

УДК 621.039.51:621.039.573

## СОВРЕМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ИМИТАТОРОВ АКТИВНЫХ ЗОН ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

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

Сформулированы общие требования к комплексу вычислительных средств для расчетного сопровождения эксплуатации исследовательских реакторов, основным компонентом которого является имитатор активной зоны, на базе распараллеленной версии прецизионной программы MCU-RR/P. Представлены основные положения технологии разработки такого имитатора и результаты их реализации применительно к реактору СМ.

### Введение

При современном состоянии отрасли, связанной с эксплуатацией и использованием исследовательских реакторов (ИР), выделяемые бюджетные средства направляются не на разработку и сооружение новых ИР, а на продление ресурса существующих реакторов. В этих условиях расчетное сопровождение эксплуатации (РСЭ) ИР, необходимое для обоснования их безопасности, повышения эффективности, совершенствования конструкции, осуществляется по-старому, с использованием инженерных программных средств (ПС), которые не учитывают в полной мере специфику ИР и не всегда обеспечивают требуемую точность расчетов. В результате эффект от применения таких ПС сводится к минимуму и потенциальные возможности РСЭ не реализуются.

В то же время развитие компьютерных технологий и программных разработок в области нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов достигло такого уровня, что становится возможным по-новому организовать процедуру РСЭ с использованием высокопроизводительных компьютеров, существующих прецизионных (высокоточных) программ с распараллеливанием вычислений на нескольких процессорах (*кластерах*) [1], а также различных средств автоматизации моделирования. При таком подходе повышение точности расчетов характеристик ИР будет сочетаться с универсальностью ПС, которые могут быть использованы для рас-

четов любых реакторов, а также с их доступностью не только специалистам-исследователям, но и инженерам служб эксплуатации ИР, формирующим картограммы загрузки активной зоны (АЗ) перед каждой кампанией и непосредственно влияющим на степень безопасности и эффективности эксплуатации ИР.

Таким образом, актуальны разработки качественно нового комплекса вычислительных средств (ВС) для обоснований безопасности ИР любого типа, эффективности их работы в режиме нормальной эксплуатации, а также для исследований по совершенствованию их конструкции.

Цель данной работы — формулировка общих требований к комплексу ВС для РСЭ ИР и представление результатов начального этапа его разработки в ГНЦ РФ НИИАР на примере реактора СМ [2].

### Основные требования к комплексу ВС для РСЭ

Разрабатываемый комплекс ВС для РСЭ любого ИР призван решать следующие задачи:

- обоснование оптимальных параметров загрузки АЗ;
- обоснование неперевышения пределов безопасной эксплуатации (по мощностным параметрам);
- повышение информативности испытаний материалов в каналах;

- исследования изменений характеристик АЗ в рассматриваемых вариантах ее модернизации.

Для решения этих задач в состав разрабатываемого комплекса ВС должны входить:

- кластерная система на базе процессоров типа Pentium-IV/3000;
- комплекс программ для нейтронно-физических расчетов реакторов любого типа методом Монте-Карло (например комплекс из проекта MCU [3], версия MCU-RR [4]);
- инженерные программы расчета нейтронно-и теплофизических параметров элементов АЗ (для каждого ИР свои программы);
- базовые расчетные модели АЗ ИР и облучательных устройств (ОУ);
- компьютерная база данных с информацией о параметрах расчетных моделей различных ТВС, ОУ и АЗ в целом, а также о результатах моделирования кампаний;
- средства автоматизации моделирования, в частности формирования моделей и графического отображения исходных данных и результатов.

