

УДК 621.384.3;681.3.01

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ В КОРПУСЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

В.Г. Торгунаков, М.С. Суханов, М.С. Яманаев

ООО «Научно-производственная фирма «Аналитика. Диагностика. Контроль», г. Томск
E-mail: vatm@mail.ru

Приведены результаты исследований по применению преобразования Фурье для идентификации локальных аномалий в корпусе вращающейся печи. Показано, что метод обладает простотой математического аппарата, оперативностью обнаружения обнаруживаемых аномалий. Приведен пример, когда всего через 1,5 ч после скола обмазки его расположение уверенно обнаруживается с помощью метода преобразования Фурье.

Ключевые слова:

Тепловой неразрушающий контроль, вращающиеся печи, термографические системы, идентификация аномалий корпуса печи, обработка цифровых сигналов.

Key words:

Infrared non-destructive control, rotating kilns, thermographic systems, identification of the kiln body anomalies, processing of digital signals.

Введение

Тепловой неразрушающий контроль вращающихся цементных печей производится с использованием инфракрасных термографических систем (пирометров, линейных сканеров, тепловизоров) [1]. Для обнаружения и регистрации параметров локальных аномалий корпуса печи применяют методы:

- идентификации аномалий по величине температуры внешней поверхности [2, 3];
- определения границ аномалий по максимуму градиента температуры внешней поверхности [4];
- определения внутренней границы корпуса печи с помощью решения одномерной обратной статической задачи теплопроводности [5], либо с помощью решения обратной динамической задачи [6].

Идентификация аномалий по величине температуры внешней поверхности позволяет обнаружить опасные дефекты при стационарном протекании тепловых процессов печи. Для примера рассмотрим термограммы наружной поверхности цементной печи № 6 Искитимского цементного завода, полученные в течение суток 30 октября 2008 г., рис. 1.

Распределение температур показано в палитре «Grey», широко применяемой в термографических исследованиях. Белому цвету палитры соответствует в данном случае 340 °С, а черному 100 °С. Простым визуальным обзором этих картинок трудно определить, где идет развитие аномалии. Яркие пятна на распределениях указывают на максимально нагретые области, температура в которых близка к предельно допустимой. Вместе с тем, расположение пятен в течение суток изменилось несущественно, что указывает на то, что развития опасных аномалий вроде бы не происходит (хотя это может

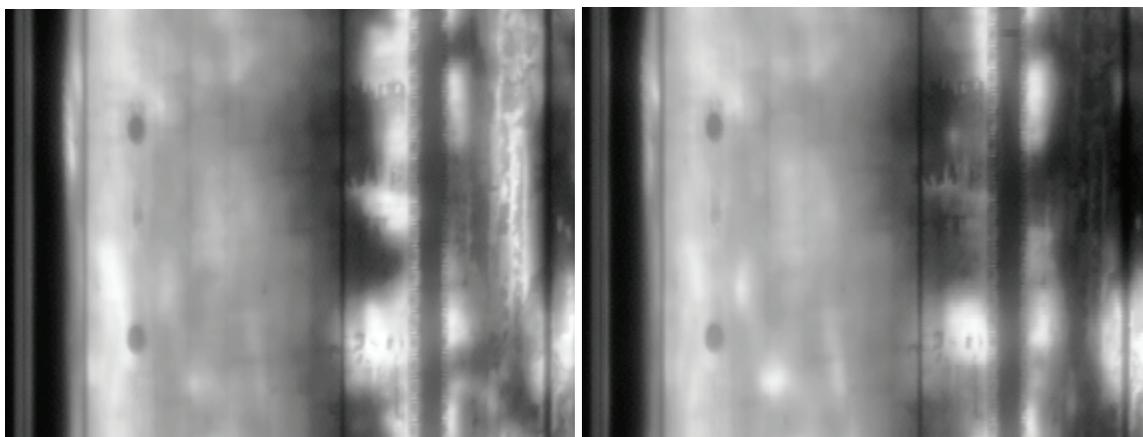


Рис. 1. Последовательность термограмм наружной поверхности печи в течение периода наблюдения (промежутки времени между термограммами 24 ч)

и не так). При этом температура в зоне опасного дефекта превышает температуру бездефектных зон на 60...120°, что составляет всего 25...35 % от максимальной амплитуды сигнала.

