

УДК 621.039.54

д.т.н., проф. **Мокрицкий В.А.** (ОНПУ)

д.т.н., проф. **Маслов О.В.** (ОНПУ)

к.т.н. **Банзак О.В.** (ОНПУ)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРА

В данной статье проведен сравнительный анализ известных алгоритмов компьютерной томографии ядерного топлива тепловыделяющих сборок реактора. Предложено применение эмиссионной гамма-томографии ядерного топлива с целью восстановления распределения продуктов деления на примере тепловыделяющих сборок реактора ВВР с 64 твэлами.

Ключевые слова: ядерное топливо, реактор, томографический анализ, продукты деления, алгебраическая реконструктивная томография.

Вступление. Ключевая проблема ядерной энергетики – радиационная безопасность – решается путем обеспечения надежности защитных барьеров основных объектов технологического процесса функционирования АЭС: твэлов, тепловыделяющих сборок, контуров передачи теплоносителя и др.

Методы томографического анализа объектов различной физической природы, т.е. восстановления физической структуры объекта по физическим полям, измеренным вне объекта, как правило, на замкнутой поверхности, зародились в 70-х годах 20 в. в связи с построением рентгеновских томографических изображений человеческих органов [1]. В 80 гг. томографические методы широко применялись уже в промышленности для обследования объектов в задачах дефектоскопии [1,2]. В большинстве разработанных к настоящему времени методов, как правило, используется активная томография, предполагающая наличие источника излучения, проходящего через обследуемый объект, и приемника (или группы приемников), регистрирующего прошедшее через объект излучение. Для анализа состояния ядерного топлива (ЯТ), в частности, тепловыделяющих сборок (ТВС), целесообразно использовать пассивную эмиссионную томографию, основанную на регистрации собственного гамма-излучения продуктов деления (ПД) ЯТ с последующим определением активности ПД внутри исследуемой ТВС.

Собственно задачам пассивной эмиссионной томографии ЯТ посвящено довольно ограниченное количество работ. Все они выполнены в Uppsala University (Department of Radiation Sciences, Uppsala, Sweden). В частности, в наиболее обстоятельной работе, как и в последующих работах шведских исследователей, ставилась задача обосновать теоретически пассивную эмиссионную томографию ТВС реактора BWR производства ABB Atom, Sweden квадратной формы, содержащего $8 \times 8 = 64$ круглых твэла [3]. Целью этих работ являлось установление отсутствия в ТВС одного или более твэлов, поскольку задача томографии ЯТ решалась в рамках программы по обеспечению нераспространения ядерных материалов.

Основная часть. Математические алгоритмы восстановления изображения внутренней структуры делятся на два класса [1]. Первый класс составляют алгоритмы, основанные на представлении изображения зарегистрированного приемниками излучения, в виде интеграла Радона или двумерного интеграла Фурье с последующим восстановлением изображения внутренней структуры анализируемого объекта путем численного решения интегрального уравнения. В работах [1,2] показано, что такая задача является некорректной, т.е. малые флуктуации измеренного поля ведут к большим ошибкам восстановления. В особенности это касается объектов, представляющих собой композицию участков с различной плотностью поглощения базового излучения. Именно такими объектами являются ТВС, где поглощение собственного излучения в двуокиси урана может на порядок и более превышать поглощение в стержневых отверстиях, заполненных водой.

Для объектов такого класса предложены методы алгебраической реконструктивной томографии (АРТ) (algebraic reconstructive tomography, ART) [4]. В алгоритмах восстановления этого класса интенсивность зарегистрированного в каждой точке поля представляется линейной комбинацией активности излучения от каждого пикселя, на которые делится поперечное сечение анализируемого объекта. По результатам измерений результирующей интенсивности излучения в N точках по периметру исследуемого объекта составляется системы из N линейных уравнений, которая решается по определенному алгоритму. Для высококачественного восстановления томограммы система должна быть переопределенной (т.е. должно выполняться условие $N \geq M$, где M – общее число твэлов в ТВС). Несмотря на то, что, как будет показано ниже, методы АРТ являются основными при пассивной эмиссионной томографии ЯТ, задача решения переопределенной системы линейных алгебраических уравнений также является некорректной и, следовательно, весьма чувствительной к измерительным шумам. Поэтому для ее решения применяются специальные алгоритмы восстановления.

Для решения задачи составлялась система уравнений:

$$\begin{pmatrix} w_{11}w_{12}w_{13}\dots w_{1N} \\ w_{21}w_{22}w_{23}\dots w_{2N} \\ w_{31}w_{32}w_{33}\dots w_{3N} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w_{M1}w_{M2}w_{M3}\dots w_{MN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ A_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_M \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где w_{mn} – вклад пикселя (элемента) n в измерение интенсивности в точке m ; A_n – активность пикселя (элемента) ТВС с номером n ; I_m – измеренная интенсивность в точке m .

Или в матричном виде:

$$WA=I.$$

Далее для установления активности элементов применялись три алгоритма реконструкции томограммы методом последовательных приближений [2]:

1. Equal Activity Correction (EAC).
2. Contribution Activity Correction (CAC).
3. Algebraic Reconstruction Technique (ART).

