

комендуются для предварительной обработки результатов ТК. При этом во многих случаях, по крайней мере, не худшие результаты обеспечиваются исходными термограммами, зарегистрированными в момент максимальных температурных сигналов.

- Иллюстрации результатов развитой обработки сигналов приведены для ТК коррозии в толстостенных стальных и тонкостенных алюминиевых изделиях, а также композитах и титановых сотах.
- «Неприятной» особенностью применения метода Фурье и МАГК в ТК является непредсказуемость результатов в смысле максимизации отношения сигнал/шум, что требует проведения исследований в каждой конкретной задаче испытаний.

Список литературы

1. I.T. Jolliffe. Principal component analysis. – U.S.A., New York: Springer, 1986. – 168 p.
2. T. Will. Introduction to the Singular Value Decomposition. – U.S.A., Davidson College, 1999, www.davidson.edu/academic/math/will/svd/index.html.
3. «Factor Analysis». – http://www.stat.psu.edu/~jglenn/stat505/16_factor/05_factor_princomp.html.
4. D. Larose D. Data mining methods and models. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006. – 236.
5. A. Ciliberto, G. Cavaccini, O. Salvetti. Porosity detection in composite aeronautical structures // Infrared Physics & Technology. – 2002. – Vol. 43. – P. 139–143.
6. S. Hermosilla-Lara, P.-I. Joubert, D. Placko. Enhancement of open-cracks detection using a principal component analysis/wavelet technique in photothermal nondestructive testing. – Proc. Intern. Conf. Quant. Infrared Thermography QIRT'02, Dubrovnik, Croatia, Sept. 24–27, 2002. – P. 41–46.
7. В.П. Вавилов, С. Маринетти. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье // Дефектоскопия. – 1999. – № 2. – С. 58–71.
8. J. Lahiri, K. Srinivas, T. Siddiqui, V. Vavilov. IR thermographic inspection of filament wound CFRP shell samples // Proc. SPIE «Thermosense XXIX». – Vol. 6541. – P. 234–242.

УДК 621.384.3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧАХ ОБЖИГА МАТЕРИАЛОВ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ КОРПУСА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ

*В.Г. Торгунаков, М.С. Суханов, С.Т. Чигарев, М.С. Яманаев
НИИ Интроскопии при Томском политехническом университете*

Идентификация дефектов внутренней поверхности вращающейся печи (см. рис. 1.а) в настоящее время производится путем решения стационарной обратной задачи теплопереноса в одномерной геометрии [1–4]. Стационарность тепловых процессов является важным условием адекватности применяемой модели, однако, редко достижимым в промышленной практике. Во время перехода из одного стационарного состояния в другое погрешность идентификации глубины дефектов внутренней поверхности печи превышает допустимый уровень, они могут обнаруживаться со значительным опозданием после их возникновения.

К числу возмущений, вызывающих динамику тепловых процессов следует отнести следующие:

- изменение формы факела;

- скол внутренней поверхности;
- значительное по величине и длительное по времени изменение скорости ветра;
- интенсивное выпадение осадков;
- резкое изменение температуры окружающей среды.

Для таких случаев авторами был предложен способ идентификации дефектов внутренней поверхности печи на основе решения нестационарной обратной задачи теплопереноса в одномерной геометрии.

Рассмотрим цементную печь, состоящую (см. рис. 1.б) из двухслойного корпуса (стальной кожух и кирпичная футеровка), теплозащитной обмазки на внутренней поверхности печи, обжигаемого материала – клинкера.

