследования влияния различных параметров печи на температуру ее внешней поверхности. Исследования проводились с помощью разработанной в НИИ Интроскопии трехмерной математической модели тепловых и механических процессов, происходящих в трубной вращающейся печи [3]. Эта модель учитывает следующие факторы:

- - конвективный и лучистый теплообмен с окружающей средой на внешней поверхности печи,
- - теплообмен путем теплопроводности внутри материалов корпуса печи,
- - конвективный и лучистый теплообмен с газом, протекающим внутри печи,
- - вращение печи,
- - механический перенос клинкера вдоль печи.

Первоначально был проведен анализ влияния глубины дефекта внутренней поверхности на величину температурного сигнала на внешней поверхности (рис.1).

Как видно из представленных графиков, полученная зависимость имеет нелиней-

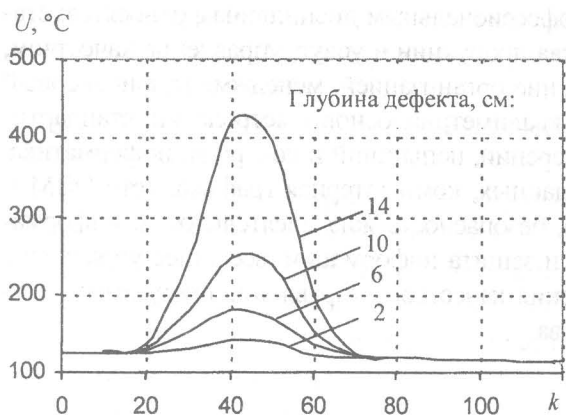


Рис.1. Влияние глубины дефекта на температуру внешней поверхности (k – номер расчетной точки вдоль оси Z)

с погрешностью не более десяти градусов в ту и другую стороны (диапазон изменения рабочих температур внешней поверхности в доаварийной зоне составляет 100-400 °С).

Далее исследовалась зависимость теплового возмущения на внешней поверхности от коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности, исходной температуры клинкера, температуры дымовых газов и других параметров внутренней поверхности печи и клинкера.

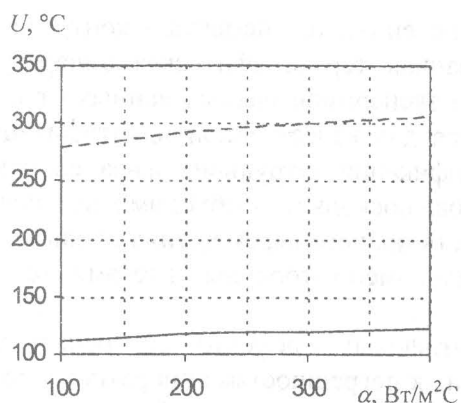


Рис.2. Влияние коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности на температуру внешней поверхности (сплошная линия – для бездефектной области, пунктирная линия – для середины дефектной области)

наый характер. Динамика изменения температуры возрастает при увеличении глубины дефекта на всю толщину теплозащитной обмазки, которая в данных численных экспериментах составляла 15 см. Также можно сделать вывод, что увеличение глубины дефекта на один сантиметр приводит к увеличению температуры внешней поверхности в среднем на двадцать градусов. Отсюда вытекает требование к аппаратуре измерения температуры внешней поверхности: для определения внутреннего радиуса печи с погрешностью не более одного сантиметра необходимо измерять температуру внешней поверхности

с погрешностью не более десяти градусов в ту и другую стороны (диапазон изменения рабочих температур внешней поверхности в доаварийной зоне составляет 100-400 °С).

Далее исследовалась зависимость теплового возмущения на внешней поверхности от коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности, исходной температуры клинкера, температуры дымовых газов и других параметров внутренней поверхности печи и клинкера. На рис. 2 представлена, в качестве примера, зависимость температуры внешней поверхности печи от коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности.

Из представленной зависимости видно, что существенная погрешность определения коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности не приведет к погрешности определения радиуса внутренней поверхности, большей чем один сантиметр.