Для точного определения границ дефектов используют метод градиента сигнала [4], применение которого для рассмотренного выше случая проиллюстрировано на рис. 2.

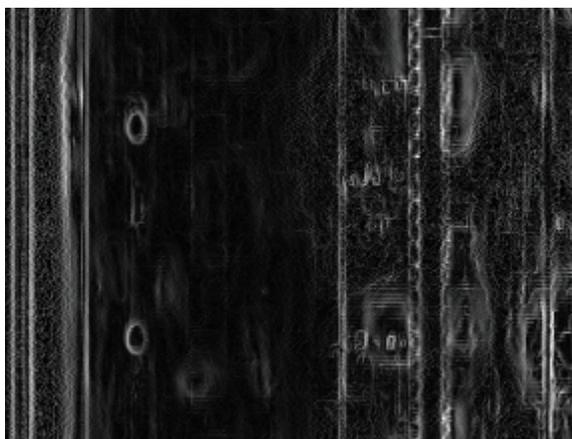


Рис. 2. Распределение градиента температур на поверхности печи в конце периода наблюдений

На этом распределении отчетливо выявлены границы опасных зон (видны светлые кольца). Вместе с тем, нет информации о развитии ситуации во времени, которая важна для обнаружения образующихся дефектов.

Для примера рассмотрим приведенное на рис. 3 изменение температуры в точке возникновения скола обмазки, рассчитанное с помощью модели тепловых процессов цементной печи [5].

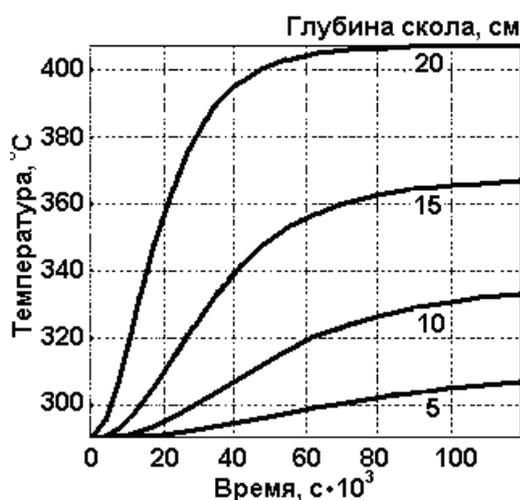


Рис. 3. Изменения температуры внешней поверхности, вызванные сколом обмазки различной глубины

Видно, что изменения температуры через 3 ч после скола обмазки (10⁴ с) составляет всего 30° при начальной температуре 290 °С. При этом говорить уверенно об аномалии пока рано. Скол глубиной 20 см уверенно идентифицируется только через

10 ч. Кроме того, необходимо еще и решить задачу о локализации этого скола, что требует анализа динамики изменения температуры во всех точках термограммы.

Решение обратных статической и динамической задач теплопроводности [6] позволяет оперативно (3...5 ч) определять начало развития дефекта внутренней поверхности, но требует применения сложной математической модели тепловых процессов печи.

Таким образом, оперативная идентификация динамически образующихся локальных аномалий корпуса вращающейся печи представляет пока не до конца решенную проблему. В этой связи можно вспомнить о давно и хорошо известном методе преобразования Фурье.

1. Сущность метода преобразования Фурье для исследования динамики процессов

Одним из широко распространенных методов, используемых для обработки цифровых сигналов, является метод дискретного преобразования Фурье [7]. Суть метода применительно к задачам теплового контроля состоит в следующем: временную последовательность сигналов термографической аппаратуры представляют дискретным рядом Фурье (эта операция производится для каждой контролируемой точки поверхности печи).

