

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виргильев Ю.С. Реакторный графит и его свойства. М., ЦНИИэкономинформцветмет, 1990. 52 с.
2. Свойства конструкционных материалов на основе углерода. Справочник под ред. В.П. Соседова. М.: Металлургия, 1975. 336 с.
3. Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И., Шников Н.Н. Искусственный графит. М.: Металлургия, 1986. 272 с.
4. Чернявец А.Н., Гусман Н.О., Черных В.А. Оценка однородности хрупких материалов методами статистической теории прочности. — Цветные металлы, 1980, № 3, с. 59—62.
5. Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978. 272 с.
6. Виргильев Ю.С. Примеси в конструкционном графите и его работоспособность. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 1, с. 7—16.
7. Виргильев Ю.С. О вариации свойств конструкционного графита. — В кн.: Конструкционные материалы на основе углерода. Вып. XI. М.: Металлургия, 1977, с. 40—44.
8. Виргильев Ю.С. Пористость и некоторые другие физические свойства конструкционного графита. — Химия тв. топлива, 1973, № 5, с. 102.
9. Барабанов В.Н., Виргильев Ю.С. Радиационная прочность конструкционного графита. М.: Атомиздат, 1976. 80 с.
10. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых каналных реакторов. М., 1991. 255 с.
11. Лебедев И.Г. Размерная нестабильность графитов при высокотемпературном облучении в ядерном реакторе: Препринт НИИАР 19(822), 1991. 32 с.
12. Лебедев И.Г. Радиационная стойкость реакторного графита. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 6, с. 438—441.
13. Чернявский А.О. Прочность графитовых материалов и конструкций при малоцикловом нагружении. Дис. на соиск. ученой степени док. техн. наук. М., МВТУ, 1998.
14. Виргильев Ю.С. Изменение свойств углеродного материала при нейтронном облучении. — Физ. и хим. обработки материалов, 1996, № 1, с. 5—10.
15. Виргильев Ю.С. Изменение кристаллической структуры и вторичное распухание реакторного графита. — Изв. АН СССР (сер. неорганич. матер.), 1987, т. 23, № 2, с. 350—351.
16. Платонов П.А., Новобратская И.Ф., Туманов Ю.П., Карпукхин В.И. Влияние степени совершенства графита на изменение его свойств при облучении. — Атомная энергия, 1979, т. 46, вып. 4, с. 248—254.
17. Виргильев Ю.С., Калягина И.П., Киреева Г.Г. О вариации радиационной размерной стабильности конструкционного графита. — Там же, 1978, т. 44, вып. 5, с. 462—463.
18. Baldin V.D., Rodichenov B.S., Platonov P.A. et al. The state of graphite stack at Leningrad NPP, unit 2, after 16,5 years of operation. — In: Proc. of a Spec. Meet. Bath, UK, 24—27 sept. 1995, IAEA-TECDOC-901, 1996, p. 161—165.
19. Platonov P.A., Chugunov O.K., Manevsky V.N., Karpukhin V.I. Radiation damage and life-time evaluation of RBMK graphite stack. — Ibid, p. 79—90.
20. Виргильев Ю.С. Радиационное изменение размеров графитовых материалов и критерий их работоспособности. — Физ. и хим. обработки матер., 1992, № 4, с. 10—17.

Поступила в Редакцию 31.05.99

УДК 621.039.531

ТРАНСМИССИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МИКРОТОМОГРАФИЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТОПЛИВА И СРЕДСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРА

Лелеков В.И. (ВНИИАМ)

Надежность работы твэлов, ТВС, выгорающих поглотителей, стержней СУЗ и автоматического регулирования реактора во многом определяется первоначальным дефектным полем материалов оболочек, а также размещением по объему внутриболоочечного пространства материалов, топливных композиций, выгорающих композиций и композиций средств регулирования. Обеспечение качества перечисленных изделий потребовало разработки новых методов неразрушающего контроля, позволяющих на-

дежно проверять не только готовую продукцию, но и активно воздействовать на технологию изготовления. Совместно со специалистами ВНИИНМ им. А.А. Бочвара были определены контролируемые параметры: геометрия системы, разрешение дефекта по глубине залегания и его размер, длина и размер царапин на внешних и внутренних поверхностях оболочек конструкций, сколы, дефекты сварных швов в зонах заглушек, разрешение по измерению плотности композиций, находящихся во внутриоболочечном пространстве, производительность средств неразрушающего контроля и др. Эти задачи оказались актуальными для всех типов твэлов как стационарной, так и транспортной ядерной энергетики. Так, разрешение дефекта в этом случае составляет ~ 1 мкм, разрешение по плотности $\sim 1\%$. Поиск эффективных путей решения этой задачи привел к необходимости рассмотрения нового метода неразрушающего контроля — компьютерной томографии. Однако решение упомянутых задач, вытекающих из необходимости диагностировать изделия на микронном уровне, обуславливает специфические требования к приборной реализации метода, позволяет выделить совокупность применяемых решений в специфический метод — компьютерную микротомографию.

Развитие компьютерной микротомографии для неразрушающего контроля было начато с изучения областей ее возможного применения. Такой подход диктовался сложностью и наукоемкостью разработки и, следовательно, высокой стоимостью прибора. Поэтому выбор области применения базировался на двух основных предпосылках: высокой стоимости контролируемого изделия и существенности его влияния на надежность системы в целом и невозможности или малой эффективности других средств диагностики. Работы велись в рентгеновской, γ -, нейтронной, ультразвуковой, геликонной и ЯМР-областях. Однако наибольшее развитие к настоящему времени получила рентгеновская и γ -микротомография.