Все три алгоритма основаны на выборе начального приближения искомой матрицы активности в виде равноэлементной:

$$A_0 = \frac{\sum I_m}{\sum_{m,n} w_{mn}}. \quad (2)$$

Алгоритмы отличаются способом коррекции, вносимой на каждой последующей итерации.

При анализе всех описанных алгоритмов установлено, что, в связи с их итеративным характером, они обладают рядом недостатков:

– скорость сходимости их невысока (более того, сходимость их в общем случае вообще не доказана), соответственно время счета может быть велико настолько, что алгоритм может быть неприменим в реальном масштабе времени при осуществлении штатных технологических операций;

– все алгоритмы используют эмпирические стартовые параметры итерационного процесса, от которых также сильно зависит сходимость; в отдельных случаях неудачный выбор параметра итерационного процесса может увеличить время счета до недопустимых на практике значений, а может вызвать расходимость итерационного процесса.

Однако главным недостатком таких алгоритмов следует считать непригодность для решения задачи томографии в случае большого числа обусловленности матрицы весовых коэффициентов твэлов W . Напомним, что число обусловленности матрицы $cond(W)=\sigma_{max}/\sigma_{min}$ называется отношением максимального σ_{max} и минимального σ_{min} сингулярных чисел матрицы. Число обусловленности показывает “степень независимости” столбцов матрицы. Чем меньше по модулю число обусловленности, тем более “независимы” столбцы матрицы. Для матрицы коэффициентов вкладов твэлов ее столбцы получают весьма “зависимыми”, что приводит к плохой обусловленности задачи ART. Это, в частности, подтверждается тем, что увеличение измерительного шума до 2-3 % от средней измеренной интенсивности приводит к катастрофическим последствиям для качества

реконструируемой томограммы: при таком уровне шумов иногда не удается обнаружить отсутствующий в ТВС твэл [3].

Поэтому применение для реконструкции томограммы алгоритмов итеративного типа требует высокой точности измерений. Это, в частности, в работах шведских исследователей достигается сложной специально разработанной коллимационной системой. Кроме того, для качественного восстановления томограммы требуется большое число пикселей, и, как следствие, большое число угловых проекций, поскольку система проекционных уравнений должна быть значительно переопределенной.

Для реализации разработанного алгоритма компьютерной томографии ЯТ ВВЭР-1000 требуются современный CdZnTe-детектор с высоким разрешением или набор пространственно распределенных детекторов, цифровой γ -спектрометрический тракт и компьютер средней производительности для обработки и интерпретации результатов томографии. Для формирования пространственных проекций поля собственного излучения ТВС возможны несколько способов: дискретное угловое перемещение контролируемой ТВС вокруг собственной оси, размещение вокруг контролируемой ТВС достаточно большого количества детекторов, размещение на нескольких угловых положениях вокруг ТВС матриц детекторов гамма-излучения. Вне зависимости от способа реализации компьютерной томографии представляется весьма сложным с конструктивной точки зрения радиальное перемещение гамма-детектора или контролируемой ТВС. Поэтому далее компьютерная томография ЯТ исследуется только для угловых проекций собственного излучения ТВС.

При расположении детектора в n -ой точке наблюдения на расстоянии R_n от оси ТВС измеренная интенсивность гамма-излучения i -го изотопа с энергией E_γ в точке расположения детектора равна:

$$I_n^i = \sum_m A_{mi} k_{i\gamma} w_{mn} \varepsilon(E_\gamma), \quad (3)$$

где A_{mi} – активность i -го изотопа для m -го твэла с учетом его реального состояния; $k_{i\gamma}$ – выход γ -линии с номером γ для i -го изотопа; w_{mn} – коэффициент вклада m -го твэла в интенсивность излучения i -го изотопа с энергией E_γ , учитывающий эффекты ослабления при распространении пучка гамма-излучения от m -го твэла до n -ой точки наблюдения; $\varepsilon(E_\gamma)$ – эффективность регистрации детектора для энергии E_γ , $m=1, \dots, M$, где M – общее число твэлов в ТВС.

Методика расчета коэффициентов вкладов отдельных твэлов изложена ниже [1,2].

При измерениях в выделенном пике полного поглощения конкретного реперного изотопа без нарушения общности можно опустить постоянные $k_{i\gamma}$ и $\varepsilon(E_\gamma)$ и записать выражение (3) в упрощенном виде:

$$I_n = \sum_m A_m w_{mn}. \quad (4)$$

Принцип томографического исследования ТВС состоит в осуществлении n измерений интенсивности γ -излучения для различных взаимных расположений детектора и ТВС, в частности, для различных угловых положений детектора. Это дает возможность сформировать систему из n уравнений вида (4), которую обычно называют системой проекций в алгебраической реконструктивной томографии, в данном случае угловых.