Результатом применения специальной технологии объединения перечисленных ПС для решения поставленных задач являются имитаторы АЗ ИР (ИМЗОР, или IMCOR в английской транскрипции), которые позволяют вычислять следующие характеристики:

- эффекты реактивности для стартовой загрузки АЗ (эффективность органов системы управления и защиты (СУЗ), эффекты перегрузки ТВС и ОУ и т. д.);
- выгорание топлива в каждой ТВС с учетом перемещения органов СУЗ в процессе кампании;
- характеристики условий облучения материалов и изделий в каналах, а также элементов конструкции самих реакторов;
- мощности каждой ТВС и максимально напряженного участка твэла в каждой ТВС в процессе кампании (перемещение наиболее "горячей" области);
- запас до кризиса теплообмена на поверхности твэлов.

Современная технология разработки имитаторов IMCOR характеризуется следующими основными положениями:

1. Используется минимум приближений для решения уравнения переноса нейтронов в трехмерной геометрии при использовании прецизионной программы, что обеспечивает более высокую точность расчетов нейтронно-физических характеристик АЗ по сравнению с традиционным инженерным подходом.
2. Обеспечивается приемлемое для практики быстродействие путем использования распараллеленной версии прецизионной программы и достаточного числа процессоров в составе кластера.
3. Корректируются алгоритмы в некоторых модулях прецизионной программы для учета специфики решаемых задач РСЭ ИР.
4. Разрабатывается базовая расчетная модель АЗ ИР, обосновываются оптимальные параметры этой модели с учетом особенностей конструкции и условий эксплуатации ИР.
5. Формируется база данных, включающая набор *стандартизованных* параметров расчетных моделей, значения которых получают заранее из экспериментов или решений модельных задач, а также массивы накапливаемой информации о состояниях модели АЗ в процессе каждой кампании.
6. Разрабатываются ПС автоматизации формирования моделей и графического отображения исходных данных и результатов моделирования.
7. Проводится верификация разработанных ПС на эксплуатационных тестах для каждого ИР.

Первые три положения отражают универсальность представляемой технологии, т. е. результаты одноразовой реализации этих положений могут быть использованы для любых ИР. Разработки, соответствующие следующим трем положениям, проводят для каждого ИР с учетом его специфики, но принципы разработки расчетных моделей, базы данных, средств автоматизации моделирования — все это в обобщенном виде также характеризует универсальность новой технологии.

## Разработка базового ПС

В качестве базового компонента имитаторов IMCOR выбрана прецизионная программа MCU-RR [4, 5], разработанная в РИЦ "Курчатовский институт" по техническим заданиям НИИАР, в которых были сформулированы основные требования по расширению возможностей программы с целью учета специфики решаемых задач для ИР НИИАР. Почти 10-летний опыт сотрудничества с разработчиками программы показал, что по точности она не уступает ни одной из используемых на предприятиях отрасли зарубежных программ (например MCNP), имея перед ними такие преимущества, как открытость, доступность, мобильность и др., т. е. возможности относительно оперативных разработок различных ее модификаций, уточнения константного обеспечения, непосредственного общения с разработчиками при анализе получаемых результатов и обучении пользователей.

Важнейшая отличительная особенность программы MCU-RR — наличие в ее составе модуля *выгорания*, позволяющего моделировать изменения изотопного состава топлива в процессе работы реактора. При любом числе чередующихся интервалов работы на мощности и перегрузки расчеты полномасштабной АЗ ИР в процессе выгорания топлива с учетом перемещения органов СУЗ могут быть проведены за один пуск программы. Такой возможностью не обладает ни одна из других существующих программ прецизионного класса.

Реализация режима распараллеливания вычислений на кластере практически уравнивает возможности программы MCU-RR и комплексов инженерных ПС, моделирующих кампанию реактора, при очевидном выигрыше в точности расчетов скоростей реакций по прецизионной программе.

Первая распараллеленная версия программы MCU-RR/ASIR была разработана в НИИАР на базе кластера ASIR [1] с использованием системы PVM с объединением накапливаемой процессорами информации только в конце расчета (без промежуточных обменов).

В версии MCU-RR/P на кластере MBC-1000/М использована система MPI, реализована синхронизация процессоров и объединение накапливаемой ими информации на промежуточных этапах расчета [6].

