

УДК 621.039.51:621.039.573

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА — ИМИТАТОРЫ АКТИВНЫХ ЗОН ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ю. Е. Ванеев, Н. Ю. Марихин, Р. Р. Кудояров, А. П. Малков
(ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград)

Представлены результаты разработок программного комплекса для сопровождения эксплуатации исследовательских реакторов. Приведены описания структуры этого комплекса, особенностей разработок универсальных и объектно-ориентированных компонентов, а также результатов верификации с использованием экспериментальных данных, полученных на реакторе СМ. Продемонстрированы возможности прогнозирования продолжительности кампании этого реактора.

Введение

Расчетное сопровождение эксплуатации исследовательских реакторов (ИР) наряду с экспериментальными методами призвано обосновывать безопасные и оптимальные параметры загрузки активной зоны, не превышение пределов безопасной работы реактора в процессе кампании, достижение требуемых характеристик облучательных устройств, модернизацию этих устройств и элементов конструкции активной зоны. В то же время отмечается жесткая экономия средств на дорогостоящие экспериментальные обоснования проектов, разработки и совершенствование инженерных программных средств (ПС) для решения перечисленных задач применительно к каждому ИР. В связи с этим актуальны разработки на основе современных компьютерных технологий универсального вычислительного комплекса, который обеспечит приемлемую для практики оперативность и более высокую по сравнению с инженерными ПС точность расчетов любых ИР, а также доступность используемых ПС инженерному персоналу, планирующему перегрузку перед каждой кампанией и непосредственно влияющему на степень безопасности и эффективности эксплуатации ИР.

Цель работы — описание результатов разработок такого комплекса, его универсальных и объектно-ориентированных компонентов, а также результатов их верификации применительно к высокотопному реактору СМ — одной из ше-

сти эксплуатируемых в ГНЦ НИИАР исследовательских ядерных установок [1].

Структура вычислительного комплекса

Структура разрабатываемого в ГНЦ НИИАР вычислительного комплекса приведена на рис. 1. К его универсальным компонентам относятся компьютерная система *кластерного* типа и программа прецизионного класса, разрабатываемая в составе российского проекта MCU [2]. Для учета разнообразия конструкций ИР и особенностей задач сопровождения их эксплуатации была сформирована версия программы MCU-RR/P [3], в которой реализованы алгоритмы распараллеливания вычислений с использованием систем PVM и MPI [4]. Распараллеленная версия MCU-RR/P в настоящее время может быть поставлена на любом кластере, что было доказано при проведении расчетов по этой версии на кластерах в ГНЦ НИИАР и РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров). Было показано также, что версия программы MCU-RR в операционной системе (ОС) Linux обеспечивает увеличение скорости счета на ~ 20% по сравнению с версией этой программы в ОС Windows, а переход в перспективе к 64-разрядной ОС может обеспечить дополнительное ускорение счета. Увеличение числа процессоров в составе кластера пропорционально увеличивает скорость счета по программе MCU-RR/P и приближает эту программу по данному параметру к комплексам инженерных