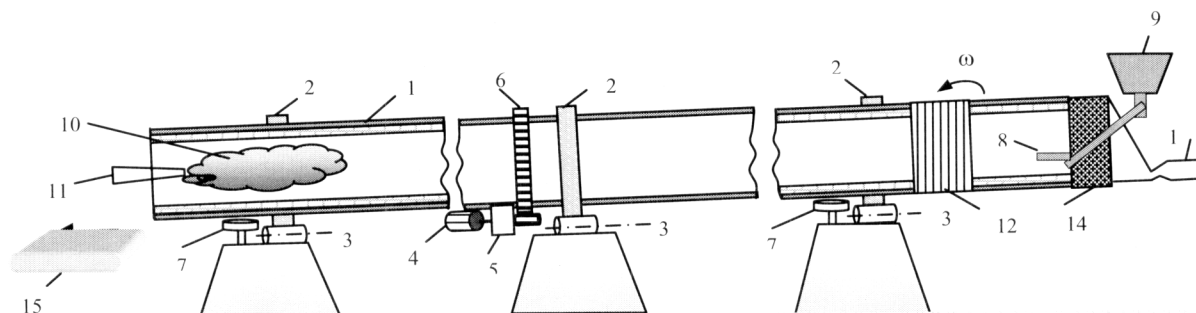


Рис. 1.а. Вращающаяся обжиговая печь:

1 – цилиндрический корпус; 2 – бандаж; 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

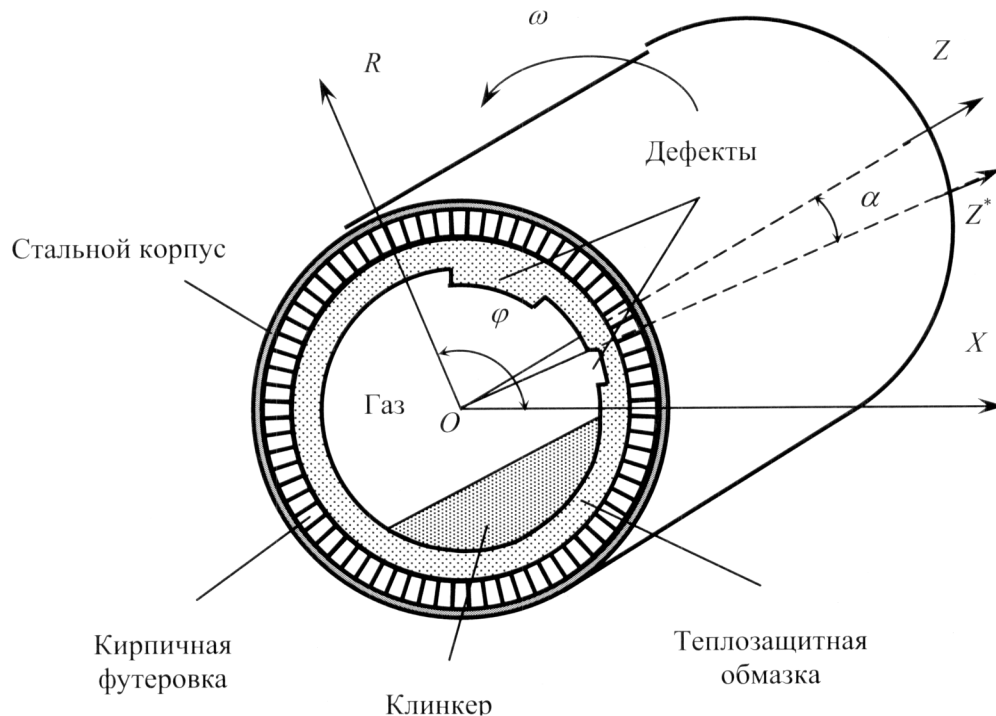


Рис. 1.б. Цементная печь в разрезе

(R, φ, Z -цилиндрические координаты, связанные с осью симметрии печи,
 XOZ^* -горизонтальная плоскость, α -уклон печи, ω -угловая скорость вращения)

Применим естественную в данном случае цилиндрическую систему координат. Используем общепринятые обозначения координат – осевую координату будем обозначать латинской буквой Z , радиальную координату – буквой R и угловую координату – греческой буквой φ . В математической литературе такой выбор координат принято называть $R - \varphi - Z$ геометрией. Будем считать, что все пространство корпуса печи состоит из множества элементарных ячеек малого размера. Для получения таких ячеек применим пространственную сетку 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 такого узла очертим поверхности равного влияния узлов. Ячейки, полученные таким способом, называются ячейками Дирихле [5] (рис. 2). Самый внешний цилиндрический слой узлов зададим на внешней границе печи. Каждый переход от одного слоя к другому будет обязательно совпадать с одним из координатных слоев. В клинкере и газе зададим узлы, зависящие только от координаты Z .