Задачей алгебраической реконструктивной томографии является восстановление m значений активности твэлов A_m внутри ТВС для выбранного реперного изотопа путем решения полученной системы уравнений. В такой постановке в данной работе (в отличие от

[1]) формулируем задачу томографии по принципу "один твэл – один пиксель восстановленной томограммы". Возможна более детальная томография – путем деления площади поперечного сечения твэла на несколько пикселей в соответствии с конкретной геометрией ТВС. Однако приведенные ниже результаты моделирования показывают, что в этом нет практической необходимости.

При решении задачи проведены компьютерные эксперименты процесса томографии ТВС реакторов ВВЭР-1000 и РБМК. Ниже приводятся некоторые данные для ТВС ВВЭР-1000, которые справедливы в общем случае. Для формирования системы уравнений (4) рассчитывались измеренные интенсивности в 360 точках расположения детектора для постоянного расстояния "ось ТВС–детектор" (т.е. шаг поворота ТВС в захвате рабочей штанги перегрузочной машины принят равным 1 градусу). Для 331 элементов ТВС задавались активности реперных изотопов: для всех 312 твэлов – единичные, для 19 стержневых отверстий – нулевые. Таким образом, формировалась система уравнений проекций поля:

$$WA=I, \quad (5)$$

где W – матрица вкладов (весов) твэлов размерностью (360×331) ; A – вектор-столбец реконструируемых активностей твэлов размерностью (331×1) ; I – вектор-столбец измеренных интенсивностей размерности (360×1) .

Для имитации шумов, сопровождающих натурные измерения, на генерированные компоненты вектора I накладывался нормальный шум с дисперсией, равной 5-10 % от значения максимальной компоненты вектора I .

Согласно предлагаемому алгоритму, решение переопределенной системы (5) находится с применением псевдообратной матрицы Мура-Пенроуза:

$$A=W^{\#}I. \quad (6)$$

Псевдообратная матрица $W^{\#}$, соответствующая $(m \times n)$ матрице W однозначно определяется через компоненты разложения матрицы W по сингулярным числам согласно процедуре SVD-разложения.

Выводы. Проведенный анализ состояния вопроса позволил сделать выводы:

- существует принципиальная возможность применения эмиссионной гамма-томографии ядерного топлива с целью восстановления распределения продуктов деления на примере ТВС реактора BWR с 64 твэлами;
- для ТВС реактора ВВЭР-1000, содержащей значительно больше структурных элементов, требуется разработка нового, более эффективного алгоритма томографии;
- с точки зрения реализации томографии в реальном масштабе времени при проведении штатных операций с ЯТ, в частности, перегрузки, требуется достаточно высокая вычислительная эффективность алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Determination of the burnup of spent nuclear fuel during reloading / S. G. Oleinik, M. V. Maksimov, O. V. Maslov // Atomic Energy.– 2002, Vol. 92, No. 4, – P. 296–300.
2. Бронніков В. Перспективи розвитку ядерної електрогенерації в контексті завдань Енергетичної стратегії України / В. Бронніков, Л. Литвинський // Національна безпека і оборона – 2008. – №3 (97). – С. 42-45.
3. Маслов О.В. Исследование увеличения эффективности датчиков гамма-излучения с использованием монокристаллов CdZnTe / О.В. Маслов, О.В. Банзак, А.В. Карпенко // Вісник інженерної академії України. – № 1, 2012. – С. 143-145.
4. Маслов О.В. Анализ возможностей применения однотипных технических средств и методического обеспечения для контроля состояния ядерного топлива и ядерных материалов в реальном времени / О.В. Маслов, С.Г. Олейник, М.В. Максимов// Ядерная энергетика. Известия ВУЗОВ. – №. 1, 2004. – С. 87-97.

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

д.т.н., проф. Мокрицький В.А., д.т.н., проф. Маслов О.В., к.т.н. Банзак О.В.
**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВІДОМИХ АЛГОРИТМІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ
ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЗБОРОК РЕАКТОРА**

У даній статті проведено порівнювальний аналіз відомих алгоритмів комп'ютерної томографії ядерного палива, що виділяють тепло сборки реактора. Запропоновано застосування емісійної гамма-томографії ядерного палива з метою відновлення розподілу продуктів ділення на прикладі зборок реактора, що виділяють тепло BWR з 64 твелами.

Ключові слова: ядерне паливо, реактор, томографічний аналіз, продукти ділення, алгебраїчна реконструктивна томографія.

Prof. Mokritsky V.A., Prof. Maslov O.V., Ph.D. Banzak O.V.
**COMPARATIVE ANALYSIS OF KNOWN ALGORITHM COMPUTED TOMOGRAPHY
NUCLEAR FUEL REACTOR FUEL ASSEMBLIES**

In given clause the comparative analysis of known algorithms of a computer tomography of nuclear allocating warmly assembly a reactor is lead. Application issue scale-tomography of nuclear fuel with the purpose of restoration of distribution of fission products on an example allocating warmly assembly reactor BWR with 64 twels is offered.

Keywords: nuclear fuel, a reactor, tomography the analysis, fission products, an algebraic reconstructive tomography.