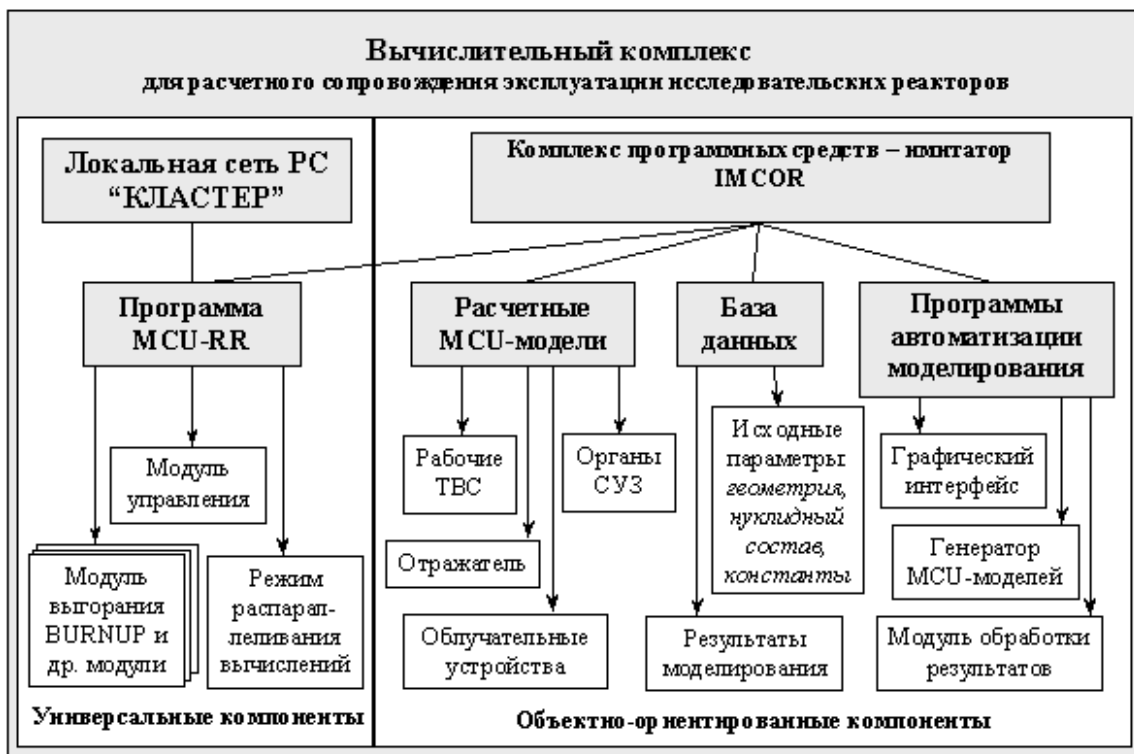


Рис. 1. Структура вычислительного комплекса

ПС, моделирующим кампанию реактора на однопроцессорных компьютерах.

При моделировании программным комплексом процесса эксплуатации каждого ИР необходимо разрабатывать так называемые объектно-ориентированные компоненты, учитывающие особенности конструкции активной зоны данного реактора. При их разработке применительно к реактору СМ, выбранному в качестве типового ИР, ставилась дополнительная задача — выделить универсальные подходы и структуры, применимые для любого другого ИР (см. рис. 1). Объединение перечисленных ПС в единый комплекс названо имитатором IMCOR активной зоны ИР (имитатор IMCOR_SM для реактора СМ).

Результаты разработок и верификации имитатора IMCOR_SM

Имитатор активной зоны ИР разработан в НИИАР в 2005 г. для реактора СМ. Активная зона реактора высотой 350 мм окружена боковым бериллиевым отражателем и содержит до 32 рабочих ТВС квадратного профиля (69 мм ×

× 69 мм) со стержневыми твэлами крестообразного поперечного сечения (максимальное число твэлов в одной ТВС — 188). Четыре стержня аварийной защиты (АЗ), один центральный (ЦКО) и четыре угловых компенсирующих органа (КО 1-4) образуют систему управления и защиты (СУЗ) реактора. В центральной полости, нескольких ТВС и отражателе размещены вертикальные каналы для облучения образцов различных материалов и изделий.

Среди особенностей разработки имитатора IMCOR_SM следует отметить:

- использование гомогенных моделей ТВС с возможностью вычислений мощности максимально напряженных твэлов в каждой ТВС в любой момент кампании;
- возможность моделирования *отравления* бериллия образующимися при облучении ядрами гелия-3 и лития-6 в рамках модуля выгорания BURNUP;
- наличие графического интерфейса (на основе пакета Delphy), в котором использованы привычные для персонала реактора образы элементов активной зоны и пультовых приборов (рис. 2);