Пусть на каждом временном шаге имеется кадр дискретных отсчетов – J строк по I отсчетов в каждой строке. Таким образом, за N временных интервалов имеем дискретное множество отсчетов $U_{i,j}^k$, $i=0, I$, $j=0, J$, $k=0, N$, где индекс j означает номер строки в k -м кадре, а i -номер точки в данной строке. Тогда для каждой точки можем получить дискретный ряд Фурье (конкретный вид формулы в различных источниках отличается множителем – нами применялась именно эта форма преобразования Фурье):

$$U_{i,j}^k = \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N X_{i,j}^n \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N+1}\right), \quad (1)$$

где $X_{i,j}^n$ – комплексная амплитуда n -й гармоники Фурье, которая определяется по формуле:

$$X_{i,j}^n = \sum_{k=0}^N U_{i,j}^k \exp\left(-j \frac{2\pi nk}{N+1}\right), \quad (2)$$

где j – мнимая единица. Для анализа динамических изменений обычно определяют абсолютное значение амплитуды первой гармоники для каждой точки поверхности печи $|X_{i,j}^1|$ (далее «амплитуда»). Превышение этой величины в какой-либо зоне по сравнению с остальной поверхностью указывает на развитие локальной аномалии. Формулы (1, 2) весьма просты, что выгодно отличает этот метод от других, ранее рассмотренных методов. Немаловажно, что метод не привязан к какой-либо физической или математической модели и поэтому его результаты не зависят от их адекватности объекту исследований.

2. Модельные исследования возможностей метода преобразования Фурье для теплового контроля цементной печи

Возможности метода преобразования Фурье исследовались сначала на модели. Использовалась имитационная модель тепловых процессов цементной печи [5]. Для моделирования были взяты исходные данные, приведенные в таблице.

Изучалось распределение амплитуды первой гармоники через 1,5 ч после скола обмазки, изменение температуры для которого иллюстрировалось на рис. 3. Временной промежуток между отсчетами составлял 1 ч. Анализировался временной интервал 15 ч. Распределения амплитуды первой гармоники преобразования Фурье вдоль корпуса печи для различной глубины скола представлены на рис. 4 в двух вариантах (при отсутствии шумов и при их наличии).

Таким образом, уже через 1,5 ч применение метода преобразования Фурье позволило обнаружить опасный скол обмазки корпуса печи – другим методам требуется для этого 3...5 ч.

3. Экспериментальные исследования возможностей метода преобразования Фурье для идентификации локальных аномалий корпуса вращающейся печи

Исследования возможностей метода преобразования Фурье проводились также на эксперимен-

Таблица. Геометрические и теплофизические параметры материалов печи

| Общие данные: | | 2-й слой (кирпичная футеровка): | |
|---|---------------------|---|---------------------|
| Длина расчетной зоны, м | 30 | Материал – кирпич периклазо-хромитовый | |
| Диаметр печи, м | 4,5 | Толщина, м | 0,25 |
| Степень черноты внешней поверхности | 0,7...0,9 | Теплопроводность, Вт/(м·К) | 2,6 |
| Время расчета, с | $5 \cdot 10^5$ | Температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$ | $8,6 \cdot 10^{-7}$ |
| Степень заполнения печи, % | 10 | 3-й слой (теплозащитная обмазка): | |
| Частота вращения печи, об/мин | 1,5 | Материал – клинкер | |
| Угол наклона печи, % | 3,5 | Толщина, м | 0,23 |
| Температура окружающей среды, °С | 25 | Теплопроводность, Вт/(м·К) | 1,7 |
| Температура газов, °С | 1800 | Температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$ | $7,2 \cdot 10^{-7}$ |
| 1-й слой (стальной корпус): | | Клинкер: | |
| Материал – сталь СТ-5 | | Теплопроводность, Вт/(м·К) | 1,7 |
| Толщина, м | 0,05 | Температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$ | $7,2 \cdot 10^{-7}$ |
| Теплопроводность, Вт/(м·К) | 38 | Угол естественного откоса клинкера, град. | 40 |
| Температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$ | $7,4 \cdot 10^{-6}$ | Начальная температура на входе в расчетную зону, °С | 1350 |

