

УДК 621.039.5

## ТЕХНОЛОГИЯ SupRROS СОПРОВОЖДЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ: ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА, МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ

Ю. Е. Ванеев, Н. Ю. Марихин  
(ГНЦ НИИАР, г. Димитровград)

Представлены особенности современной технологии разработки и применения вычислительных средств сопровождения эксплуатации исследовательских реакторов. Приведены примеры разработок и применения в рамках этой технологии комплекса программных средств — имитатора активной зоны реактора СМ.

*Ключевые слова:* исследовательские реакторы, сопровождение эксплуатации, вычислительные средства, технология разработки, прецизионная программа, распараллеливание вычислений, имитатор активной зоны, моделирование.

### Введение

Эксплуатация исследовательского реактора (ИР) — это многоэтапный процесс, включающий в себя планирование, обоснование и проведение:

- перегрузок активной зоны;
- предпусковых экспериментов;
- кампаний с облучением экспериментальных устройств (ЭУ) в каналах;
- замены выработавших ресурс элементов конструкции реактора;
- модернизации конструкции реактора и ЭУ;
- транспортировки и хранения *свежих* и отработавших ТВС.

Основная задача эксплуатации ИР — обеспечение безопасности и эффективности проведения работ на каждом из перечисленных этапов. Для успешного выполнения этой основной задачи необходимо решать комплекс подзадач, как общих, так и специфических, для каждого этапа процесса эксплуатации ИР. Решение этого множества задач составляет процесс сопровождения эксплуатации реактора, который осуществляется при совместном использовании контрольно-измерительных (инженерных) средств и накопленного персоналом опыта (опытно-экспериментальное, инженерное сопровождение), а также вычислительных средств (расчетное сопровождение).

В связи с интенсификацией использования существующих ИР, ужесточением требований со стороны Ростехнадзора к обоснованиям безопасности их эксплуатации, установившейся тенденцией к экономии средств на дорогостоящие экспериментальные обоснования параметров текущей эксплуатации ИР и проектов модернизации их активных зон и ЭУ все большее значение приобретают разработки и применение вычислительных средств. Этому способствует и стремительное развитие вычислительной техники, технологий моделирования, расширение возможностей компьютерных программ.

Основное назначение вычислительных средств при сопровождении эксплуатации ИР связано с опережающим (прогнозным) моделированием этого процесса с целью его оптимального планирования, а также выявления возможностей возникновения аварийных ситуаций. При этом достижение максимально возможной точности нейтронно-физических расчетов всех ожидаемых состояний моделируемых ядерно- и радиационно опасных объектов имеет первостепенное значение.

Таким образом, в рамках решения глобальной проблемы повышения эффективности и безопасности ядерной энергетики актуальны разработки, направленные на решение проблемы обеспечения одной из важнейших составляющих этой

отрасли — ИР высокоэффективными вычислительными средствами сопровождения нормальных режимов их эксплуатации на базе современных компьютерных технологий и прецизионных программных средств.

Цель работы — описание технологии разработки вычислительных средств для расчетного сопровождения эксплуатации (РСЭ) любых ИР и результатов ее реализации применительно к высокопоточному реактору СМ.

### Основные положения технологии SupRRROS

Специфика ИР, современные возможности компьютерной техники, системного и прикладного программного обеспечения, опыт разработок расчетно-моделирующих комплексов для энергетических реакторов позволяют сформулировать требования к комплексу вычислительных средств для РСЭ любых ИР [1] и основные положения технологии его разработки и применения (Support of Research Reactors Operation with help of Software — SupRRROS).

SupRRROS-технология — это совокупность методов разработки программных средств, моделирования активных зон ИР и прогнозирования значений их основных нейтронно-физических характеристик на всех этапах эксплуатации, а также методов обработки и использования получаемых результатов.

**Требования к комплексу вычислительных средств.** Комплекс должен обеспечивать решение следующих задач (по этапам эксплуатации):

1. Для этапов перегрузки активной зоны и предпусковых экспериментов:
  - оптимизация перегрузки (по заданному критерию);
  - определение эффектов реактивности для каждой операции, связанной с изменением состояния активной зоны (загрузка-выгрузка ТВС, ЭУ и элементов конструкции зоны, перемещение органов системы управления и защиты (СУЗ) в процессе измерений их эффективности);
  - определение запаса и баланса реактивности;
  - прогнозное моделирование кампании, оптимизация ее сценария (по заданному критерию);

- обоснование непревышения пределов безопасной эксплуатации (по мощностным параметрам);
- обоснование режимов облучения материалов, повышение информативности испытаний материалов и изделий в каналах.