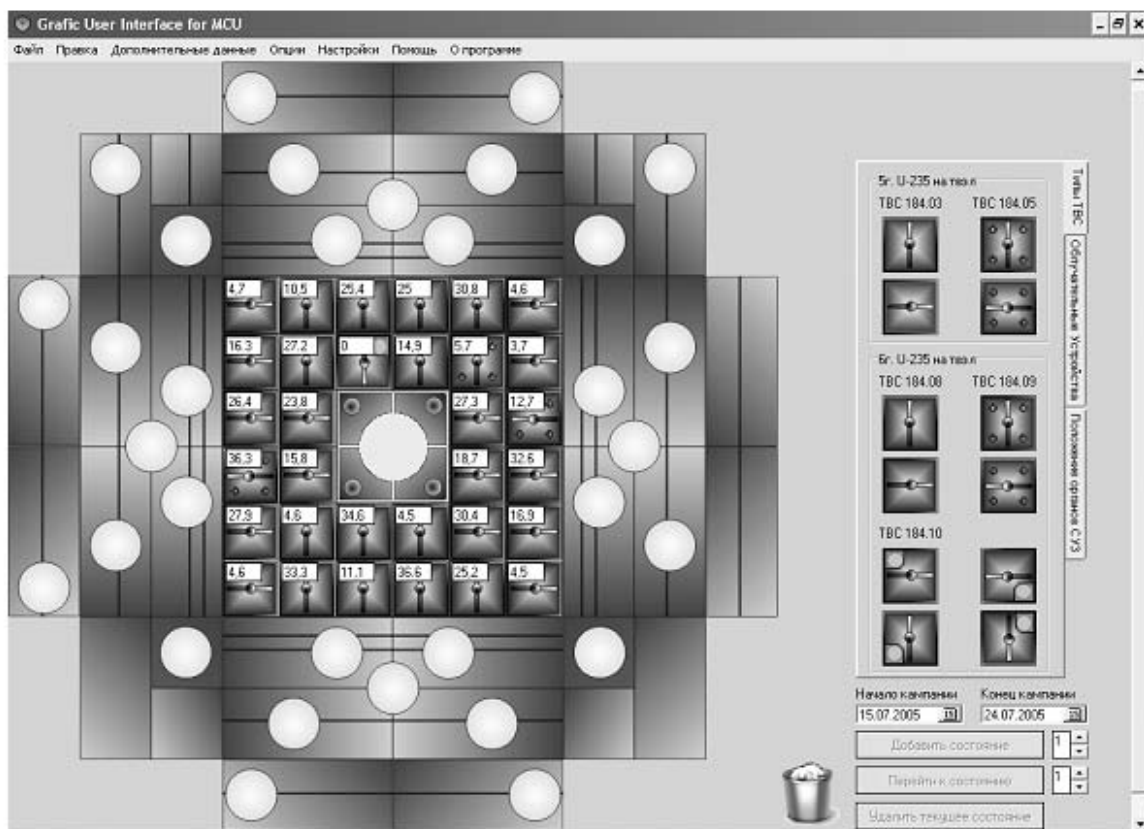


Рис. 2. Экранная форма программы для задания и визуализации данных о состояниях активной зоны реактора СМ

– разработку программы-генератора MCU-моделей, преобразующей экранные образы в файл исходных данных для программы MCU-RR/P. При этом имеется возможность задать последовательность состояний активной зоны, отличающихся положениями органов СУЗ, значениями мощности реактора, продолжительности интервалов *горения* топлива и другими параметрами, что позволяет формировать цепочку файлов исходных данных для моделирования, например, кампании реактора за один пуск имитатора.

Верификацию имитатора IMCOR_SM проводили с использованием эксплуатационных данных, полученных на реакторе в период с 1990 по 2005 г., и результатов специально поставленных экспериментов по определению основных характеристик активной зоны.

Особенность работы реактора в 2005 г. была связана с переходом на загрузку новыми ТВС с повышенным на 20 % содержанием урана-235 (6,0 г/твэл), что приводило к одновременному

облучению ТВС старого (5,0 г/твэл) и нового типов. На этапе обоснования параметров расчетных моделей этих ТВС моделировался полный цикл их облучения в реакторе. Результаты расчетов потвэльных распределений выгорания топлива в ТВС при использовании их гетерогенных моделей совпали с соответствующими данными, полученными гамма-сканированием облученных твэлов. Сравнение результатов расчетов по гетерогенным и гомогенным моделям ТВС показало, что при использовании более простых гомогенных моделей с 3–4 зонами в поперечном сечении не происходит потери в точности расчетов $K_{эф}$, средних значений мощности твэлов и выгорания топлива в объемах выделенных гомогенных зон.

Исследовалось влияние на реактивность ρ изменения уран-водного отношения в объеме активной зоны в результате *подкипания* теплоносителя на поверхности наиболее напряженных твэлов, теплового расширения оболочек твэлов, а также *распухания* твэлов вследствие накопления в них продуктов деления. При этом исполь-

зовалась расчетная зависимость ρ от площади поперечного сечения твэла S_t : $\rho(S_t) = -0,0243S_t + \text{const}$. Было показано, что суммарное уменьшение реактивности активной зоны при учете этих факторов не превышает 0,1 % $\Delta k/k$ ¹.

Результаты моделирования активной зоны в *холодных неотравленных* состояниях перед началом кампании № 1 (от 15.07.2005) приведены в табл. 1. Статистические погрешности расчетных значений величин соответствуют доверительной вероятности 0,67.

Результаты расчетов последовательности *горячих* критических состояний активной зоны при рабочем уровне мощности реактора (табл. 2) свидетельствуют о корректности моделирования процессов, связанных с отравлением и выгоранием топлива.