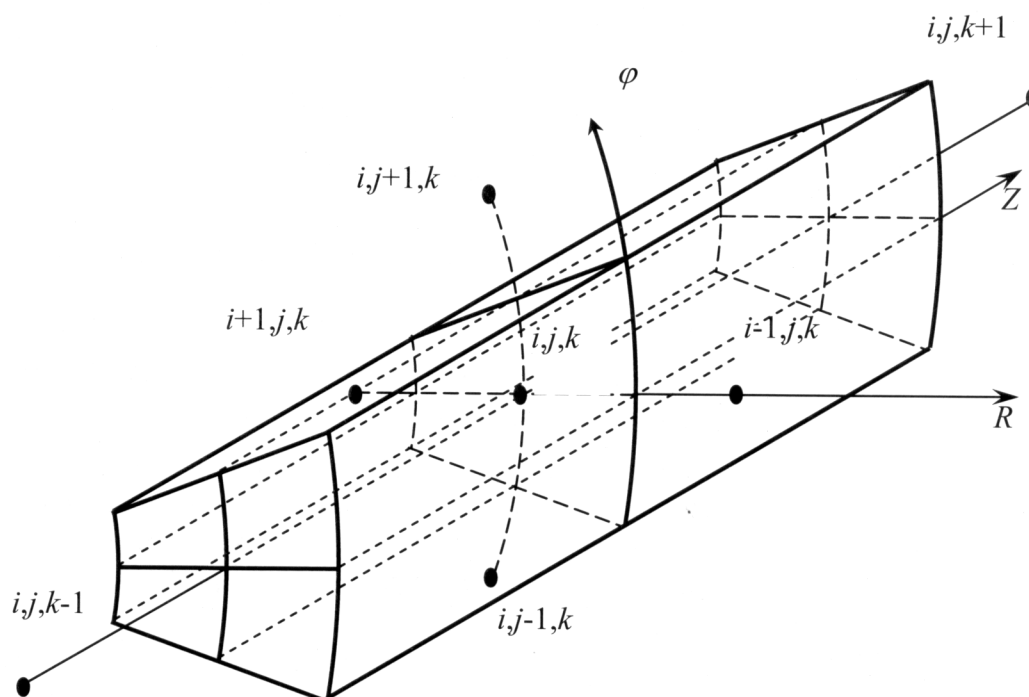


Рис. 2. Ячейка Дирихле для узла i, j, k

Наличие большого числа возмущающих воздействий, учитываемых при исследованиях, практически не оставляет другого выбора метода моделирования, кроме метода расщепления по физическим процессам [5,6]. Комплекс одновременных взаимосвязанных процессов заменяется поочередным моделированием каждого из них в последовательные моменты времени. В нашем случае такими последовательно моделируемыми процессами будут процессы теплопередачи вдоль радиуса, оси и по азимуту. При построении модели в R -геометрии сделаем следующие упрощающие допущения:

- теплоперенос путем теплопроводности вдоль координат Z и φ незначителен по сравнению с теплопереносом вдоль радиуса и теплопереносом, обусловленным механическим перемещением клинкера;
- клинкер хорошо перемешивается и температура его зависит только от Z .

Запишем процесс теплопереноса вдоль радиуса без учета распространения тепла вдоль других координат. Для ячеек Дирихле, расположенных в корпусе вдоль радиуса и не граничащих с газовой средой, уравнение теплового баланса записывается в виде:

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

где $C\rho_{i-\frac{1}{2},j,k}$ – произведение плотности на теплоемкость для той половины ячейки Ди-

рихле, 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 Ди-

рихле, 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 граница между зонами с различными теплофизическими свойствами проходит по поверхностям сетки, параллельным оси поверхности $R-\varphi$ или поверхности $R-Z$, левая и правая части уравнения (1) разбиваются на соответствующее число слагаемых.

Для ячеек Дирихле, расположенных на внутренней поверхности печи, в балансе следует учесть:

- процесс лучистого теплообмена с газом, занимающий долю $1-\theta$ от всего времени;
- процесс конвективного теплообмена внутренней поверхности печи с клинкером, занимающий долю θ от всего времени.