2. Для этапа работы реактора на номинальном уровне мощности:
  - моделирование прошедших критических состояний (посттестовый режим счета);
  - прогнозное моделирование состояний активной зоны, от текущего до завершающих кампанию;
  - моделирование *йодной ямы* при сбросе стержней активной зоны в любой момент кампании.
3. Для этапов замены элементов конструкции реактора, модернизации активной зоны и ЭУ:
  - исследования изменений нейтронно-физических характеристик активной зоны и ЭУ;
  - обоснование ядерной и/или радиационной безопасности при подготовке дополнений к проектной документации.
4. Для этапа обращения со свежим и облученным топливом необходимо обосновывать ядерную и/или радиационную безопасность всех выполняемых операций.

На всех этапах РСЭ ИР должна решаться еще одна очень важная задача — это сбор, обобщение и сохранение данных о работе реакторов и проводимых на них экспериментах, которые могут быть востребованы в любое время, например, для установления новых функциональных взаимозависимостей нейтронно-физических параметров. При таком использовании этой постоянно пополняющейся базы данных она будет приобретать качества базы знаний об ИР.

При решении перечисленных задач вычислительный комплекс должен обеспечивать получение расчетных значений следующих величин:

- эффективного коэффициента размножения нейтронов  $K_{эф}$  в активной зоне реактора, хранилищах свежих и облученных ТВС (включая транспортные операции);
- эффектов реактивности (при перегрузках ТВС и ЭУ, перемещениях органов СУЗ, выгорании топлива; температурные, плотностные и др. эффекты);

- пространственных и энергетических распределений плотности потока нейтронов и фотонов, различных скоростей реакций, включая энерговыделение в активной зоне реактора и в каналах с опытными твэлами, а также радиационное энерговыделение в элементах конструкции реактора;
- пространственных распределений параметров теплоносителя (давление, температура, плотность) для *кипящих* реакторов типа ВК-50;
- коэффициентов неравномерности энерговыделения в активной зоне, мощности максимально напряженного твэла в каждой ТВС, координат наиболее *горячей точки* твэла, запаса до кризиса теплообмена на поверхности твэла;
- нуклидного состава облученного топлива, его активности, остаточного энерговыделения.

Указанные величины должны быть вычислены в любые заданные моменты кампании реактора или во время его остановки на перегрузку.

**Технология разработки вычислительных средств.** Базисные положения технологии перечислены ниже.

1. В качестве вычислительной основы выбирается прецизионная программа, реализующая метод Монте-Карло и обеспечивающая более высокую точность расчетов по сравнению с программами инженерного класса.
2. Проводится адаптация выбранной программы к задачам РСЭ ИР.
3. Разрабатываются компьютерная система с кластерной архитектурой и распараллеленная версия прецизионной программы, обеспечивающие приемлемую для практики скорость счета.
4. Разрабатывается и верифицируется *базовая* расчетная модель активной зоны ИР, в которой с помощью формальных параметров может быть предусмотрено задание всех особенностей элементов конструкции: составы, размеры, высотные отметки. Наличие такой модели обеспечивает существенную экономию времени на разработку моделей конкретных состояний активной зоны, исключает дублирование, уменьшает вероятность ошибок.
5. Разрабатывается база данных с двумя основными разделами, содержащими:

- исходную информацию о параметрах моделей рабочих ТВС всех существующих модификаций (с выгоранием топлива от нуля до максимально возможного значения), органов СУЗ, ЭУ и других элементов конструкции;
- финальную информацию о результатах моделирования как в виде стандартных финальных файлов из прецизионной программы, так и в виде результатов их специальной выборочной обработки.

6. Разрабатываются программные средства, вычисляющие ряд параметров активной зоны по аппроксимирующим формулам, которые выведены на основе статистического материала из базы данных по прошедшим кампаниям. Это позволяет сверхоперативно прогнозировать изменения параметров в типовых кампаниях, а также идентифицировать статистические *выбросы* их значений с последующей *отбраковкой*.
7. Разрабатываются программные средства для автоматизации моделирования (генератор файлов исходных данных), визуализации исходной и финальной информации, обеспечивающие доступность комплекса широкому кругу специалистов:
  - физикам, специализирующимся на расчетных исследованиях;
  - экспериментаторам для уточнения параметров облучения материалов и изделий в каналах;
  - инженерам, формирующим загрузку активной зоны и сопровождающим кампанию реактора;
  - студентам-практикантам, инженерам и научным сотрудникам различной специализации с целью обучения.
8. Перечисленные программные средства объединяются в программный комплекс, который обеспечивает возможность решения практически всех задач РСЭ любых ИР. Применительно к задачам моделирования загрузки и кампании этот комплекс получил название *имитатор активной зоны ИР* [2] (Imitator of Research Reactor Core) с аббревиатурой IMCOR\_RR.
9. Программные средства в составе вычислительного комплекса в определенной степени должны быть отчуждены от разработчиков.