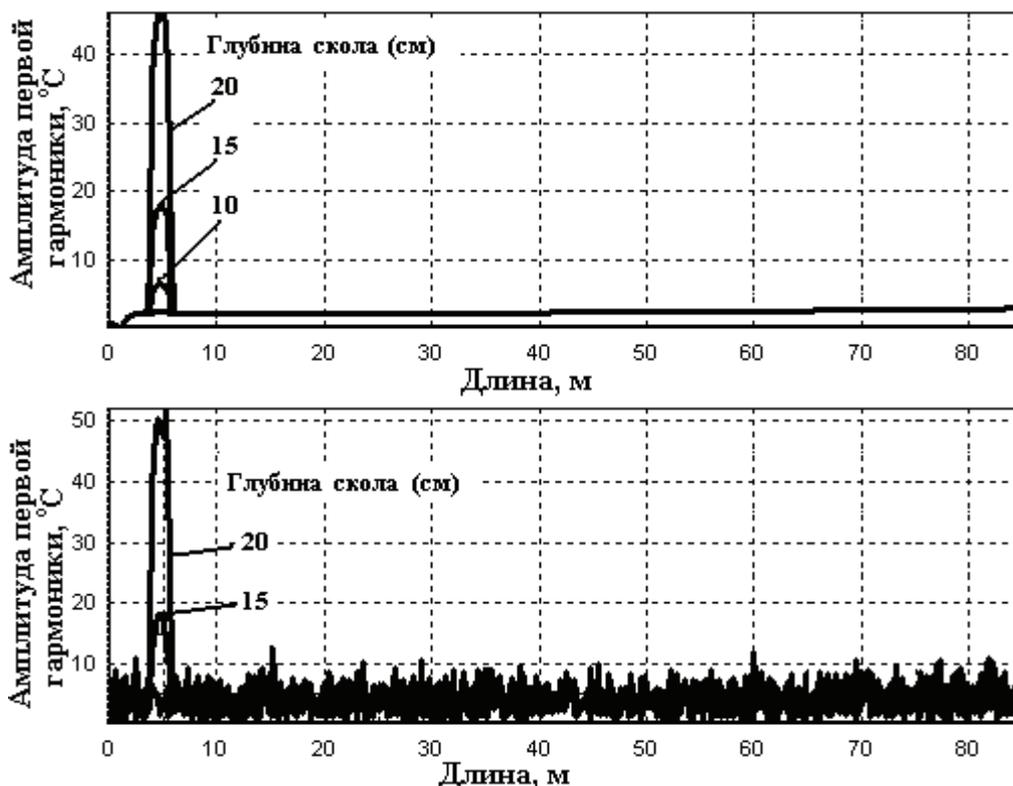


Рис. 4. Распределения амплитуды первой гармоники преобразования Фурье вдоль корпуса печи для различной глубины скола обмазки при наличии гауссовского шума с амплитудой 4° (нижняя часть рисунка), и без шума (верхняя часть рисунка)

тальных данных, полученных с использованием термографической системы на печи № 6 Искитимского цементного завода. Обработывались данные, полученные в течение суток 30 октября 2008 г.

На рис. 5 показано распределение первой гармоники преобразования Фурье на поверхности печи (длительность временного окна – 12 ч) в конце периода наблюдений.

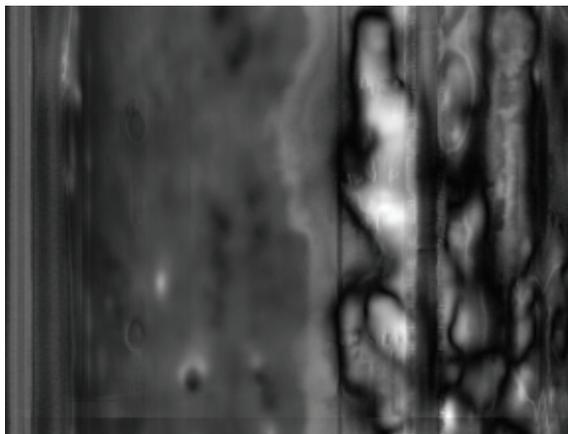


Рис. 5. Распределение первой гармоники преобразования Фурье в конце периода наблюдений (длительность временного окна – 12 ч)

Для более наглядного представления приведем график распределения первой гармоники Фурье на поверхности печи вдоль линии, проходящей через точку с максимальной амплитудой этой гармоники, рис. 6.