Тогда тепловой баланс для такой ячейки можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
& C\rho_{i-\frac{1}{2},j,k} V_{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta t} = \lambda_{i-\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i-1,j,k}^{n+1}}{l_i} S_{i-\frac{1}{2}} + \\
& + (1-\theta) \cdot \alpha_{газ} \cdot (T_k^{газ} - T_{i,j,k}^{n+1}) \cdot S_i + \theta \cdot (T_k^{кл,n+1} - T_{i,j,k}^{n+1}) \cdot S_i.
\end{aligned} \quad (2)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$C_{кл} \rho_k^{кл}$ – произведение плотности на удельную теплоемкость для ячейки клинкера, примыкающей к данной ячейке Дирихле;

$V_k^{кл}$ – объем ячейки клинкера;

$T_k^{кл,n+1}$ – температура ячейки клинкера на $n+1$ временном слое;

$T_k^{газа}$ – температура топочных газов, зависящая от Z (считается известной с погрешностью ± 50 °С;

$\alpha_{газа}, \alpha_{кл}$ – соответственно, коэффициенты теплообмена внутренней поверхности с топочными газами и клинкером;

θ – доля времени, в течение которого ячейки Дирихле находятся под клинкером.

Для ячеек клинкера уравнение теплопереноса записывается в виде:

$$C\rho_k^{кл} V_k^{кл} \frac{T_{i,j,k}^{кл,n+1} - T_{i,j,k}^{кл,n}}{\Delta t} = \alpha_{кл} (T_{i-1,j,k}^{n+1} - T_k^{кл,n+1}) S_i \theta + \\ + \alpha_{газа} \cdot (T_k^{газа,n+1} - T_k^{кл,n+1}) \cdot \frac{S_{кл}}{N_j} + Q_{кл} (T_{k-1}^{кл,n+1} - T_k^{кл,n+1}) \cdot C_{кл}, \quad (3)$$

где $Q_{кл}$ – производительность печи в кг/с.

Для ячеек кожуха, граничащих с окружающей средой, уравнение теплопереноса вдоль радиуса может быть записано в виде:

$$C\rho_{i+\frac{1}{2},j,k} V_{i+\frac{1}{2},j,k} \cdot \frac{T_{i,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \lambda_{i+\frac{1}{2},j,k} \frac{T_{i-1,j,k}^{n+1} - T_{i,j,k}^{n+1}}{l_{i-1}} S_{i+\frac{1}{2}} + \alpha_{возд} \cdot (T_{возд} - T_{i,j,k}^{n+1}) \cdot S_i. \quad (4)$$

где $\alpha_{возд}$ – эффективный коэффициент теплообмена с окружающей средой, учитывающий как конвективный, так и лучистый теплообмен, определяемый по формуле [7]:

$$\alpha_{возд} = 5.5 + 2 \cdot V + 0.0077 \cdot T_{i,j,k}^n \cdot (1 + 0.27 \cdot V) + \\ + \frac{1}{0.45 + V \cdot D} + \sigma \cdot \frac{(\varepsilon_{ст} \cdot (T_{i,j,k}^n)^4 - \varepsilon_{возд} \cdot T_{возд}^4)}{T_{i,j,k}^n - \varepsilon_{возд} \cdot T_{возд}}, \quad (5)$$

где V – скорость ветра;

D – диаметр печи;

$T_{возд}$ – температура воздуха.

В процессе непрерывного слежения за изменениями параметров печи нам все время будут известны значения температуры $T_{i,j,k}^n$ на текущем n – ом шаге по времени. На следующем шаге по времени необходимо применить итерационный процесс подбора толщины обмазки в текущей точке внутренней поверхности с целью максимального совпадения рассчитанных температур внешней поверхности $T_{i,j,k}^{n+1}$ с наблюдаемыми. При этом мы должны применить этот процесс для всех точек внешней поверхности печи, используя в качестве прямой модели теплопереноса уравнения (1–5). Такая интерпретация обратной задачи теплопереноса для идентификации внутренней границы корпуса печи уже близка к решению полномасштабной трехмерной обратной задачи теплопереноса.