Аналогичные результаты были получены и для других параметров внутренней поверхности печи, клинкера и топочных газов. В табл. 1 приведены их предельные значения.

Таблица 1

Пределы изменения внутренних параметров печи, не приводящие к погрешности определения радиуса внутренней поверхности более чем в один сантиметр

Наименование параметра	Ед. изм.	Нижний предел	Верхний предел
Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности	Вт/(м ² ·С°)	100	400
Температура клинкера на входе	С°	1100	1400
Температура топочных газов на входе	С°	1400	1800
Степень заполнения печи клинкером	%	2	18

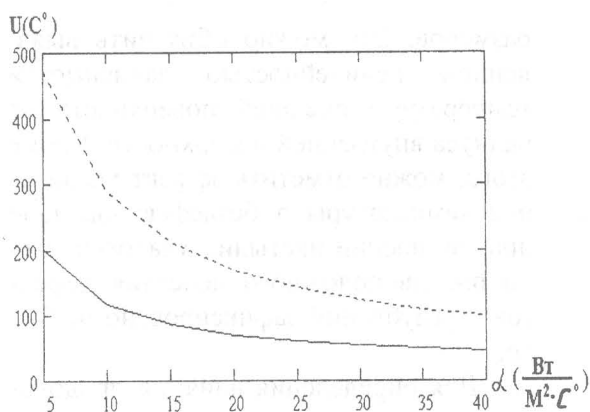


Рис.3. Влияние коэффициента теплоотдачи внешней поверхности на ее температуру (сплошная линия – для бездефектной области, пунктирная линия – для середины дефектной области)

процессе расчета поля температур необходим итерационный пересчет эффективного коэффициента теплоотдачи внешней поверхности.

Влияние других параметров на температуру внешней поверхности печи приведено в табл. 2.

Влияние параметров печи и окружающей среды на температуру внешней поверхности.

Таблица 2

Наименование параметра	Изменение параметра	Изменение температуры
Температура окружающей среды, $^\circ C$	-40 - +40	230-300
Коэффициент теплоотдачи, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	15-40	200-120
Скорость вращения печи, об/мин	0.5-2.0	206-200
Угол наклона печи, градусов	1-3	300-280
Коэффициент теплопроводности обмазки, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	0.1-0.3	200-350
Коэффициент теплопроводности футеровки, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	0.5-2.5	150-350

Проведенные исследования и данные, представленные в таблице 2, позволяют сделать следующий вывод: для количественной идентификации дефектов внутренней поверхности необходимо измерять такие параметры печи, как температура окружающей среды, коэффициент теплоотдачи внешней поверхности (с погрешностью не более $5-6 \text{ Вт}/(м^2 \cdot ^\circ C)$), влияющие на коэффициент теплоотдачи факторы (скорость ветра, степень черноты поверхности), коэффициенты теплопроводности материалов печи (с погрешностью не более $0.02 \text{ Вт}/(м \cdot ^\circ C)$ для обмазки и не более $0.2 \text{ Вт}/(м \cdot ^\circ C)$ для футеровки). Средняя погрешность определения данных параметров не должна превышать 10%. Не требуют точного измерения скорость вращения и угол наклона печи.

Для определения влияния размеров настилы на температуру внешней поверхности производилось моделирование наростов на внутренней поверхности - толщина обмазки увеличивалась до размеров настилы, а по краям задавались два дефекта в виде утонения обмазки. Зона между дефектами принималась за кольцеобразную настыль. Влияние ее толщины на температуру внешней поверхности показано на рис. 4.