Время счета одного состояния с погрешностью в $K_{эф} \pm 0,08$ % $\Delta k/k$ на одном процессоре с частотой генератора 1 ГГц составило 3 часа. Соответственно время счета десяти состояний в кампании № 1 на десяти процессорах с частотой 3 ГГц составит 1 час (в предположении, что

скорость счета пропорциональна частоте). Это вполне приемлемое время для оценки основных характеристик кампании на стадии ее планирования.

После моделирования конечного состояния активной зоны в кампании № 1 и выдержки топлива до начала следующей кампании формируется финальный файл с измененными концентрациями нуклидов в выделенных зонах каждой ТВС. Этот файл становится фрагментом файла исходных данных для следующей кампании. Таким образом смоделированы первые 17 кампаний (рис. 3). Отклонения средних значений реактивности в каждой кампании заключены в интервале $\pm 0,2$ % $\Delta k/k$.

Результаты моделирования всех прошедших кампаний хранятся в базе данных имитатора IMCOR_SM в виде наборов рабочих файлов, что позволяет при необходимости вернуться к любому смоделированному состоянию в любой кампании для дополнительных расчетов различных эффектов реактивности и пространственно-энергетических распределений скоростей реакций.

Таблица 1

Характеристики состояний активной зоны в начале кампании № 1

Характеристика, % $\Delta k/k$	Расчет (Р)	Эксперимент (Э)	Р/Э
Начальная подкритичность (ЦКО-350 мм, 4КО-450 мм)*	3,0 ± 0,1	2,6 ± 0,2	1,15
Отклонение от критичности:			
– на минимально-контролируемом уровне мощности (ЦКО-67 мм, 4КО-450 мм)	0,0 ± 0,06	0	—
– на "автоматном" уровне мощности (~ 4 МВт) (ЦКО-110 мм, 4КО-345 мм)	-0,1 ± 0,06	0	—
Эффективность органов СУЗ:			
– ЦКО (4КО-450 мм)	3,3 ± 0,1	2,9 ± 0,2	1,14
– четырех АЗ (ЦКО-67 мм, 4КО-450 мм)	3,2 ± 0,1	3,4 ± 0,2	0,94
– каждого КО (ЦКО-67 мм, 3КО-450 мм):			
• КО-1	1,7 ± 0,1	1,8 ± 0,1	0,94
• КО-2	1,9 ± 0,1	1,8 ± 0,1	1,06
• КО-3	2,5 ± 0,1	2,3 ± 0,1	1,09
• КО-4	1,8 ± 0,1	2,0 ± 0,1	0,90
– суммарная эффективность четырех КО:			
• при суммировании по всем КО	7,9 ± 0,2	7,9 ± 0,5	1,00
• при одновременном перемещении всех КО (ЦКО полностью извлечен)	5,5 ± 0,1	—	—

*Условные обозначения глубины погружения ЦКО и четырех КО.

$$^1 \Delta k/k = \frac{1 - K_{эф}}{K_{эф}}$$

Результаты моделирования кампании № 1 (ЦКО извлечен)

Характеристика кампании	Время, сут	Критическое положение четырех КО, мм	Энерговыработка, МВт·сут	Расчетное значение характеристики
Реактивность в состояниях, % $\Delta k/k$:				
– выхода реактора на мощность 90 МВт (температурный эффект)	0,49	248	31,2	$0,03 \pm 0,06$ ($0,6 \pm 0,1$)
– достижения стац. отравления ^{135}Xe (эффект отравления)	2,29	163	194	$0,04 \pm 0,06$ ($3,9 \pm 0,1$)
– в промежуточных состояниях	3,79 5,29 7,29	155 140 118	329 464 689	$0,08 \pm 0,06$ $0,06 \pm 0,06$ $0,09 \pm 0,06$
– в конце кампании	9,27	93	821	$-0,17 \pm 0,06$
– среднее значение за кампанию				0,03
Среднее по активной зоне выгорание ^{235}U в конце кампании, %:	9,27		821	24,6 (25 ± 1)*