Версия MCU-RR/P была сгенерирована и на кластере ASIR, что доказало совместимость раз-

работок, проводимых в РИЦ "Курчатовский институт" и НИИАР по совершенствованию процесса распараллеливания вычислений и других алгоритмов программы MCU-RR/P, задействованных в решении стоящих перед имитаторами IMCOR задач. Этот факт свидетельствует также о возможности переноса проводимых разработок и на новый кластер ROMCOD (Reactors Operation Maintenance with use of CODEs), который планируется разработать в НИИАР на современных процессорах типа Pentium-IV/3000 специально для задач РСЭ ИР.

Таким образом, в результате многолетнего поэтапного финансирования НИИАРом разработок программы MCU-RR сформировано уникальное ПС, позволяющее создавать на его основе качественно новые имитаторы АЗ любых ИР для решения задач РСЭ.

## Разработка компонентов имитатора IMCOR\_SM

Прецизионная программа MCU-RR/P позволяет получать значения нейтронно-физических параметров АЗ ИР с точностью, ограниченной в основном точностью оцененных ядерных данных, содержащихся в используемых библиотеках констант. Для этого необходимо разработать соответствующую модель АЗ, в которой все основные элементы конструкции заданы с их реальными размерами и внутренней структурой без использования принципа гомогенизации. Применительно к реактору СМ такая прецизионная модель АЗ может быть разработана, однако использование ее в рассматриваемых задачах РСЭ потребует приобретения в несколько раз большего числа процессоров в составе кластера по сравнению с вариантом, когда используется гомогенная модель, при этом выигрыш в точности расчетов будет незначительным.

Для решения модельных задач и формирования архива параметров, используемых в основных расчетах по гомогенным моделям, достаточно задавать в гетерогенном виде только отдельные ТВС. Для реактора СМ такие решения были получены в виде детальных потвальных и высотных распределений энерговыделения и выгорания топлива в типовых ТВС в различных состояниях АЗ, что позволило:

- обосновать разбиение объема каждой из этих ТВС на гомогенные высотные слои (5 слоев) и зоны в поперечном сечении (3–4 зоны);

– получить значения коэффициентов неравномерности энерговыделения и концентраций нуклидов в выделенных гомогенных зонах в зависимости от выгорания топлива в самой ТВС и окружающих ее ячейках.

Эти параметры размещены в базе данных наряду с другими параметрами, вычислять которые для каждой кампании нет необходимости, например с градуировочными характеристиками компенсирующих органов (КО) на периферии АЗ (КО 1–4) и в центральной полости (ЦКО), получаемыми из экспериментов один раз в несколько лет.

Базовая гомогенная MCU-модель АЗ реактора СМ соответствует кампании от 17.08.2001, перед началом которой были заменены выработавшие ресурс бериллиевые блоки в центральной полости, а в подвесках всех КО установлены "свежие" ТВС (рис. 1). Для каждой ТВС задано свое значение выгорания топлива, полученное из расчета по аттестованной инженерной методике.

Для последующих кампаний пространственные распределения выгорания топлива по ячей-

кам АЗ и в каждой ТВС формируются в процессе моделирования. Всего в модели выделено 292 "горячие" физические зоны, нуклидный состав которых изменяется в процессе кампании. Эта модель относится к разряду инженерных, но сохраняет основные преимущества прецизионной модели:

- решение уравнения переноса в многогрупповом (с подгруппами) приближении с учетом термализации и резонансной структуры сечений;
- детальное задание конструкции органов СУЗ, возможность их установки в произвольное высотное положение;
- подробное описание загрузки каналов облучения с учетом любых особенностей ОУ.

Предполагается, что на кластере ROMCOD время счета по такой модели одного состояния АЗ реактора СМ до требуемой на практике точности не будет превышать ~ 10 минут.