Некоторое уменьшение температуры по краям графика связано с вышеописанным способом моделирования настилы. Из дальнейшего рассмотрения будет видно, что влияние настилы не столь велико по сравнению с влиянием углублений аналогичных

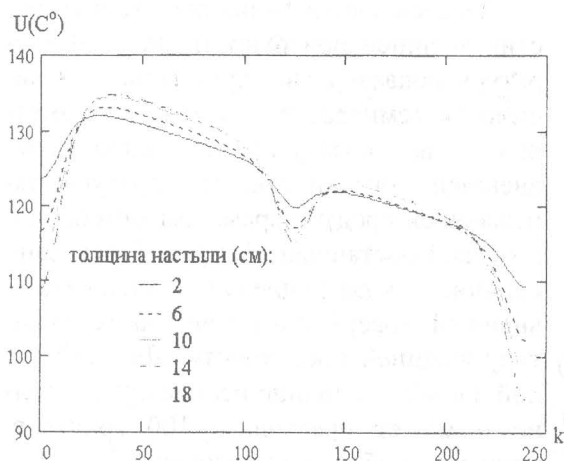


Рис.4. Влияние толщины настыли на температуру внешней поверхности (начало моделируемой настыли находится в центре – расчетная точка 120)

этих экспериментов приведены на рис. 5. Анализ приведенных графиков показывает, что с уменьшением продольных размеров дефекта температурный отклик становится меньше. Причиной этого является определенная, фиксированная для используемого в эксперименте набора температур и теплофизических параметров материалов, крутизна наклона температурной кривой около стенки дефекта. При малых продольных размерах дефекта амплитуда подъема кривой определяется только перекрещиванием наклонных линий, проведенных от обоих концов дефекта, что объясняется маскирующим эффектом металлического кожуха печи. Этот эффект будет приводить к значительной погрешности определения глубины дефектов, имеющих малую протяженность. Принимая этот факт во внимание, рассмотрим вопрос о том, какие дефекты необходимо обнаруживать достаточно точно, а для каких дефектов допустима погрешность при определении размеров.

Дефекты внутреннего слоя печи можно разделить следующим образом:

- утонения (выбоины и углубления в слое обмазки),
- настыли (выпуклости) в слое обмазки.

Очевидно, что в первую очередь следует обратить внимание на обнаружение опасных для эксплуатации печи дефектов, возникновение которых приводит к остановке и ремонту печи. За таковые принимаются утонения, глубина которых превышает половину толщины обмазки, а поперечные размеры более пяти процентов от длины окружности внутренней поверхности печи [4]. На рис.6 приведены иллюстрации опасных и неопасных дефектов. На оси абсцисс нанесены номера расчетных точек вдоль продольной оси печи, используемые

размеров. Это можно объяснить выявленной нелинейностью зависимости температуры внешней поверхности от радиуса внутренней поверхности. Кроме этого, можно отметить эффект увеличения температуры в бездефектной зоне при утолщении настыли. Аналогичного, но противоположного действия дефектов – углублений зафиксировано не было.

Для определения влияния продольных размеров дефекта на температуру внешней поверхности были проведены численные эксперименты на трехмерной модели. При этом интервал между расчетными точками составил 0,125 м, а глубина дефекта – 0.06 м. Результаты

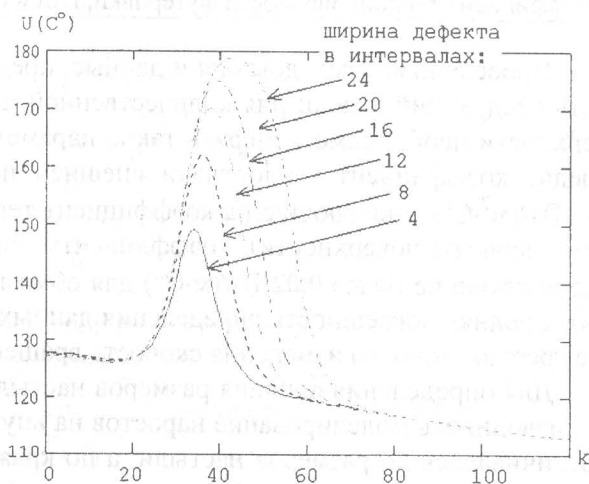


Рис. 5. Сравнение профилей температуры внешней поверхности в зоне дефекта глубиной 0.06м для различных размеров дефекта (один интервал между расчетными точками соответствует 0,125м, начало дефекта находится в 32-й расчетной точке)