Приборная реализация метода требует взаимной увязки большого числа факторов, определяющих уровень разрешения, поиск областей применения — постоянного анализа технико-экономических показателей диагностической системы. Решение этих двух взаимосвязанных задач сделало необходимым разработку комплексной математической модели компьютерного микротомографа. В частности, для проектирования проблемно-ориентированных микротомографов трансмиссионного типа в рамках разработанной теории проектирования высокоразрешающих систем была реализована математическая модель [1, 2], основу которой составляет описание работы всех систем в процессе сканирования изделия. Основной частью модели является описание работы сканирующего блока: источника с коллимационной системой, объекта, детектора с коллиматорами.

В реальной ситуации наиболее удобным и надежным методом расчета взаимодействия излучения с веществом в областях сложной геометрической формы является метод Монте-Карло, позволяющий создавать сравнительно простые программы расчета потоков частиц и связанных с ними интегральных и дифференциальных параметров. Для получения пространственного, углового и энергетического распределения необходимо решать стационарное кинетическое уравнение Больцмана, или уравнение переноса излучения. Основная трудность решения этого уравнения любым методом состоит в том, что его коэффициенты являются сложными функциями энергии, углов и пространственных координат. Для определения коэффициентов уравнения Больцмана были рассмотрены сечения взаимодействия фотонов с веществом. Анализ показал, что данные о сечениях взаимодействия элементов, входящих в состав конструкции источника, объекты, сканирования, коллимационные элементы и детектор путем интерполяции можно дополнить и вычислить для любой энергии в интервале 0,01—100 МэВ (диапазон макро- и микротомографов) с удовлетворительной для применения точностью.

При составлении программного комплекса SIZIFA-SCANNER использовали блочно-модульный принцип построения архитектуры автоматизированных расчетных комплексов. Расчетная ячейка модели сканера ограничена по радиусу двумя коаксиаль-

ными цилиндрическими поверхностями, по углу — двумя плоскостями, проходящими через ось Z в начале координат, по высоте — двумя плоскостями, перпендикулярными оси. Сама ячейка внутри может быть дополнительно разделена поверхностями $Y = \text{const}$, $Z = \text{const}$, образующиеся при этом области являются физическими зонами и могут иметь разные характеристики. Описанный метод позволяет моделировать объект сканирования с учетом его физических характеристик.

Для определения точности прогнозирования параметров томографических рентгеновских систем экспериментальные данные распределения дозы точечного источника за коллимационной щелью были сопоставлены с расчетными. Отмечено хорошее согласие, что дало возможность широко применять такой подход.

С помощью расчетного комплекса возможно:

выполнять научно-исследовательские задачи, направленные на создание проблемно-ориентированных микромографов;

выбирать число источников, детекторов рентгеновской оптики и геометрии сканирования;

уточнять требования к параметрам источников излучения с учетом их спектральных характеристик (в том числе и оптимизация спектра), а также характеристикам детекторов и их виду;

изучать сигналы при сканировании объектов, что позволяет прогнозировать требования к электронной аппаратуре.

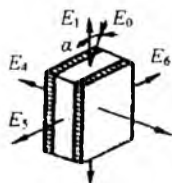
Моделирование процессов, происходящих в детекторе, дает возможность определить уровень сигналов, которые далее могут быть использованы, например, при их нормировке для создания пакета программ, предназначенных для восстановления изображения, измерения и обработки информации, выбора оптимального для данного случая набора таких программ или их модернизации, изучения эволюции характеристик сигнал—шум, а также введения поправок, обусловленных влиянием деформации спектра излучения, стабильности фокального пятна источника и др. Такой подход позволяет создать замкнутую комплексную модель любого микромографа, что важно в практике его создания, включая выбор стратегии введения поправок аппаратными или программными средствами. Разработанный рабочий комплекс имеет вторую модификацию, ориентированную на аналогичные исследования с помощью сканирования нейтронным пучком. При этом в качестве коэффициентов уравнения переноса используются сечения, характерные для взаимодействия нейтронов со сложнокомпозиционными веществами. Универсальность модулей позволяет решать также задачи позитронной томографии.

С помощью комплекса SIZIFA-SCANNER выполнены исследования, обосновавшие целесообразность разработки проблемно-ориентированного рентгеновского микромографа для ядерной технологии. На рис. 1 приведены результаты технико-экономических исследований, выполненных в рамках решения этой задачи, на рис. 2 — некоторые результаты изучения альтернативных вариантов, необходимых при создании детектирующего комплекса: эффективность работы детектора и зависимость от ха-



Р и с. 1. Изменение стоимостных показателей систем микромографа от уровня разрешения

E , отн. ед.	ZnSe	CaI
$E_0 = 1000, \alpha = 0^\circ$		
E_1	4,011	3,351
E_2	6,372	7,183
E_3	0,083	0,712
E_4	0,083	0,712
E_5	0,7296	0,235
E_6	0,296	0,235
$E_0 = 100, \alpha = 40^\circ$		
E_1	5,283	4,679
E_2	1,221	1,013
E_3	0,174	0,119
E_4	17,00133	16,57
E_5	0,1036	0,0022
E_6	0,106	0,0022



Р и с. 2. Диссипация энергии падающего излучения от стандартного рентгеновского источника

рактических принимаемого излучения и типа детектора. При этом рассматривались кристаллические и полупроводниковые типы детекторов, а также детекторные комплексы на базе детекторов прямой зарядки.

Исследования показали, что микрофотографы можно эффективно использовать в следующих основных вариантах:

в режиме компьютерного ОТК или постоянно действующего диагностического и метрологического комплекса с автоматизированной системой паспортизации промышленных изделий;

для высокоточного контроля состава образцов, изделий, в том числе и на стадии разработки, для отработки технологических процессов различного типа;

в составе автоматизированной системы управления качеством продукции в процессе ее изготовления; в этом случае микрофотограф включается в технологическую цепочку. Обнаруженные дефекты изделий или отклонение параметров от требуемых подвергаются качественной оценке, что позволяет генерировать соответствующую информацию для «обратной связи» в целях перенастройки элементов, входящих в технологическую цепь. Эта принципиально новая возможность позволяет автоматизировать и роботизировать сложную технологию и производство. В этом режиме микрофотограф может быть дополнительно оснащен специальным комплексом программ. Такой подход открывает принципиально новую возможность паспортизировать ресурс и показатели надежности выпускаемой продукции, так как при этом будут учитываться измеряемые параметры отклонений конкретного изделия;

не только как средство обнаружения дефекта, но и как систему для наведения рабочих органов в целях его устранения.