*рассчитано по программе MCU-RR

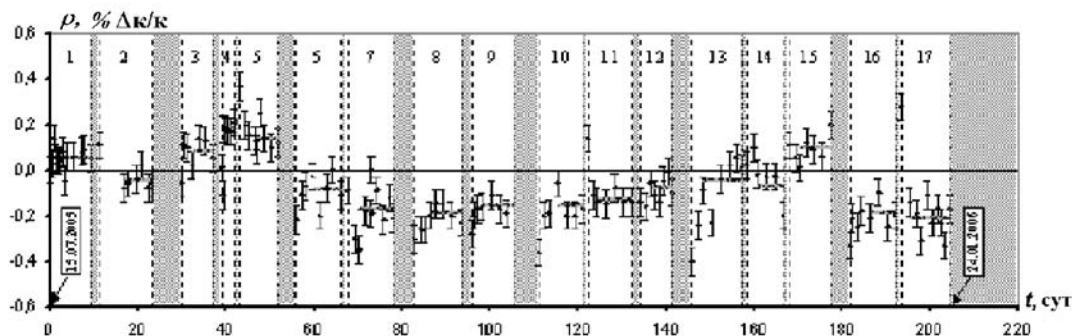


Рис. 3. Результаты моделирования критических состояний активной зоны реактора СМ: 1—17 — номера кампаний; · — результаты расчета по программе MCU-RR; — — средние расчетные значения реактивности за кампанию; серым цветом выделены интервалы времени между кампаниями

Возможности имитатора для прогнозирования продолжительности кампаний

Располагая экспериментально полученными градуировочными кривыми эффективности органов СУЗ, по их критическим положениям в момент кампании t вычисляли запас реактивности $\Delta\rho(t)$, по исчерпанию которого ($\Delta\rho(\Delta t_k) = 0$) определяли максимально возможную продолжительность кампании Δt_k при фиксированной мощности реактора (инженерный подход). Расчетное значение величины $\Delta\rho(t)$ определялось как разность значений реактивности в состояниях с полностью извлеченными стержнями (одновременно ЦКО и четырех КО) и в момент времени t .

На рис. 4 для кампании № 1 приведены зависимости запаса реактивности $\Delta\rho(t)$ от времени работы реактора, определенные с использованием инженерного подхода и имитатора.

Изменение запаса реактивности $\Delta\rho_{\Pi}$ от начала кампании ($\Delta\rho(t = 0) = \Delta\rho_0$) до завершения переходных процессов разогрева и отравления активной зоны (без учета выгорания топлива) (см. рис. 4 и табл. 3) равно сумме эффектов повышения температуры материалов $\Delta\rho_T$, изменения концентраций ксенона-135 $\Delta\rho_{Xe}$ и самария-149 $\Delta\rho_{Sm}$: $\Delta\rho_{\Pi} = \Delta\rho_T + \Delta\rho_{Xe} + \Delta\rho_{Sm}$.

Преобладающая часть величины $\Delta\rho_{Sm}$ обусловлена выгоранием того количества самария-149, которое накопилось за время остановки реактора Δt_0 дополнительно к его стационарной концентрации. Существенно меньший (по моду-

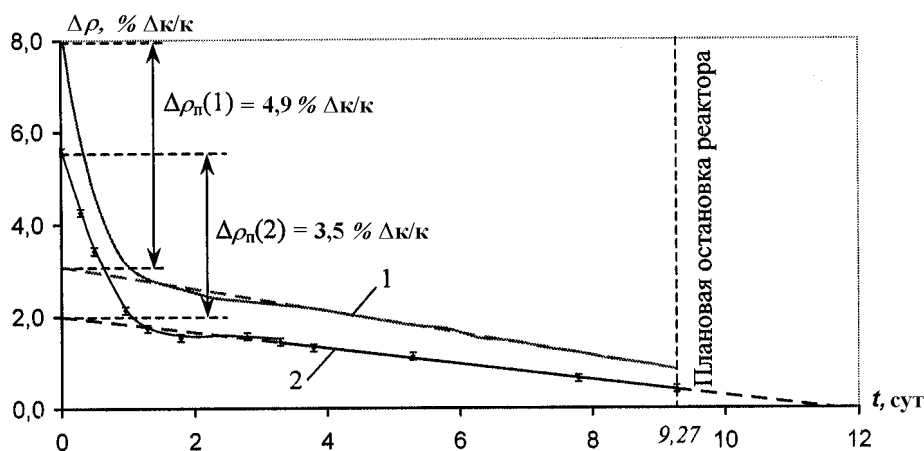


Рис. 4. Изменение запаса реактивности в кампании № 1: 1 — инженерный подход; 2 — расчет по имитатору IMCOR-SM; 9,27 сут — фактическая продолжительность кампании