На рис. 5 отчетливо видны яркие пятна, которые указывают на расположение предполагаемых аномалий. Из рис. 6 видно, что амплитуда первой гармоники в дефектной зоне вдвое больше, чем в других местах поверхности печи. Детальный анализ в точке предполагаемой аномалии показывает уменьшение температуры на 100° за 16 ч, рис. 7.

Изменение температуры, рис. 7, связано с образованием настыли толщиной 10...15 см. Приведенные модельные и экспериментальные примеры показывают, что применение преобразования Фурье для обработки термограммы на реальной печи ускоряет поиск локальных аномалий несмотря на то, что первая гармоника преобразования характеризует только изменения температуры поверхности печи во времени, когда не ясно, чем вызваны эти изменения и в какую сторону они направлены. В итоге решена главная проблема – динамически развивающиеся аномалии оперативно выявлены. Затем эти аномалии могут быть подвергнуты более тщательному анализу с использованием более сложных методов, о которых было упомянуто во введении.

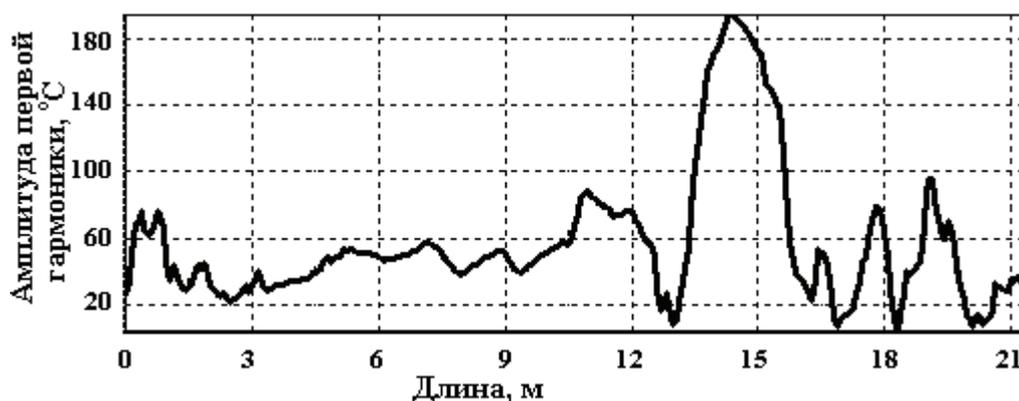


Рис. 6. Распределение первой гармоники преобразования Фурье в конце периода наблюдения (длительность временного окна – 12 ч) вдоль линии, проходящей через точку с максимальной амплитудой этой гармоники