Создание универсального микрофотографа затруднительно, поэтому на базе расчетных комплексов разработан САПР, который позволяет проектировать микрофотограф разного типа и назначения с разными источниками сканирующего излучения и изменяемым расстоянием фокус—объект. Это дает возможность наиболее полно использовать в случае необходимости веерный пучок, острофокусность излучателя источника и получать высокое пространственное разрешение для объектов малого диаметра при неизменной геометрии сканирования. Секторное выполнение блока детекторов реализует режим цифровой рентгенографии или рентгенотелевидения, что дополнительно расширяет возможности микрофотографа.

Особо остановимся на системе обработки информации микрофотографов, допускающих гибкость при адаптации метода к условиям конкретной научной или научно-практической задачи [3]. Важность рассмотрения этой проблемы в существенной степени обусловлена ее влиянием на скорость обработки результатов измерений при сканировании объекта, следовательно, и на производительность прибора в случае его использования в реальных технологических процессах при производстве ядерного топлива.

Математические методы обработки данных томографических измерений. Сущность метода вычислительной томографии заключается в нахождении распределения количественного физического параметра $\mu(r)$, $r \in G$, который характеризует внутреннюю структуру объекта, по интегралам от этого параметра $p(\rho)$. Они измерены на некоторых многообразиях $L = L(\rho)$, $L \in G$ размерности меньшей, чем размерность области G , с последующим анализом решения на цифровом уровне и представлением его в форме, приемлемой для зрительного восприятия (визуализацией).

Основная задача вычислительной томографии состоит в нахождении решения интегрального уравнения

$$\int_{L(\vec{\rho})} \mu(r) dl = p(\vec{\rho}), \quad (1)$$

где r — финитная функция, определенная в области G ; $r, \rho \in G$; $G \subset R^n$; $n = 2, 3$.

Известны алгоритмы решения уравнения (1), которые принято называть алгоритмами реконструкции томографического изображения по проекциям. К ним относятся

алгоритмы, реализующие методы обратного преобразования Радона [4], свертки и обратных проекций [5], синтеза спектра искомого решения [6], основанные на алгебраизации задачи [7].

Регуляризирующие алгоритмы восстановления томографического изображения позволяют согласовать параметры обработки с погрешностью измеренных данных. Для случая, когда многообразие L есть семейство прямых, инвариантных относительно вращения вокруг начала координат, регуляризирующий алгоритм решения уравнения (1) имеет вид [8]

$$\mu_a(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} dv \int_{-\infty}^{+\infty} K_a(|\xi - \xi'|) p_v \xi' | d\xi',$$

где $K_a(\omega) = (1/|\omega|) / [1/(|\omega|^2 + a\omega^{2p})]$ — фурье-образ ядра $K_a(\xi)$.

Получаемые в процессе измерений значения искажены влиянием аппаратной функции системы регистрации и другими погрешностями измерительной аппаратуры, что обуславливает необходимость создания алгоритмов коррекции искажающих влияний. Большие возможности при интерпретации восстановленного распределения $\mu_a(X, Y)$ предоставляют методы и алгоритмы анализа, обработки и преобразования томограмм, их представление в виде полутоновых цветных и черно-белых изображений.

Структура и режимы работы системы обработки данных. Компьютерная микротомография может быть реализована в устройствах с разной геометрией сканирования, видом проникающего излучения, организацией измерительных каналов, временными характеристиками процесса ввода данных и т.д. Поэтому в основу построения системы обработки данных положен принцип функциональной универсальности. В соответствии с ним структура и концепция реализации информационных и программных компонентов системы обработки в рамках выбранной архитектуры не зависят от типа конкретной томографической установки. Функциональная универсальность системы обработки порождает функциональную избыточность информационной базы и пакетов программ системы для каждого конкретного типа вычислительных томографов.

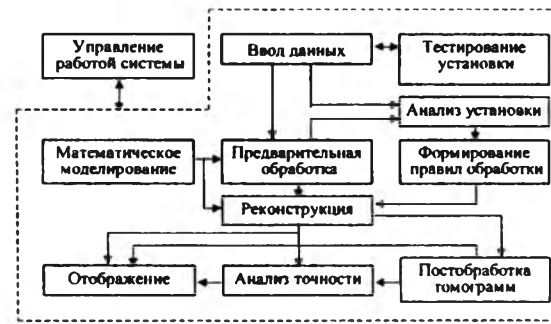
Функциональная универсальность базируется на принципе модульности для всех компонентов системы обработки данных, включая аппаратные. В связи с этим в рамках информационного обеспечения системы обработки выработаны соглашения о взаимодействии программ с информационными структурами, реализованные в виде модулей проблемно-ориентированных библиотек. Введем проблемно-ориентированный интерактивный интерфейс взаимодействия пользователей с системой, учитывающей специфику задач вычислительной томографии. С точки зрения управления принцип модульности дополнен иерархией связей между программными модулями системы. Наряду с принципом модульности на всех уровнях системы действует принцип пополняемости. Он является основой создания версий системы, учитывающих специфику задач и аппаратуры конкретной томографической установки. В рамках проблемной ориентации меняется целевая направленность работы компонентов системы, что достигается формированием соответствующих потоков обработки. Для повышения гибкости система должна содержать средства быстрого и простого изменения параметров и алгоритмов обработки, а также настройки на характеристики измерительной системы, т. е. информационные и программные компоненты системы должны отвечать принципу адаптивности.