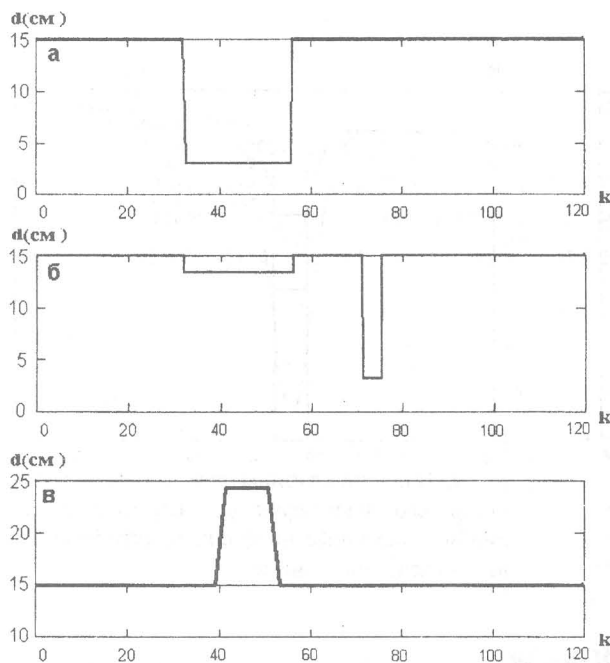


Рис.6. Примеры дефектов обмазки печи: а) опасные дефекты, б) неопасные дефекты, в) настыл

результатов решения обратной задачи нами были проведены следующие расчеты: по исходному внутреннему профилю с помощью трехмерной модели строилась термограмма внешней поверхности печи, полученные данные использовались как входные для решения с помощью упрощенной модели обратной задачи.

На рис. 7 представлены исходный профиль радиуса внутренней поверхности и профиль, полученный при решении обратной задачи. Из рисунка видно, что удовлетворительное совпадение профилей наблюдается в бездефектной области и в середине дефекта. По краям дефекта и вблизи него наблюдается эффект сглаживания кромок. Погрешность определения глубины дефекта не превышает одного сантиметра.

Для определения влияния поперечных размеров дефектов на погрешность их идентификации были проведены численные эксперименты, результаты которых приведены на рис.8. Интервал между расчетными точками составил 0,125 м, а глубина дефекта – 0,12 м. Анализ исходных и расчетных кривых показывает, что с уменьшением поперечных размеров дефекта погрешность определения его глубины становится больше. Влияние глубины дефекта на погрешность ее измерения продемонстрировано на рис. 9. Толщина обмазки в данных численных экспериментах составляла 20 см, а поперечный размер дефекта – 0,5 м. Видно, что даже для дефектов сравнительно малой длины погрешность определения глубины дефекта не превосходит одного сантиметра. Исследования показывают, что для дефектов с поперечными размерами менее 0,5 м эта погрешность будет более одного сантиметра. Однако такие дефекты не относят к категории опасных.

при математическом моделировании. Расстояние между расчетными точками 12,5 см.

Основываясь на приведенном ранжировании дефектов, а также учитывая тот факт, что при анализе тепловых потоков в радиальном и осевом направлениях в бездефектных областях и в середине дефектов большой протяженности (более половины внутреннего радиуса печи) в подавляющей степени преобладают тепловые потоки радиальной направленности, авторы разработали упрощенную математическую модель, чтобы с ее помощью решить обратную задачу теплопроводности для целей обнаружения и идентификации именно таких дефектов [5].

Для анализа правильности ре-

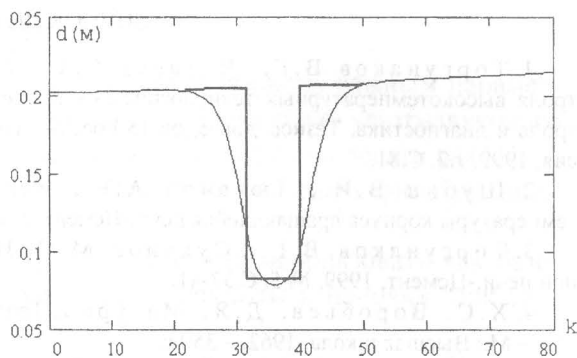


Рис.7. Сравнение заданного (прямоугольная линия) и рассчитанного обратной задачей (кривая линия) профилей радиуса внутренней поверхности печи