Это предполагает высокий уровень проработки алгоритмов решения всех перечисленных выше задач, чтобы инженер службы эксплуатации реактора мог самостоятельно решать большинство этих задач, не вникая в форматы представления информации в файлах исходных данных (отчуждение от разработчиков базовых расчетных моделей) и тем более не обращаясь к текстам программ (отчуждение от разработчиков программ).

10. Кластерная система должна функционировать в режиме постоянной готовности и иметь независимые дублирующие средства на случай отказа.

Особенности методологий моделирования и обработки результатов изложены ниже.

### Разработка вычислительного комплекса для РСЭ ИР НИИАР

На рис. 1 приведена структура комплекса средств сопровождения ИР, используемого в ГНЦ НИИАР — крупнейшем в Европе ядерном центре с комплексом объектов использования радиоактивных и делящихся материалов (ОИРДМ), включающим 6 действующих ИР, 2 критических стенда, комплекс хранилищ свежих и облученных ТВС, оборудование для переработки делящихся материалов и др.

К измерительным (инженерным) средствам сопровождения (см. рис. 1) относят критические сборки, теплогидравлические стенды, информационно-измерительные системы, автоматизированные системы научных исследований, аттестованные методики измерений и обработки результатов, включая вычисления параметров по аппроксимационным формулам, полученным после обработки экспериментальных данных.

При планировании загрузки активной зоны ИР перед очередной кампанией, как правило, используют накопленный массив опытно-экспериментальных данных о предыдущих кампаниях. В случае их недостаточности приходится проводить специальные предпусковые эксперименты, занимающие ценное *реакторное* время, что снижает коэффициент использования реактора. Снижение затрат времени на экспериментальное обоснование безопасности и параметров предстоящей кампании достигается совершенствованием методического обеспечения с

сокращением числа экспериментально контролируемых параметров и/или времени на их измерения, а это, в свою очередь, стимулирует развитие расчетных средств сопровождения эксплуатации ИР.

К вычислительным средствам, которые используются для РСЭ ИР, относят персональные компьютеры (или компьютерные многопроцессорные системы) и программные средства (компьютерные программы, реализующие алгоритмы решения уравнений переноса нейтронов и фотонов в различных приближениях, библиотечные файлы с различными константами, базы данных, расчетные модели, сервисные, системные и другие программы). На базе этих средств разрабатывают расчетно-моделирующие комплексы. Ниже анализируются возможности программных средств для расчетов нейтронно-физических характеристик активных зон и каналов облучения ИР, а также объектов, связанных с хранением и транспортировкой свежих и облученных ТВС.

На этапах планирования перегрузок и кампаний ИР традиционно используют программные средства инженерного класса для нейтронно-физических расчетов активных зон с заранее подготовленными библиотеками малогрупповых констант типовых ячеек. Существующее множество таких программ из-за присутствия им ограничений, влияющих, главным образом, на точность расчетов, не позволяет полноценно решить проблему расчетного сопровождения применительно к любым ИР и на всех этапах их эксплуатации.

При обоснованиях условий облучения материалов в каналах и проектов модернизации активных зон чаще всего используют программные средства прецизионного класса. Возможности этих программных средств в последнее десятилетие существенно возросли в связи со стремительным развитием параллельных технологий моделирования, что обеспечивает решение большинства задач РСЭ любых ИР, более высокую по сравнению с инженерными программными средствами точность расчетов и приемлемую для практики оперативность.

Использование единой для большинства ИР технологии разработки программных средств на базе одной всесторонне верифицированной прецизионной программы обеспечит существенную экономию средств за счет отказа от разработки новых или адаптации существующих инженер-