Рассмотренные принципы построения системы обработки данных в вычислительных томографах позволяют переориентировать томографические установки с сохранением общей структуры системы, преемственности информационного фонда и без переработки большого числа программных модулей. Проблемная ориентация томографических систем и соответствующая ей целевая направленность предполагают определяющую модификацию аппаратных, информационных и программных компонентов системы обработки при сохранении структуры.

В соответствии с общепринятым подходом выделяются три основных этапа в автоматизированных системах обработки экспериментальной информации: ввод данных и их буферизация в памяти ЭВМ, предварительная обработка и интерпретация. Под интерпретацией понимаются все этапы работы системы, связанные с преобразованием данных этапа предварительной обработки, анализом, обработкой и отображением результата. Подразумевается, что исходными в системе могут быть как измеренные данные, так и результаты их математического моделирования.

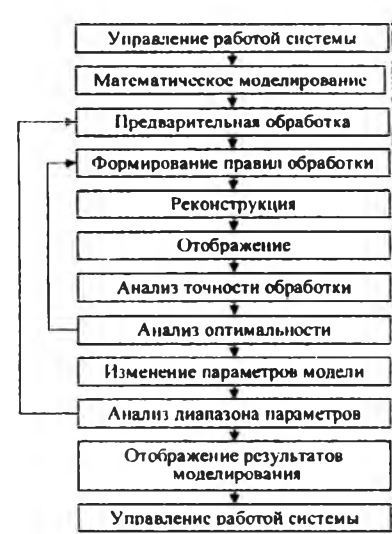
Общая структура системы обработки данных микротомографа (рис. 3) выработана с учетом принципов построения системы и общего подхода к созданию систем автоматической обработки экспериментальных данных.

Выделены следующие этапы работы системы: ввод данных и управление измерительной системой, предварительная обработка данных, реконструкция, анализ точности обработки, постобработка томограмм, отображение результатов обработки, формирование правил обработки, тестирование установки и управление работой системы. Каждому этапу обработки данных в системе соответствует пакет прикладных программ.



Р и с. 3. Структура системы обработки данных в вычислительных микротомографах

При создании микротомографа важную роль играет режим математического моделирования. С его помощью проверяется эффективность алгоритмов обработки, оценивается влияние погрешностей данных на точность реконструкции, оптимизируются параметры установки и правила обработки в соответствии с целевой функцией, проектируются томографические системы в целом. Из рис. 4. видно, что любой режим работы системы начинается и заканчивается этапом управления работой системы. Следовательно, система с точки зрения пользователя является замкнутой и не требует при эксплуатации знания особенностей операционной системы. Такое упрощение отражает в полной мере ориентацию системы и не предъявляет требования высокой квалификации пользователя. Каждому модулю для всех этапов обработки поставим в соответствие «элементарный» режим работы системы. Остальные режимы работы формируются как последовательность этих элементарных режимов.



Р и с. 4. Логика режима численного моделирования

Режим обследования однотипных объектов характерен для томографов массового применения и в исследовательских системах, требующих набора большого объема результатов с одного или многих объектов. Он состоит из цепочки: ввод данных — предварительная обработка — реконструкция — отображение — постобработка — отображение — анализ точности. В этой цепочке обязательными являются только первые четыре этапа, введение остальных зависит от ориентации системы. В некоторых случаях информация, полученная в режиме обследования однотипных объектов, не может удовлетворить исследователя, поэтому предусмотрен режим детального обследования. Для него характерно получение дополнительной информации за счет усложнения обработки, получения дополнительных данных, более полного использования априорной информации, постобработки томограмм.

Важную роль в системе играют режимы синтеза изображений по совокупности параллельных срезов,

анализа изображений и выделения признаков изображений. Они позволяют выделить количественные характеристики, получить дополнительную информацию об объекте. Эти режимы существенно повышают эффективность интерпретации по сравнению с визуализацией цифрового изображения.

При этом введен режим адаптивной обработки данных, когда среди результатов восстановления выделяются определенные участки объекта, для которых итерационно формируются правила обработки.

Система обработки данных предусматривает не только анализ результатов, но и планирование воздействия на объект. Этот режим использует аппарат анализа геометрических характеристик изображений и дополнительно позволяет в интерактивном или автоматическом режиме выдавать параметры подвергаемой воздействию зоны. В частности, для автоматического режима воздействия параметры могут автоматически выдаваться исполнительным модулям системы, осуществляющей воздействие.

Архитектура аппаратных средств системы обработки данных. Архитектура и параметры аппаратных средств обработки данных обуславливаются принципами построения системы обработки, требованиями к ней, целевой направленностью и временными характеристиками. С учетом широкого применения компьютерной микротомографии аппаратура системы должна обеспечивать функции сбора и буферизации измеренных данных в режиме on-line, их обработку в соответствии с проблемно-ориентированными алгоритмами, отображение и буферизацию данных. При этом необходимо проводить большой объем вычислений по предварительной обработке измеренных данных, решению уравнения для получения томографического изображения и цифровой обработке томограмм. Вычисления могут проводиться либо на высокопроизводительной универсальной ЭВМ, либо с помощью системы специализированных процессоров. Использование универсальной ЭВМ ведет, как правило, к непомерному росту стоимости томографической системы, хотя и обеспечивает функциональную универсальность аппаратуры обработки. В этом случае все изменения при построении конкретной системы вносятся только на программном уровне.

Специализированные процессоры, аппаратно реализующие алгоритмы обработки, ориентируются на характеристики конкретной системы. Их применение является обоснованным в системах массового использования с отработанным конечным набором реализуемых алгоритмов. Стоимость системы специализированных процессоров для обработки данных в вычислительных томографах обычно в 10 раз ниже по сравнению с универсальной ЭВМ той же производительности.