Первые расчеты по описанному алгоритму динамической идентификации дефектов внутренней поверхности показали, что этот алгоритм является неустойчивым по отношению к малым возмущениям температуры внешней поверхности. На рис. 3 показана временная зависимость величины внутреннего радиуса слоя обмазки, идентифицируемого с помощью алгоритма динамической идентификации, а также временная зависимость этой же величины, идентифицируемой с помощью алгоритма статической идентификации.

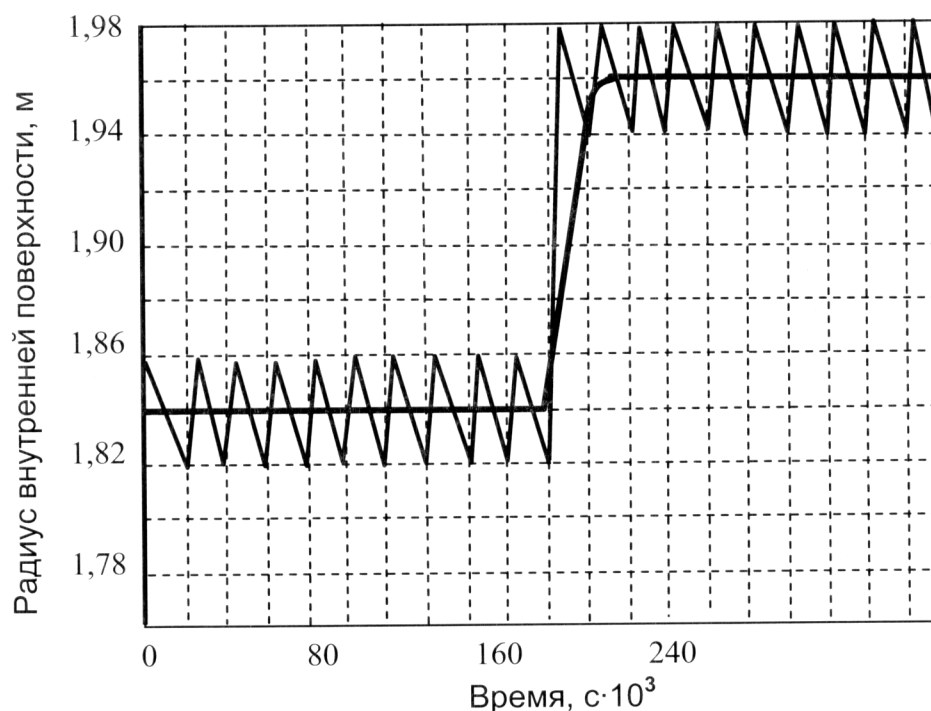


Рис. 3. Величина внутреннего радиуса слоя обмазки, идентифицируемой с помощью алгоритма динамической идентификации (зигзагообразная линия) и эта же величина, идентифицируемая с помощью алгоритма статической идентификации (сплошная линия). В момент времени $t \approx 200000$ секунд смоделирован скол обмазки глубиной 10 сантиметров

До скола обмазки величина внутреннего радиуса печи идентифицируется весьма неустойчиво. Этого результата можно было ожидать, поскольку малые возмущения в температуре внешней поверхности можно трактовать как начало переходного процесса вследствие мгновенных значительных изменений радиуса внутренней поверхности печи. Поскольку возмущения температуры внешней поверхности могут быть вследствие ошибок измерения или, как в случае нашего моделирования, вследствие погрешностей вычисления, то очевидно, что алгоритм динамической идентификации радиуса внутренней поверхности будет заведомо неустойчивым.

Вместе с тем в момент скола обмазки критикуемый нами алгоритм на первом же временном шаге расчета с приемлемой погрешностью определил новый радиус внутренней поверхности. Поэтому, данный алгоритм не следует полностью отвергать. Для придания устойчивости процессу идентификации дефектов внутренней поверхности печи мы предлагаем применять алгоритм решения нестационарной обратной задачи теплопередачи только для случаев, когда изменения наблюдаемой температуры внешней поверхности за один временной дискрет превышают некоторую пороговую величину но не более, чем на величину, характерную для скола грязевой корки. При скоростях изменения температуры внешней поверхности, не превышающих упомянутый порог, а также при скорости изменения, характерной для скола грязевой корки, следует применять алгоритм статической идентификации [2, 3]. На рис. 4 показан ход идентификации радиуса внутренней поверхности печи с использованием указанного комплексного метода.