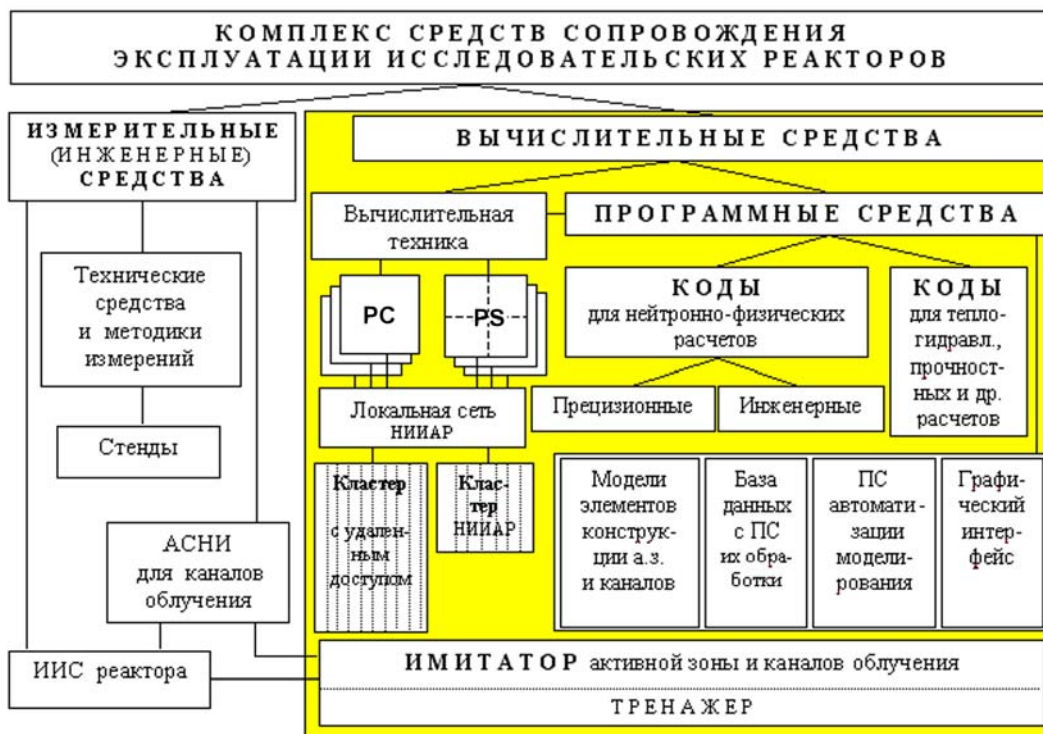


Рис. 1. Структура комплекса средств сопровождения эксплуатации ИР НИИАР: PC — однопроцессорные компьютеры; PS — рабочие станции с несколькими процессорами

ных программных средств, которые заведомо не будут иметь преимуществ по точности расчетов всей совокупности нейтронно-физических параметров ИР и сопутствующих объектов.

**Характеристика базовых программных средств.** Эксплуатируемый в НИИАР комплекс ОИРДМ характеризуется разнообразием используемых топливных, замедляющих, поглощающих и других материалов, а также разнообразием формы и внутренней структуры составляющих элементов.

Для некоторых объектов этого комплекса необходимо обосновывать ядерную безопасность их функционирования или прогнозировать изменения их нейтронно-физических характеристик, т. е. требуется решать однородное уравнение переноса нейтронов. Для других систем важно обоснование радиационной безопасности проводимых работ, т. е. необходимо решать задачи переноса нейтронного и фотонного излучений при заданном источнике. Получение надежных решений всех этих задач для существенно гетерогенных систем со сложной геометрией возможно только с использованием прецизионных программ, основанных на методе Монте-Карло.

В качестве базового компонента разрабатываемого в НИИАР вычислительного комплекса выбрана прецизионная программа из проекта MCU [3]. Такой выбор обусловлен тем, что эта программа не уступает по точности моделирования ни одному из отечественных и зарубежных кодов такого же класса, что подтверждено результатами верификации и аттестации версий MCU-RFFI/A [4], MCU-REA [5]. Кроме того, многолетнее сотрудничество НИИАР со стабильно работающим коллективом разработчиков проекта MCU (РНИЦ "Курчатовский институт") способствовало относительно оперативным разработкам различных программных модификаций в соответствии с техническими требованиями, которые НИИАР последовательно формулировал, учитывая возникающие запросы практики сопровождения эксплуатации ОИРДМ [6]. В результате этой деятельности разработана и успешно эксплуатируется в НИИАР версия MCU-RR (Research Reactors) [7], вобравшая в себя все возможности ранее аттестованных версий и дополнительные возможности, связанные с распараллеливанием вычислений и подключением модуля генерации и переноса фотонов. С помощью этой версии могут быть реше-

ны практически все задачи РСЭ ИР с приемлемой для практики оперативностью и более высокой точностью по сравнению с инженерными программами.

В качестве примера адаптации исходных версий MCU к решению задач РСЭ ИР рассматривается модификация алгоритма нормализации поколений нейтронов в расчетах на многопроцессорных ЭВМ (*кластерах*) [8].