Таким образом, оба пути построения аппаратуры обработки данных не соответствуют в полной мере принципам системы.

Создание универсальной системы обработки данных для микротомографа исследовательского назначения подразумевает требование целевой направленности аппаратуры обработки при сохранении функциональной универсальности в рамках характерных задач вычислительной томографии. Эта задача решается путем создания согласованной системы программируемых и аппаратных обрабатывающих модулей. Основным принципом построения аппаратуры является принцип модульности с единым системным управлением при возможности параллельной работы модулей в режимах вычисления и обмена данными. Принцип параллельности работы модулей дополняется конвейерным режимом обработки данных как на уровне функциональных модулей, так и внутри них. В качестве основного элемента системы используется универсальный обрабатывающий модуль с программным управлением и параллельным выполнением вычислительных и управляющих операций. Решение определенных задач по обработке данных, требующих наибольших объемов вычислений и существенным образом отражающих специфику томографических алгоритмов, возлагается на аппаратные процессоры, связанные с универсальными обрабатывающими модулями.

Для каждого этапа обработки характерны управляющие и вычислительные алгоритмы, характеризующиеся временем реакции системы управления, объемом данных

и скоростью обмена, а также объемом вычислительных операций и лимитированным временем обработки. Поэтому основной задачей при проектировании универсального обрабатывающего модуля является согласование его вычислительных возможностей с временными требованиями к обработке данных на основных этапах при минимальном объеме реализующей его аппаратуры. Специализированные аппаратные процессоры дополняют универсальным обрабатывающим модулем системы с большим объемом обрабатываемых данных при наличии требования реального времени их обработки. Для этапа ввода данных и управления сканированием в вычислительных томографах характерными являются анализ состояния внешних устройств, управление ими, запись в память ЭВМ или на внешнее устройство больших объемов данных (10^5 — 10^6 отсчетов) при высокой скорости поступления (10^4 — 10^6 отсчетов в 1 с). Поэтому естественно для реализации функций этапа ввода данных и управления применять управляющие милли- или микроЭВМ с развитой системой управления нестандартными внешними устройствами и подсистему оперативной буферизации измеренных данных, связанную с ЭВМ и системой регистрации и преобразования данных. Управляющая ЭВМ также синхронизирует пуск обработки и обмена данными в обрабатывающих и отображающих модулях.

Введем обозначения для оценки объемов вычислений на остальных этапах и объемов передаваемых данных. Пусть NS — число одновременно обрабатываемых срезов; N — число измеренных проекций для одного среза; M — число отсчетов проекции; NI — размерность восстанавливаемой матрицы; K_s^i — число операций i -го типа на s -м этапе обработки; τ_i — время выполнения операции i -го типа; $I \in \{\otimes, \oplus, \odot\}$

Этап предварительной обработки характеризуется временем

$$T_1 = NM(K_1^{\oplus}\tau^{\oplus} + K_1^{\otimes}\tau^{\otimes}).$$

На этапе реконструкции при использовании алгоритмов сверточного типа и вычисления свертки через блок предварительной факторизации

$$T_2 = NM \log_2 M(K_{\Phi}^{\oplus}\tau^{\oplus} + K_{\Phi}^{\otimes}\tau^{\otimes}) + NMK_c^{\otimes}\tau^{\otimes} + NNI^2(K_s^{\oplus}\tau^{\oplus} + K_s^{\otimes}\tau^{\otimes} + K_s^{\odot}\tau^{\odot}).$$

Постобработка восстановленного изображения может потребовать времени

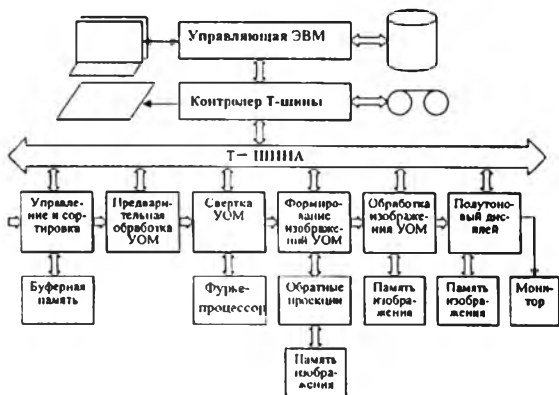
$$T_3 + NI^2(K_s^{\oplus}\tau^{\oplus} + K_s^{\otimes}\tau^{\otimes}),$$

синтез изображения по серии срезов —

$$T_4 + NSNI^2(K_4^{\oplus}\tau^{\oplus} + K_4^{\otimes}\tau^{\otimes}).$$

Приведенные оценки не являются исчерпывающими, но они дают представление об объеме вычислений для достижения результата на основных этапах обработки данных в вычислительных томографах. С учетом того, что в практических системах, как правило, $N \sim M \sim NI$, этапы предварительной обработки, постобработки и синтеза изображения по серии срезов требуют примерно одинакового объема вычислений. Для этапа реконструкции характерна сложная структура вычислений, и можно выделить участки с аналогичным объемом вычислений. Однако ориентация алгоритмов предварительной обработки на конкретную установку обуславливает их разнообразие. Решение именно этих задач может быть возложено на универсальные обрабатывающие модули — при $N \sim M \sim 500$, $NI \sim 256$, $\tau^{\oplus} \sim \tau^{\otimes}$ и $K_s^{\oplus} + K_s^{\otimes} \sim 100$ время выполнения операции составляет ~ 200 нс. Выполнение операций факторизации и формирования изображения целесообразно возложить на специализированные процессоры, так как объем вычислений для них в 10 — 100 раз больше, чем для остальных стадий. Хотя этот пример ориентирован на алгоритмы сверточного типа, такой подход применим и в других случаях.