Представленный график иллюстрирует, что неустойчивость динамического алгоритма идентификации сведена до приемлемого уровня. Колебания вычисленного радиуса внутренней поверхности, обусловленные неустойчивостью, не превышают 1,5 см. Таким образом, сочетание стационарной и нестационарной обратных задач позволяет с достаточной оперативностью идентифицировать опасные для промышленной практики изменения внутренних границ печи.

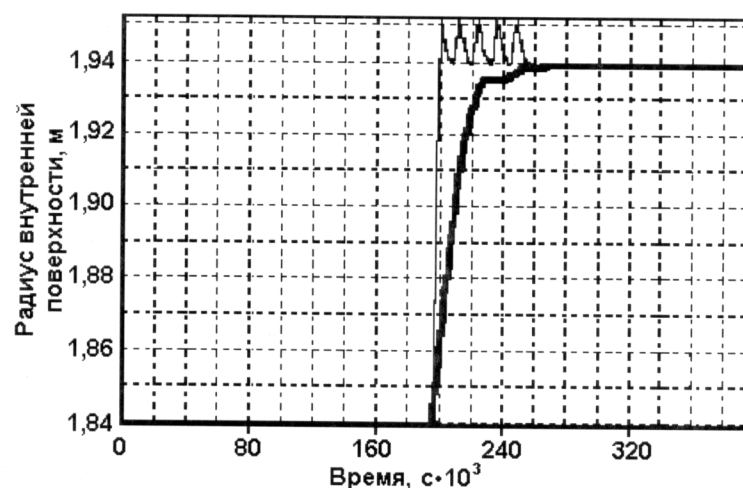


Рис. 4. Величина внутреннего радиуса слоя обмазки, идентифицируемой с помощью комплексного алгоритма идентификации (тонкая линия) и эта же величина, идентифицируемая с помощью алгоритма статической идентификации (толстая линия). В момент времени $t \approx 200000$ секунд смоделирован скол обмазки глубиной 10 сантиметров

Разработанное прикладное программное обеспечение «Обжиг $R - \varphi - Z$ » реализует описанные алгоритмы идентификации дефектов внутренней поверхности:

- алгоритм статического определения толщины обмазки, применяемый при малых скоростях изменения температуры внешней поверхности;
- алгоритм динамического определения толщины обмазки, применяемый при больших скоростях изменения температуры внешней поверхности.

Результаты вычислений толщины обмазки могут индексироваться как в виде профилограмм, так и в виде цветовой карты, как это показано на рис. 5. На приведенной картограмме видно, что максимальная толщина обмазки в контролируемой зоне составляет 21 см, а минимальная — 10 см. Проиллюстрирован профиль обмазки вдоль оси на выбранной аксиальной координате. Выявленные дефекты ранжируются по степени значимости и регистрируются в карте дефектности объекта (см. рис. 6).