После моделирования траекторий  $N$  нейтронов исходного поколения до их поглощения или утечки образуются вторичные частицы — кандидаты в нейтроны следующего поколения. Число образовавшихся частиц  $M$  может не совпадать с числом исходных частиц  $N$ , и возникает задача нормализации поколения. В алгоритме нормализации, предложенном А. Д. Франк-Каменецким (алгоритм АФК) и реализованном в программе MCU-RR, предполагается, что сумма *весов* нейтронов следующего поколения равна  $N$  и все они в начале моделирования имеют единичный вес. При этом осуществляется случайный выбор, при котором каждый кандидат может породить 0, 1 или большее число частиц с новыми весами, но в тех же точках фазового пространства.

Если на  $L$  процессорах независимо моделируются поколения из  $N$  частиц, то величина смещения дробно-линейных функционалов обратно пропорциональна  $N$ , и при объединении статистик это смещение не изменяется. Ни увеличение числа процессоров  $L$ , ни увеличение числа смоделированных поколений не могут исправить ситуации. Единственное средство — это рассматривать объединенные по всем процессорам наборы частиц в качестве поколения. Таким образом, поколение состоит из  $LN$  частиц, на каждом процессоре моделируется своя *пачка* из  $N$  частиц с образованием  $M_l$  ( $l = 0, 1, \dots, L - 1$ ) вторичных частиц, из их совокупности следует получить следующий набор из  $LN$  частиц.

Наиболее простой алгоритм состоит в сборе всех вторичных частиц на одном процессоре, применении к ним алгоритма АФК и дальнейшем распределении по отдельным процессорам. Существенный недостаток этого метода заключается в том, что общий объем пересылаемых данных всегда максимален и оценивается величиной  $2LN V_b$ , где  $V_b$  — длина (в байтах) описания одной частицы.

В программе MCU-RR/P реализован модифицированный алгоритм, уменьшающий объем пересылаемой информации за счет увеличения числа обменных операций.

Первый шаг алгоритма состоит в том, что на нулевой процессор отсылаются суммарные веса кандидатов  $A_l = \sum_j^{M_l} W'_{jl}$  с остальных процессоров, где  $W'_{jl}$  — вес  $j$ -го кандидата в  $l$ -м процессе. На нулевом процессоре вычисляется суммарный вес  $A = A_0 + \dots + A_{L-1}$ , нормализационный коэффициент  $\alpha = LN/A$  и вырабатывается случайное число  $\xi$ , равномерно распределенное в  $[0,1)$ .

В классическом алгоритме АФК для выборки частиц используется величина  $Q_j = W_1 + \dots + W_j$ ,  $1 \leq j < M$ , где  $W_j = W'_j \alpha$ ;  $Q_M = N$ .

В модифицированном алгоритме АФК критерием использования  $j$ -го кандидата в качестве  $i$ -й частицы служит неравенство

$$Q_{j-1} + (1 - \xi) < i \leq Q_j + (1 - \xi).$$

Если обозначить через  $q_l$  сумму весов кандидатов до  $l$ -го процессора, т. е.

$$q_l = \sum_{m=0}^{l-1} A_m \alpha + (1 - \xi),$$

то из предыдущего неравенства следует, что из кандидатов для  $l$ -го процессора должны получиться частицы со сквозными номерами

$$[q_l] + 1, [q_l] + 2, \dots, [q_{l+1}],$$

всего  $N_l = [q_{l+1}] - [q_l]$  штук.

Значение  $\alpha$  вместе с массивом  $\{q_m\}$  рассылается по всем процессорам. Тогда на каждом из них из кандидатов может быть согласованно выработано  $N_l$  частиц по правилу АФК, так как шкала весов между  $q_l$  и  $q_{l+1}$  может быть восстановлена прибавлением к  $q_l$  значений  $W'_{1l} \alpha$ ,  $W'_{2l} \alpha$  и т. д.

Вместо передачи на все процессоры всего массива  $\{q_m\}$  можно было бы на  $l$ -й процессор отправить  $\alpha$  и  $q_l$ , однако это потребовало бы произвести на нулевом процессоре  $L$  операций `MPI_Send` вместо одной `MPI_Bcast`, а массив  $\{q_m\}$  всегда настолько мал, что все определяется временем запуска MPI-операции.

Если  $N_l \geq N$ , то первые  $N$  частиц  $l$ -й процессор использует в качестве своей пачки следующего поколения, а оставшиеся частицы передает на другие процессоры. В противном случае  $l$ -й процессор получит недостающие  $N - N_l$  частиц от других.