Важным является взаимодействие модулей системы обработки. Для этого введены два типа связей между модулями при иерархической структуре их взаимодействия. На верхнем уровне иерархии находится управляющая ЭВМ (рис. 5) с набором стандартных периферийных устройств и устройств массовой памяти. Проблемно-ориентированная на решение задач вычислительной томографии часть аппаратуры обработки данных объединяется единым интерфейсом — T -шиной, которая связана с управляющей ЭВМ через контроллер T -шины. Все универсальные управляющие модули, подсистема управления вводом данных и полутоновый дисплей стандартным образом связаны с T -шиной. На этапе обработки, когда не хватает емкости памяти или вычислительных ресурсов, к ним подключается дополнительная память или специализированные процессоры. Для этих целей каждый универсальный обрабатывающий модуль имеет по два интерфейса для ввода и вывода данных, минуя T -шину. На рис. 5 приведена схема комплекса обработки микротомографа с малым временем сканирования (1—5 с) и одновременной обработкой одного среза в реальном масштабе времени. Для измеренных данных введена специальная буферная память, фильтрация и формирование изображения выполняются в специальных процессорах третьего уровня иерархии, управляемых своими универсальными обрабатывающими модулями. Универсальный обрабатывающий модуль представляет собой 16-разрядный микропроцессор, в котором разделены память данных и память микроинструкций, и умножитель, система ввода-вывода ориентирована на T -шину и интерфейсы ввода-вывода, обеспечивающие подключение специализированных устройств и связь между универсальным обрабатывающим устройством, минуя T -шину.



Р и с. 5. Схема комплекса обработки для микротомографа с малым временем сканирования

Рассмотренная архитектура аппаратных средств системы обработки данных опирается на концепцию T -шины и универсального обрабатывающего модуля. Это позволяет легко компоновать комплексы обработки для томографических установок из стандартных модулей в рамках функционально-универсальной системы.

Особые требования к комплексу обработки предъявляются при математическом моделировании микротомографа. Сложность и многообразие алгоритмов математического моделирования обуславливают использование мощных управляющих ЭВМ с большим объемом памяти и универсальных матричных процессоров высокой производительности наряду с аппаратурой обработки данных и устройствами отображения.

Программное обеспечение системы обработки данных. Каждому этапу обработки данных соответствует пакет прикладных программ. Создание выполняемых программных модулей опирается на развитую систему средств разработки программ. К ним относятся трансляторы с языков высокого уровня и ассемблера управляющей ЭВМ, системные библиотеки, обрабатывающие программы, ассемблер и загрузчик для универсального обрабатывающего модуля, драйвер контроллера T -шины, ассемблер, загрузчик, кросс-компилятор и библиотеки для программирования матричного процессора, а также другие библиотеки. Среди последних следует выделить библиотеки поддержки информационных структур, обработки и анализа данных, обработки графической информации, программ для универсального обрабатывающего модуля и библиотеку поддержки для полутонового дисплея. Последние две являются библиотеками поддержки аппаратуры.

Пакеты прикладных программ и средства разработки программных модулей функционируют в рамках развитой операционной системы управляющей ЭВМ. Операци-

онная система и системные обрабатывающие программы обеспечивают логическое взаимодействие с устройствами ввода-вывода информации, управление ресурсами и задачами, синхронизацию процессов, поддержку файловых структур и т.д. Однако интерфейс взаимодействия пользователя с операционной системой является универсальным и не отражает особенностей предметной области, на которую ориентированы системы обработки данных томографических измерений. Кроме того, в универсальной системе обработки данных, ориентированной на конкретную предметную область, необходимо поддерживать информационную базу системы и автоматическое вычисление потоков обрабатывающих программ. Эти функции возлагаются на монитор управления заданиями в вычислительных томографах. Отражение специфики конкретной установки достигается путем генерации синтаксиса команд, соответствующих выполняемым потокам заданий, и синтаксиса параметров, отражающих характеристики аппаратуры и обработки.

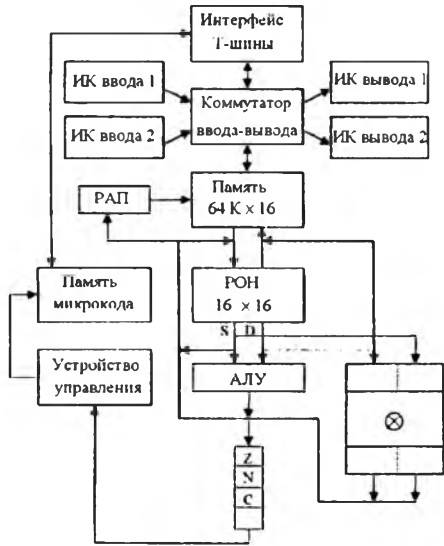
Важную роль при создании модулей, входящих в состав пакетов прикладных программ, играет структурное и модульное программирование. Они положены в основу программ не только выполняемых управляющей ЭВМ, но и пользующихся программной поддержкой. Унификация информационных и управляющих модулей на уровне ЭВМ и матричного процессора позволяет рассматривать систему программирования на уровне иерархической сети распределенных устройств в рамках предметной области вычислительной томографии, а не индивидуально для каждого устройства.

Одной из особенностей информационной базы системы обработки является возможность выделения основных типов данных: измеренных, данных о проекциях и цифровом томографическом изображении. Это позволяет фиксировать формат и протокол обмена этими данными, однако сохраняется возможность управлять изменением размеров и числом записей для данных этих типов.

Универсальность системы обработки с точки зрения программного обеспечения поддерживается структурированием уровня зависимости программных компонентов от архитектуры управляющей ЭВМ. Выделены следующие уровни модулей системы обработки: управляющая программа, обрабатывающие модули для ЭВМ, универсальные обрабатывающие модули и матричного процессора, управляющие модули для устройств Т-шины, модули поддержки информационной базы и драйверы устройств ввода-вывода. На архитектуру конкретной ЭВМ и особенности операционной системы ориентированы модули только двух последних уровней, составляющие по объему всего

около 10% программного обеспечения. Поэтому переход к другой управляющей ЭВМ для увеличения возможностей и производительности системы не требует больших затрат на переработку программного обеспечения. Модули системно-независимых уровней написаны на языке Фортран-4, поддержка обмена информацией между модулями основывается на специальных подпрограммах, которые и отражают специфику операционной системы.