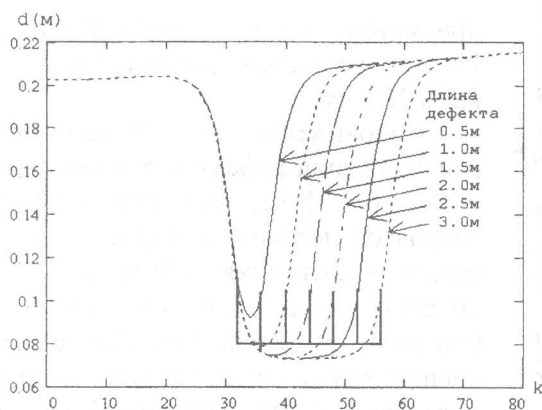


Рис.8. Сравнение профилей внутренней поверхности глубиной 0,12 м для различных размеров дефектов (прямоугольные линии – исходные профили, пунктирные линии – расчетные кривые)

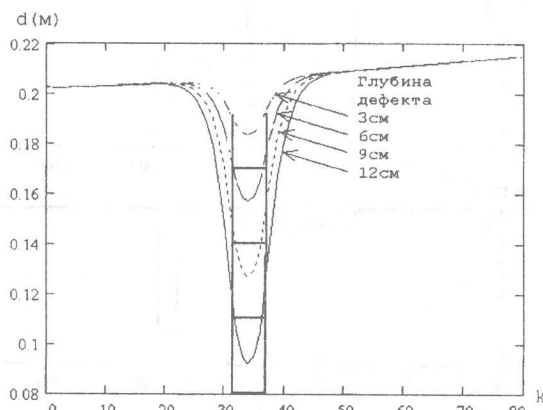


Рис.9. Влияние глубины дефекта на погрешность его идентификации (прямоугольные линии – исходные профили, пунктирные линии – расчетные кривые)

Выводы

1. Для количественной идентификации дефектов внутренней поверхности печи необходимо с большей степенью точности (погрешность не более 10%) определять исходные параметры, характеризующие теплофизические свойства материалов корпуса и внешнюю поверхность печи.
2. Для исходных параметров, характеризующих внутреннюю поверхность печи, клинкер и топочные газы большой точности не требуется.
3. Отклонения при измерении температуры внешней поверхности в десять градусов приводят к средней погрешности в оценке толщины теплозащитной обмазки в один сантиметр.
4. Итогом проведенных численных исследований явился вывод о достаточной адекватности модели, реализующей упрощенную постановку обратной задачи для целей идентификации опасных дефектов внутренней поверхности печи.
5. Проведенные исследования разработанных моделей печи и анализ влияния внутренних и внешних воздействий на ее параметры позволяют перейти к постановке и решению задачи разработки нового поколения аппаратуры контроля цементной печи и её программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торгунаков В.Г., Чигарев С.Т., Яманаев М.С. Стационарные системы ИК контроля высокотемпературных технологических процессов и оборудования.-В сб. Неразрушающий контроль и диагностика. Тезисы докладов 15 Российской научно-технической конференции, г.Москва, Россия, 1999, т.2. С.81.
2. Шубин В.И., Тюканов А.Е., Рудакас П.П. Система дистанционного контроля температуры корпуса вращающейся печи.-Цемент и его применение, 1999, №4. С.26-29.
3. Торгунаков В.Г., Суханов М.С. Имитационная модель тепловых процессов цементной печи.-Цемент, 1999, № 5. С.37-41.
4. Х.С. Воробьев, Д.Я. Мазуров. Теплотехнические расчеты цементных печей и аппаратов. – М.: Высшая школа, 1962. – 350 с.
5. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S. Inverse problem of Heat conduction in NDT Problems of dynamic objects.-KORUS 99.-The 3 Russian-Korean Symposium on Science and Technology, Novosibirsk, Russia, June 22-25, 1999, Vol.1. P.209.