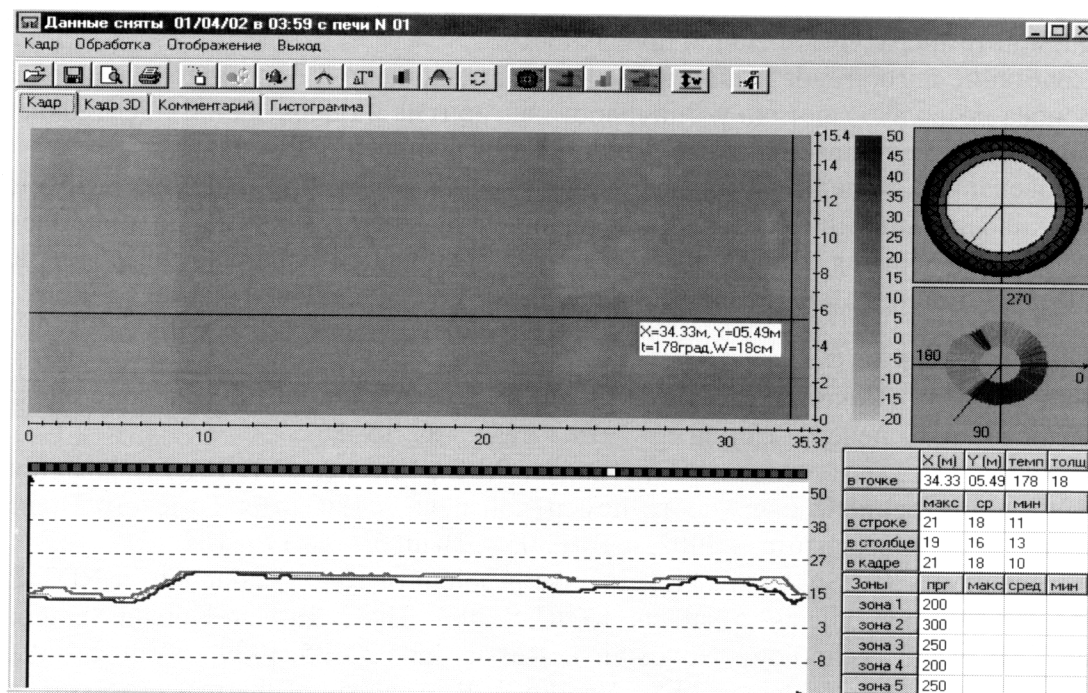


Рис. 5. Картограмма толщины обмазки

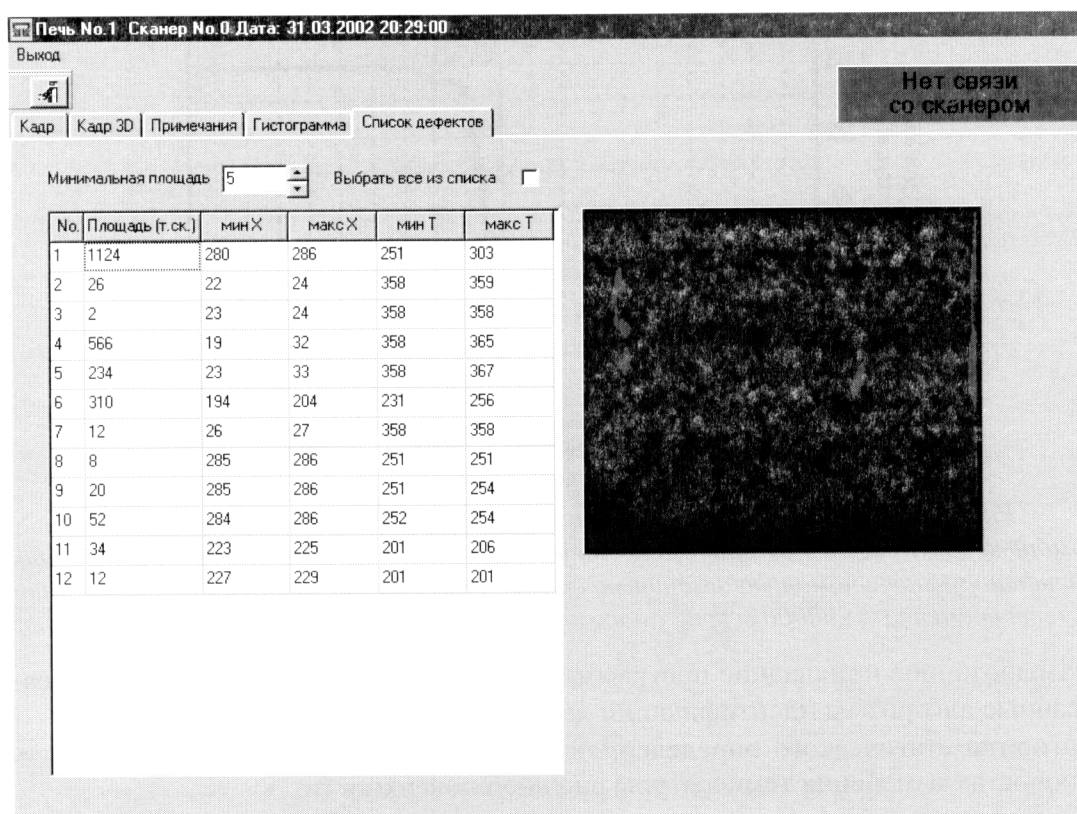


Рис. 6. Карта дефектности зоны контроля

Выводы

1. Для оперативного обнаружения дефектов внутренней поверхности вращающейся обжиговой печи необходимо учитывать динамические изменения, происходящие во время переходных процессов из одного стационарного состояния в другое.
2. Численное решение нестационарной обратной задачи теплопереноса в одномерной геометрии обладает свойством неустойчивости к малым изменениям наблюдаемой температуры внешней поверхности.
3. Сочетание алгоритмов стационарной и нестационарной обратных задач теплопереноса позволяет достичь устойчивости алгоритма и оперативной идентификации больших изменений границы внутренней поверхности печи.
4. Проведенная экспериментальная проверка данного алгоритма показала, что неустойчивость динамического алгоритма идентификации сведена до приемлемого уровня. Колебания вычисленного радиуса внутренней поверхности, обусловленные неустойчивостью, не превышают 1,5 см.

Список литературы

1. Гнедина И.А., Соколинская Г.А. Определение толщины обмазки в зоне спекания вращающихся печей // Цемент. – 1979. – № 2. – С. 15–16.
2. Суханов М.С., Торгунаков В.Г., Яманаев М.С., Чигарев С.Т. Идентификация дефектов внутренней поверхности цементной печи // Известия Томского Политехнического университета. – 2002. – Том 305. – Вып. 5. – С. 179–184.
3. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S. Inverse problem of Heat conduction in NDT Problems of dynamic objects. Abstracts. KORUS 99. – The 3 Russian-Korean Symposium on Science and Technology, Novosibirsk, Russia, June 22–25, 1999. – Vol. 1. – P. 209.
4. 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 Thermogra-

phy 5 «QIRT-2000». – Proceedings of Eurotherm Seminar № 64. – Reims, France, July 18–21, 2000. – P. 150–155.

5. Самарский А.А., Попов Ю.П. Разностные методы решения задач газовой динамики. – М.: Наука, 1992.
6. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1973. – 400 с.
7. Беседин П.В., Трубаев П.А., Нусс М.В. и др. Расчет потерь тепла через корпус цементных вращающихся печей // Цемент и его применение. – 2001. – № 2. – С. 13–17.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ ФУРЬЕ-АНАЛИЗА