Рассылку частиц по процессорам можно проводить по различным алгоритмам, в зависимости от необходимости минимизировать число операций обмена между процессорами и/или объем пересылаемой информации.

**Характеристика компьютерных средств.**

В НИИАР предполагается сформировать четырехуровневый комплекс компьютерных средств для РСЭ ОИРДМ (см. рис. 1):

- однопроцессорные персональные компьютеры (PC) для расчетов по инженерным программам и обработки результатов РСЭ;
- рабочие станции (PS) на основе модулей  $M_{2 \times 2}$ , содержащих по два двухъядерных процессора типа Opteron с частотой не менее 2,0 ГГц;
- кластер с несколькими модулями  $M_{2 \times 2}$  того же типа (не менее 6 модулей на один ИР);
- система удаленного доступа к мощному кластеру другого научного центра.

Рабочие станции предполагается использовать для многовариантных расчетов как в автономном режиме, так и в составе кластера. Кроме того, они могут выступать в качестве резерва на случай выхода кластера из строя, обеспечивая тем самым режим постоянной готовности вычислительных средств к РСЭ ИР.

Кластер НИИАР с достаточным числом модулей и распараллеленной версией прецизионной программы (MCU-RR/P) обеспечивает требуемую оперативность моделирования как отдельных состояний ОИРДМ, так и последовательности состояний в процессе кампании ИР. В случае необходимости проведения многовариантных расчетов для обоснования модернизации элементов активной зоны ИР или повторных расчетов множества прошедших состояний, например с целью уточнения некоторых характеристик длительно облучаемых ЭУ, планируется организовать доступ к внешним вычислительным ресурсам с помощью виртуальной сети защищенного взаимодействия.

**Разработка и применение имитатора активной зоны реактора СМ.** В настоящее время в рамках SupRRoS-технологии применительно к высокопоточному реактору СМ разработан комплекс программных средств — имитатор активной зоны этого реактора (IMCOR\_SM) [2], структурная схема которого с обозначениями взаимосвязей входящих в него программных средств приведена на рис. 2.

Имитатор позволяет моделировать состояния полномасштабной активной зоны с учетом выгорания топлива, изменения положений органов СУЗ и отравления бериллия изотопами  $^6\text{Li}$

и  $^3\text{He}$ . Обеспечена возможность работы с имитатором инженерного персонала, знающего конструкцию и режимы работы реактора, но не имеющего представления о форматах ввода-вывода информации в программе MCU-RR. Для этого средствами пакета Delphi разработан графический интерфейс, в котором использованы привычные для персонала реактора образы элементов активной зоны и пультовых приборов, а также разработана программа-генератор MCU-моделей, преобразующая экранные образы в файл исходных данных для программы MCU-RR. Предусмотрена возможность задания последовательности состояний активной зоны, отличающихся положениями органов СУЗ, значениями мощности реактора, продолжительности интервала *горения* топлива и других параметров, что позволяет формировать цепочку файлов исходных данных для моделирования, например, кампании реактора за один пуск имитатора.

Основное назначение имитатора — прогнозное моделирование загрузки и кампании реактора с определением основных нейтронно-физических характеристик активной зоны для оптимизации сценария кампании, доказательства непревышения пределов нормальной эксплуатации (по мощностным параметрам) и достижения требуемых параметров облучения материалов в каналах. Для использования имитатора в этом качестве потребовалось верифицировать его на представительном массиве экспериментальных и эксплуатационных данных, полученных на реакторе.

Для примера на рис. 3 приведены результаты моделирования критических состояний в нескольких кампаниях 2008 года. Средние за кампанию значения реактивности  $\rho$  находятся в пределах  $\pm 0,1\% \Delta k/k$ , что недосяжимо для программ инженерного класса (одна из лучших программ такого класса ТИГРИС обеспечивает отклонения от критичности  $\pm 1,5\% \Delta k/k$  при РСЭ реактора ИРТ-МИФИ [9]).