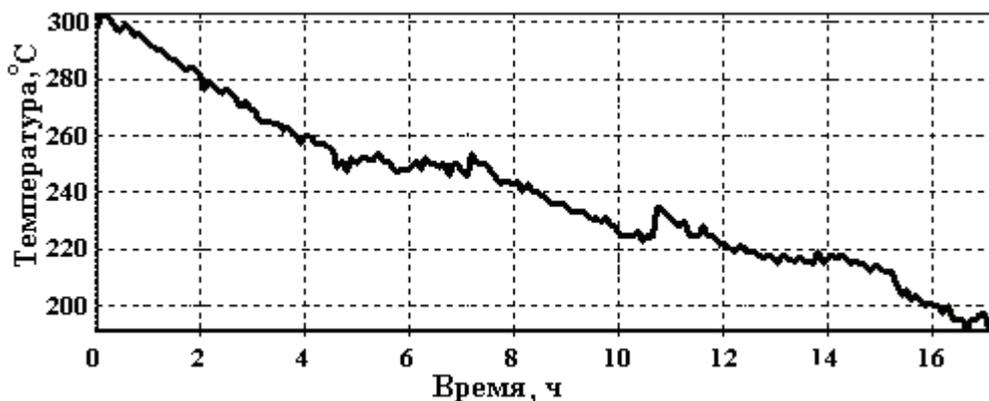


Рис. 7. Изменение температуры в точке предполагаемой аномалии за 16 ч

Выводы

1. Метод Фурье-преобразования позволяет оперативно выявлять в корпусе печи с толстым металлическим кожухом сколы обмазки, выпадение кирпичей футеровки, образование настилей и другие опасные дефекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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: В сб. трудов VII Междунар. научно-техн. конф. – Череповец, Россия. – 16–18 сентября 1997. – Череповец, 1997. – С. 45–46.
2. Торгунаков В.Г., Суханов М.С., Яманаев М.С., Чигарев С.Т. Идентификация дефектов внутренней поверхности цементной печи // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 5. – С. 179–184.
3. Гнедина И.А., Соколинская Г.А. Определение толщины обмазки в зоне спекания вращающихся печей // Цемент и его применение. – 1979. – № 2. – С. 15–16.

2. Для ранней диагностики образующихся дефектов внутренней поверхности печи метод Фурье-преобразования следует использовать в сочетании с решением обратной задачи теплопроводности.

4. Вавилов В.П., Ширяев В.В. Способ определения поперечных размеров внутренних дефектов при тепловом методе контроля // Дефектоскопия. – 1979. – № 11. – С. 101–103.
5. Суханов М.С., Торгунаков В.Г. Имитационная модель тепловых процессов цементной печи // Цемент и его применение. – 1999. – № 5. – С. 37–41.
6. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S., Vavilov V.P. Identifying hidden defects in thermal insulation of revolving kilns by IR thermography // Proc. SPIE «Thermosense-XXIX». – V. 6541. – Orlando, Florida, USA, 2007. – P. 131–143.
7. Лайонс Р.Л. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. – М.: Бинном, 2007. – 652 с.

Поступила 09.10.2009 г.

УДК 662.612.321

ЗОЛОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ В КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ НЕМОЛОТОГО УГЛЯ

Б.В. Лебедев

Томский политехнический университет
E-mail: bl2596@gmail.com

Представлены результаты экспериментального исследования процессов преобразования минеральной части бурого угля в котле и возникновения натрубных золовых отложений при безмельничной технологии сжигания. Показаны количественные и качественные особенности формирования химического состава отложений на конвективных поверхностях нагрева.

Ключевые слова:

Плотные отложения на трубах, сульфатизация, безмельничное сжигание, химический состав, энергетический котел.

Key words:

Dense adjournment on pipes, sulphatization, anmilled burning, chemical composition, power boiler.

Введение

Возможность создания малогабаритного универсального парогенератора, работающего без ограничений по шлакованию при сжигании всей гаммы углей Канско-Ачинского бассейна, всегда была привлекательна для конструкторов, несмотря на очевидную необходимость поиска нетривиальных решений по организации топочных процессов. Одним из активно обсуждаемых подходов к осуществлению такого проекта является низкотемпературный вихревой (НТВ) способ сжигания твердого топлива [1]. В связи с этим исследования свойств минеральных продуктов сжигания и их проявлений относительно поверхностей нагрева котлов с НТВ-топками имеют большое значение

для развития котельно-топочной техники нового поколения. Особенно уникальными они являются применительно к головному образцу котла БКЗ-420-140-9, который был единственным в практике котлостроения агрегатом, спроектированным и изготовленным в заводских условиях специально для безмельничного сжигания бурого угля, и рассматривался как альтернатива традиционной пылеугольной технологии.

Объект исследования

Исследования образования отложений на трубах поверхностей нагрева выполнены в натуральных условиях действующего котла (рис. 1) в ходе несения эксплуатационной нагрузки при сжигании ря-