Е.А. Уланова, Д.А. Нестерук
г. Томск, Россия

Показана реализация алгоритма фурье-анализа температуропроводности композиционных материалов. Исследования показали хорошее совпадение полученных результатов с теоретическими данными.

Существует ряд материалов, которые характеризуются более высокими значениями удельных прочностных и других характеристик по сравнению с металлами и сплавами. Композиционными называют искусственные материалы, получаемые сочетанием химически разнородных компонентов. Одним из компонентов является матрица (для полимеров – связующее) другим – упрочнители (волокна), т. е. новые материалы.

В связи с широким применением новых материалов в авиакосмической технике остро встал вопрос не только контроля дефектов, но и определения ТФХ данных материалов. Принимая во внимания анизотропные свойства этих материалов, определение ТФХ становится затруднительным.

Все теплофизические характеристики делятся на два типа: основные и динамические. К основным теплофизическим характеристикам материалов относятся:

- коэффициент теплопроводности λ ;
- теплоемкость C ;
- плотность ρ .

К динамическим ТФХ относятся:

- коэффициент температуропроводности $\alpha = \lambda / C \rho$;
- коэффициент тепловой активности, или тепловая инерция $e = \sqrt{\lambda C \rho}$.

Теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность являются важнейшими характеристиками веществ и материалов, так как входят в качестве коэффициентов во все уравнения аналитической теории теплопроводности. Количественные расчеты тепловых и температурных полей реальных тел возможны только тогда, когда известны конкретные значения теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности материала этих тел.

Для определения всего комплекса ТФХ необходимо знать характер пространственно-временных измерений температуры и количество тепла, поглощаемое или отдаваемое телом. Теоретической основой подавляющего большинства современных методов определения теплофизических свойств является теория теплопроводности.

Определение ТФХ возможно как контактными, так и бесконтактными методами. К контактными методам относятся: метод плоского слоя, метод продольного теплового потока, метод Егера и Дисселя-Хорста и т. д. К бесконтактным методам определения