В результате трехлетней опытной эксплуатации имитатора IMCOR\_SM в его базе данных накопился значительный объем информации по всем смоделированным состояниям примерно 70 прошедших кампаний (всего  $\sim 700$  состояний и  $\sim 70\,000$  значений основных параметров). Анализ этой информации и установление функциональных зависимостей между нейтронно-физическими характеристиками активной зоны представляется актуальной задачей, поскольку обеспечивает инженером служ-

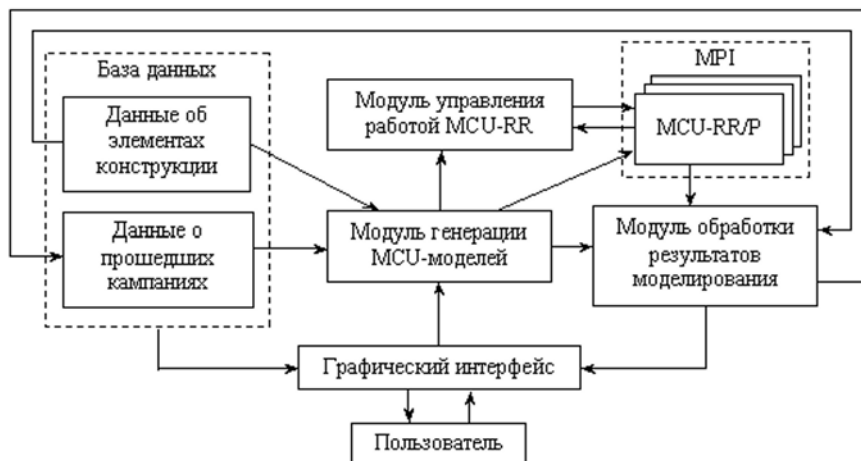


Рис. 2. Структурно-функциональная схема имитатора активной зоны ИР

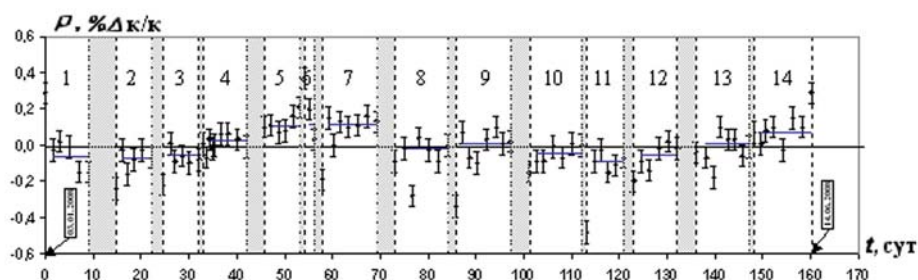


Рис. 3. Результаты моделирования критических состояний в кампаниях 2008 года:  $\bar{\rho}$  — значения реактивности со статистической погрешностью; 1–14 — номера кампаний; серым цветом выделены интервалы времени между кампаниями

бы эксплуатации реактора своеобразным инструментом для оперативного обоснования и выбора оптимальных параметров предстоящих кампаний при работе реактора в установившемся режиме.

Для примера демонстрируется построение функциональных зависимостей одной из важнейших характеристик активной зоны — коэффициента неравномерности энерговыделения в поперечном сечении ТВС  $k_{ТВС} = q^{\max}/\overline{q_{ТВС}}$  ( $q^{\max}$  — мощность максимально напряженного твэла;  $\overline{q_{ТВС}}$  — средняя мощность твэлов) от набора влияющих параметров: выгорания топлива  $\alpha_0$  в самой ТВС, выгорания топлива  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в двух соседних ТВС, глубины погружения органов компенсации реактивности — центрального  $x_{ЦКО}$  и четырех угловых  $x_{КО}$ .

Поскольку имитатор IMCOR\_SM вычисляет в ходе моделирования кампаний и заносит в базу данных значения  $q^{\max}$  и  $\overline{q_{ТВС}}$  для каждой ТВС в каждом заданном состоянии, то можно получить множество реализовавшихся значений  $k_{ТВС}$ , проанализировать их корреляции с на-

бором влияющих параметров и получить искомые функциональные зависимости в следующем виде:

$$k_{ТВС} = f_{ЦКО}(x_{ЦКО})f_{КО}(x_{КО}) \times \left[ (a_0 + a_1\alpha_1 + a_2\alpha_1^2 + a_3\alpha_2) \alpha_0^3 + (b_0 + b_1\alpha_1 + b_2\alpha_1^2 + b_3\alpha_2) \alpha_0^2 + (c_0 + c_1\alpha_1 + c_2\alpha_1^2 + c_3\alpha_2) \alpha_0 + (d_0 + d_1\alpha_1 + d_2\alpha_1^2 + d_3\alpha_2) \right],$$

где  $f_{ЦКО}(x_{ЦКО})$  и  $f_{КО}(x_{КО})$  — линейная и кубическая функции от глубины погружения центрального и угловых компенсирующих органов соответственно.