Таблица 3

Изменение запаса реактивности в кампании № 1

Функция	Запас реактивности, % Δк/к		$\frac{\Delta\rho}{\Delta Q},$ % Δк/к × (МВт · сут) ⁻¹
	$\Delta\rho_0$	$\Delta\rho_p$	
1	8,0	4,9	$2,70 \cdot 10^{-3}$
2	$5,5 \pm 0,1$	$3,5 \pm 0,1$	$1,91 \cdot 10^{-3}$

лю) эффект связан с накоплением самария-149 в свежих (необлученных) ТВС, которых в активной зоне бывает не более четырех. Для загрузки активной зоны в кампании № 1 в отсутствие свежих ТВС (за исключением топливных подвесок КО) $\Delta\rho_{Sm} = -1,2 \pm 0,1$ % Δк/к и $\Delta\rho_p = 3,3 \pm 0,2$ % Δк/к.

После окончания переходных процессов расчетные значения запаса реактивности аппроксимировались прямой линией с использованием ме-

тогда наименьших квадратов. Тангенс угла наклона этой прямой равен темпу падения запаса реактивности при выгорании топлива. Среднее значение этой величины для нескольких смоделированных кампаний составило $(1,92 \pm 0,06) \cdot 10^{-3}$ % Δк/к · (МВт · сут)⁻¹.

Если при прогнозировании длительности кампании исходить из запаса реактивности в начальном состоянии активной зоны, то возникает проблема учета влияния переходных процессов на реактивность: эффектов отравления ¹³⁵Xe и "разотравления" ¹⁴⁹Sm, температурного эффекта и эффекта, связанного с переходными процессами в загруженных свежих и переставленных ТВС. Оценить заранее с требуемой точностью значения всех этих параметров на данном этапе не представляется возможным, поэтому приходится моделировать переходные процессы в активной зоне в течение нескольких (3–4) суток.

Таблица 4

Сравнение прогнозируемых и фактических значений длительности кампании

Номер кампании	Дата начала кампании	Время с начала кампании, сут	Запас реактивности на выгорание, % Δк/к	Длительность кампании, сут		$\frac{\Pi - \Phi}{\Phi} \cdot 100\%$
				Прогноз (Π)	Факт (Φ)	
3	14.08.2005	3,94	$0,51 \pm 0,08$	$6,9 \pm 0,5$	7,16	-3
8	06.10.2005	4,42	$1,11 \pm 0,08$	$10,9 \pm 0,5$	10,67	-1
9	19.10.2005	4,53	$0,79 \pm 0,08$	$9,1 \pm 0,5$	9,22	-2
10	03.11.2005	4,24	$0,93 \pm 0,08$	$9,6 \pm 0,5$	9,88	0
16	13.01.2006	4,44	$0,93 \pm 0,08$	$9,8 \pm 0,5$	10,15	-3

Такой подход обеспечивает хорошее совпадение прогноза с реальной продолжительностью кампании (табл. 4).

Заключение

Располагая универсальными компонентами вычислительного комплекса (кластер ASIR и прецизионная программа MCU-RR/P) для расчетного сопровождения эксплуатации ИР, ГНЦ НИИАР приступил к разработке объектно-ориентированных компонентов этого комплекса в соответствии с представленной в данной работе технологией. Первым объектом, для которого проводились эти разработки, стал реактор СМ. Имитатор активной зоны этого реактора (IMCOR_SM) прошел стадию верификации и внедрен в опытную эксплуатацию. Этот имитатор можно рассматривать как типовую разработку, на основе которой:

- доказана возможность достижения приемлемого для практики баланса точности и производительности вычислений при использовании разработанной технологии для информационного сопровождения эксплуатации ИР;
- выявлены общие подходы к разработкам структурных элементов имитаторов активных зон ИР;
- начаты разработки базовых моделей активных зон реакторов ВК-50, РБТ-6, МИР.

В настоящее время формируются предложения об аналогичных разработках для реакторов ПИК, ВВР-М и др.

Список литературы

1. *Цыканов В. А.* Исследовательские реакторы института и внутриреакторные методы исследования: Препринт НИИАР-1(682). М.: ЦНИИАтоминформ, 1986.
2. *Gomin E., Maiorov L.* The MCU Monte Carlo code for 3D depletion calculation // Proc. of Int. Conf. September 27–30, 1999. Madrid, Spain. Vol. 2. P. 997–1006.
3. *Ванеев 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.
4. *Гуревич М. И., Марихин Н. Ю.* Некоторые проблемы реализации расчета реакторов методом Монте-Карло на многопроцессорной ЭВМ МВС-1000/М // Там же. Сер. Физика ядерных реакторов. 2002. Вып. 4. С. 15–22.