В соответствии с изложенным подходом выделяется несколько уровней в структуре программного обеспечения системы обработки данных (рис. 6). На верхнем уровне иерархии находится операционная система и драйверы устройств ввода-вывода. Однако пользователь системы не ощущает наличия этого уровня, так как он взаимодействует с системой через монитор управления заданиями, которому соответствует второй уровень иерархии системы обработки. Третьему



Р и с. 6. Функциональная схема универсального обрабатывающего модуля

уровню иерархии в системе соответствуют пакеты прикладных программ, объединяющие модули для каждого этапа обработки. Каждый пакет состоит из нескольких выполняемых программ. Выполняемая программа включает управляющий модуль, программы обработки данных в распределенной сети вычислительных устройств, модули управления этими устройствами и модули поддержки информационной базы системы. В рассмотренной структуре системы обработки только верхний и нижний уровни системы иерархии являются системно-зависимыми в плане архитектуры ЭВМ и типа операционной системы.

Состав пакетов прикладных программ для конкретной системы обуславливается ее ориентацией. Во многих системах наибольший объем программ приходится на пакеты анализа установки, обработки изображения, отображения и анализа томограмм. Причем только пакет анализа установки существенно ориентирован на данный микротомограф. Пакеты обработки, анализа и отображения зависят в большей мере от выделяемых им ресурсов обрабатывающей аппаратуры и внешних требований к системе в целом.

Роль пакета программ моделирования и проектирования микротомографии возрастает по мере накопления программных компонентов, реализующих разные алгоритмы учета особенностей распространения излучения в веществе объектов, регистрации и генерации излучения, формирования геометрии сканирования и т.д. На их основе возможна оптимизация параметров микротомографов и обрабатывающих программ.

В качестве примера рассмотрим один из вариантов микротомографа для анализа характеристик твэла (рис. 7). Устройство состоит из стола 1 для крепления объекта исследования, зеркала 2, размещенного в прорези платформы 5. На платформе размещены зеркало 13, жестко закрепленный рентгеновский микрофокусный излучатель 17 с блоком управляемых коллиматоров 15, снабженный стабилизированным источником питания 16, и блок детекторов 8 с системой управления коллиматоров 9. Стол имеет два автономных привода: привод 3 для подъема объекта исследования в вертикальной плоскости на заданную величину, второй привод (на рисунке не показан) поворачивает объект исследования на заданный угол. Платформа размещена на направляющих 12 для прямолинейного перемещения вдоль объекта сканирования с помощью автономного привода 11. В состав устройства также входят блок 6 съема сигналов с детекторов, блок отработки данных (ЭВМ) 7 с дисплеем (на рисунке не показан). В конструкцию дополнительно введены лазерные интерферометры 4, 10. Блок обработки данных лазерного интерферометра 10 имеет шесть выводов, первый из них связан со стабилизированным источником питания рентгеновского излучателя 16, второй и третий — с управляемыми блоками коллиматоров 9, 15 рентгеновского излучателя и блока детекторов соответственно, четвертый — с блоком съема сигналов 6, пятый — с электрическим приводом 11 платформы, шестой — с ЭВМ. Блок обработки данных лазерного интерферометра по выходу связан с электрическим приводом стола с ЭВМ. Блоки съема сигналов 6 и ЭВМ 7, в свою очередь, имеют каналы управления блоками коллиматоров 15 и 9. ЭВМ имеет два управляющих выхода, подсоединенных к лазерным интерферометрам 10, 4. На платформе установлены также клинья переменного поглощения, управляемые от блока съема сигналов 6 и ЭВМ 7 через привод 14 (для регулирования динамического диапазона работы детекторного комплекса).

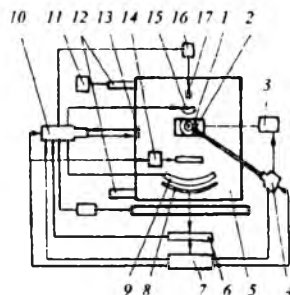


Рис. 7. Принципиальная схема микротомографа для анализа характеристик твэла

Для достижения разрешения 1—10 мкм в микротомографе экспериментального типа была разработана сканирующая система, обеспечивающая прецизионное программируемое позиционирование и измерение параметров движения объекта исследований с управлением от ЭВМ.

Сканирующий модуль, включающий в себя узлы размещения и юстировки рентгеновского излучателя, блока детекторов и системы измерения, унифицированные оптико-механические узлы, обеспечивает автоматическую трансляцию объекта изучения по трем координатам x , y , z . Механизм поворота обеспечивает вращение объекта изучения вокруг оси z , лазерные измерители перемещений и датчика угла поворота — контроль геометрии системы в процессе сканирования. Такое техническое решение, применяемое впервые, позволяет существенно снизить требования к прецизионной механике (снизить стоимость микротомографа). Каждый оптико-механический узел состоит из подвижной платформы, шагового двигателя с редукцией микрометрической подачи и лазерного измерителя перемещения, обеспечивающих автоматическую трансляцию и измерение перемещений объекта изучения. Механизм поворота объекта изучения состоит из шагового двигателя, привода вращения платформы и датчика угла поворота, обеспечивающих задание и измерение угла в пределах $\pm 180^\circ$ с погрешностью $30''$. Управление позиционированием объекта изучения и передача измерительной информации в ЭВМ осуществляются посредством программно-управляющих моделей. Разработан также специальный острофокусный рентгеновский источник с высокими показателями стабильности фокального пятна.