Для нахождения коэффициентов  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  и  $d_j$  ( $j = 0, 1, 2, 3$ ) минимизировали сумму квадратов отклонений значений  $k_{ТВС}$ , полученных по приведенной формуле и непосредственно вычисленных имитатором. Гистограмма этих отклонений для ТВС на границе с центральной реакторной полостью приведена на рис. 4. Среднеквадратичное отклонение соста-



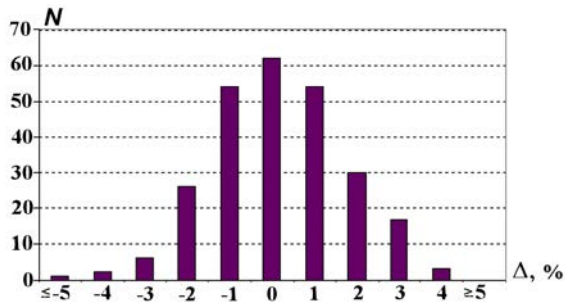


Рис. 4. Распределение отклонений значений коэффициента неравномерности  $k_{ТВС}$ , полученных с помощью аппроксимирующей функции и имитатора IMCOR\_SM ( $N$  — число случаев)

вило  $\delta_{откл} = 1,8\%$  при статистической погрешности монте-карловских расчетов  $\delta_{им} = 1\%$  (одно стандартное отклонение). Таким образом, относительная погрешность аппроксимирующей формулы оценивается в  $1,5\%$ .

Аналогичный подход может быть использован для обработки результатов расчетов и других характеристик активной зоны. Набор таких аппроксимирующих функций может использоваться не только для оперативного прогноза, он позволяет также идентифицировать статистические выбросы в результатах моделирования и отбраковывать их при извлечении из базы данных.

В последнее время обозначилось еще одно направление использования имитаторов активных зон ИР, связанное с обоснованием технических предложений по модернизации элементов активной зоны: введению новых типов ТВС, выгорающих поглотителей, оптимизации размещения и величины облучательных объемов и др. Одновременно может быть обоснован сценарий поэтапного перехода от штатных состояний активной зоны к ее модернизированным вариантам.

### Заключение

Разрабатываемый в ГНЦ НИИАР вычислительный комплекс призван обеспечивать РСЭ не только ИР, но и сопутствующих объектов использования радиоактивных и делящихся материалов. На основе опыта уже выполненных разработок можно заключить, что следование основным положениям обобщенной технологии SupRROS обеспечивает универсальность разрабатываемых вычислительных средств, их применимость к любым ИР, приемлемые для

практики точность и оперативность вычислений нейтронно-физических характеристик ИР.

### Список литературы

1. Ванев Ю. Е., Марихин Н. Ю. Современная технология разработки имитаторов активных зон исследовательских реакторов для оперативного сопровождения их эксплуатации // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 1. С. 92—99.
2. Ванев Ю. Е., Марихин Н. Ю., Кудряков Р. Р., Малков А. П. Программные средства — имитаторы активных зон исследовательских реакторов для сопровождения эксплуатации // Там же. 2006. Вып. 4. С. 115—121.
3. Гомин Е. А. Статус MCU-4 // Там же. Сер. Физика ядерных реакторов. 2006. Вып. 1. С. 6—32.
4. Программа MCU-RFFI/A с библиотекой констант DLC/MCUDAT-1.0. Аттестационный паспорт программного средства № 61 от 17.10.1996. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности Госатомнадзора России. М., 1996.
5. Программа MCU-REA с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.1. Аттестационный паспорт программного средства № 115 от 02.03.2000. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности Госатомнадзора России. М., 2000.
6. Ванев Ю. Е., Булычева Л. В., Дорофеев А. Н. и др. Опыт использования пакета программ MCU для обоснований ядерной и радиационной безопасности работ в топливном цикле исследовательских реакторов НИИАР // Тез. докл. межд. науч.-тех. конф. "Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии". Димитровград, 25—29 июня 2001 г. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2001. С. 238—239.
7. Ванев Ю. Е. Разработка комплекса программных средств для сопровождения эксплуатации исследовательских реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2006. Вып. 1. С. 84—92.

8. *Гуревич М. И., Марихин Н. Ю., Тельковская О. В. и др.* Оптимизация нормализации поколений при использовании весовых окон // Труды XLVII науч. конф. МФТИ. Москва, 25 ноября 2004 г. М.: МФТИ, 2004. С. 75—89.

9. *Щуровская М. В., Алферов В. П.* Расчет и эксперимент при определении эксплуата-

ционных характеристик исследовательского реактора // Атомная энергия. 2006. Т. 101. Вып. 4. С. 254—262.

Статья поступила в редакцию 20.10.08.

---