Отметим важность конфигурирования вычислительных средств в составе вычислительно-отображающего комплекса. Был разработан и реализован следующий подход. Моделирование работы микротомографа, а также изучение информационных потоков вычислительно-отображающего комплекса, выполняемые на ранних стадиях проектирования, позволяют получить характеристики, достаточные для автоматизации процесса конфигурирования вычислительных средств с учетом конкретных задач. В рамках решения этой задачи были разработаны комплекс GALINA и система INFORM. В основе создания комплекса лежит автоматизация логического подбора и взаимосвязи номенклатуры технических характеристик вычислительной техники, способной решить задачи получения и обработки изображения, исходя из заданных технических требований и условий работы микротомографа. В информационно-логической части комплекса содержится информация о технических характеристиках и стоимости современной вычислительной техники различного типа.

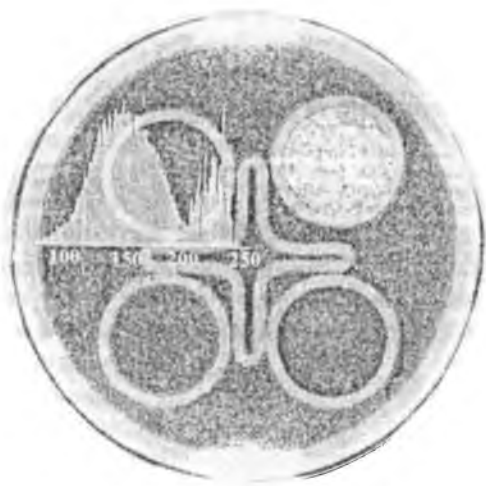
Комплекс выполняет процедуры конфигурирования и расчета вычислительных сетей различного уровня, а также позволяет оценивать их стоимостные характеристики, что дает возможность оптимизировать технико-экономические показатели той или иной возможной конфигурации вычислительного оборудования. Специально созданная информационно-логическая система INFORM, в которой содержится информация о программных модулях, используемых в этой области информационной технологии, и их стоимостных характеристиках, позволяет определять наличие необходимого программного обеспечения или необходимости его разработки.

Совместная работа комплекса GALINA и системы INFORM позволяет связывать конфигурацию вычислительной техники и программное обеспечение вычислительно-отображающего комплекса, а также планировать проведение работы и исследований в этой области. С использованием комплекса могут выполняться также работы, связанные с требованиями к техническим и вычислительным средствам комплекса с учетом конкретных условий работы и назначения.

При решении научно-практических задач оказалась необходимой разработка методов и программных продуктов, позволяющих анализировать «теневые функции» и на основании этого анализа изменять режимы сканирования и отказываться от восстановления полной томограммы. Среди разработанных целесообразно отметить метод численной упаковки информации, методы статистически обоснованной кластеризации, использование идей симметрии, методы аппроксимации на ограниченном множестве значений аргумента. Хорошие результаты дает метод интерпретации нечетких экспертных оценок на множестве вероятностных моделей.

Важным с практической точки зрения оказался опыт разработки программных продуктов, обеспечивающих автоматизацию обработки полученных томограмм в 2D и 3D измерениях, автоматизированный поиск дефектов с заданным уровнем показателей геометрии, измерение геометрии изделий и дефектов, определение композиционного состава и т.п.

В рамках работ по данному направлению во ВНИИМ разработаны образцы реальных твэлов и средств регулирования ядерных реакторов с калиброванными дефектами с разными типами геометрии и геометрии внутреннего пространства. При работе с такими типами объектов экспериментально был достигнут уровень разрешения ~ 1 мкм (рис. 8). Рассматривались возможности создания и моделирования томографических систем повышенного уровня разрешения для объектов с большими, чем твэл и ТВС, габаритами, в том числе и с использованием в качестве источника излучения малогабаритных импульсных бетатронов серии МИБ с максимальной энергией тормозного излучения 4,6 и 10 МэВ, что позволяет контролировать изделия с эквивалентной толщиной (по стали) ~ 250 мм.



Р и с. 8. Фрагмент томограммы тест-образца макета твэла

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лелеков В.И. Некоторые вопросы разработки математических моделей сканирующих систем — компьютерных томографических установок. — В кн.: Материалы 2-го Всес. симп. по вычислительной томографии. Куйбышев, 1985, с. 112—116.
2. Лелеков В.И., Попов Д.А., Свядосц Л.П. Комплексная математическая модель компьютерного томографа с высоким пространственным разрешением. — В кн.: Докл. 3-го Всес. симп. по вычислительной томографии. Киев, 1987, с. 211—214.
3. Фролов К.В., Лелеков В.И., Рубинский А.Е., Пестряков А.А. О системе обработки информации в проблемно-ориентированных вычислительных томографах. — Проблемы машиностроения и автоматизации, 1986, № 9, с. 8—19.
4. Radon J. — Ber. Saech. Akad. Wissenschaft, 1971, v. 69, p. 172.
5. Ramachandran G.N., Lakshminaray A.V. — Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1971, v. 68, № 9, p. 2236.
6. Growthev R. e. a. — Proc. Roy., 1970, v. 317, p. 319.
7. Gordon R. e. a. — Theor. Biol., 1970, v. 29, p. 971.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.
9. Лелеков В.И., Пыхтин В.Г., Смородицкий Я.Г. Вопросы разработки метода компьютерной микротомографии для анализа изделий из композитных материалов. — Дефектоскопия, 1990, № 10, с. 84—90.

Поступила в Редакцию 11.11.99

УДК 621.039.548

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШАРОВОГО ТВЭЛА

Лелеков В.И. (ВНИИАМ)

Известно [1—6], что в ядерной энергетике широко распространены цилиндрические и сферические твэлы, которые представляют собой топливный керамический слой соответствующей геометрии, заключенный в тонкостенную металлическую оболочку,