С разработанной MCU-моделью АЗ реактора СМ может работать только квалифицированный пользователь, изучивший форматы ввода исход-

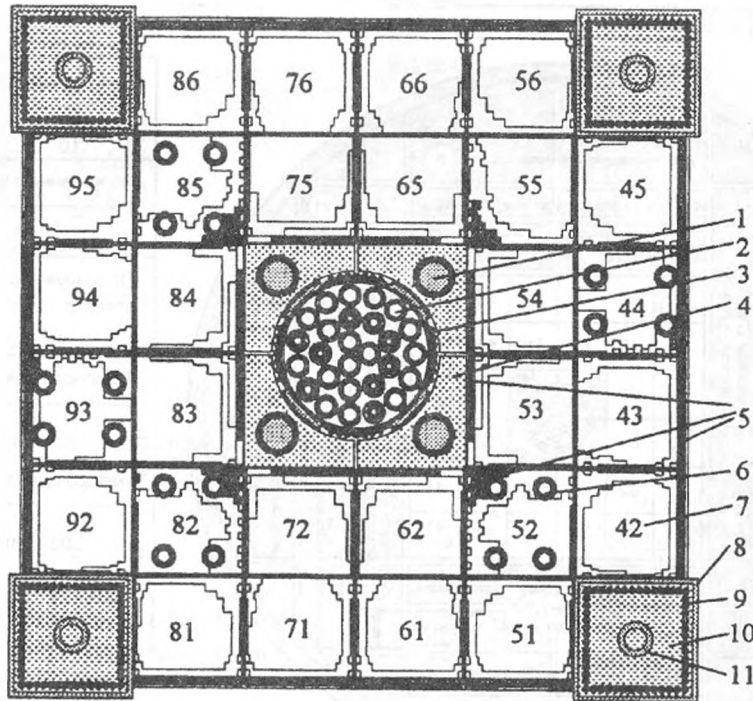


Рис. 1. Поперечное сечение базовой модели АЗ реактора СМ для программы MCU-RR/P: 1 – циркониевый вытеснитель стержня АЗ; 2 – трубка для мишеней; 3 – пэл ЦКО; 4 – бериллиевый вкладыш; 5 – гомогенная зона с наибольшим энерговыделением в каждой ТВС; 6 – облучательный канал; 7 – номер ячейки; 8 – циркониевый короб; 9 – пэл КО; 10 – вода; 11 – стальная труба

ных данных программы MCU-RR. Для инженеров, планирующих очередную перегрузку АЗ, необходимо создать такие средства задания исходных данных, в которых используются привычные для персонала реактора образы пультовых приборов и АЗ из журнала картограмм.

С этой целью разработана программа GRAMOD — графический генератор MCU-моделей в среде визуального программирования Delphi5. Экранная форма программы, представленная на рис. 2, отображает картограмму АЗ, показания пультовых приборов, кнопки управления программой и раскрывающийся список для выбора редактируемого параметра, характеризующего текущее состояние реактора. Редактирование параметров на приборах осуществляется прямым вводом числовых значений в соответствующие поля ввода. Назначение всех приборов поясняется текстовыми комментариями. После задания всех исходных параметров программа GRAMOD записывает их в компак-

тный текстовый файл, который затем преобразуется программой SMRUN в файл исходных данных программы MCU-RR.

### Первый этап верификации имитатора IMCOR\_SM

На начальном этапе верификации разработанных MCU-моделей АЗ были использованы результаты проводимых перед пуском реактора (17.08.2001) экспериментов по определению эффективности органов СУЗ, а также показания штатных приборов контроля мощности реактора и критических положений органов СУЗ. Результаты моделирования состояний АЗ перед началом кампании №1, через 48 суток, прошедших после окончания предыдущей кампании, приведены в табл. 1. Анализируя эти данные, можно отметить удовлетворительное согласие результатов расчетов и экспериментов.

Результаты моделирования кампании №1 приведены в табл. 2. Из их анализа следует, что

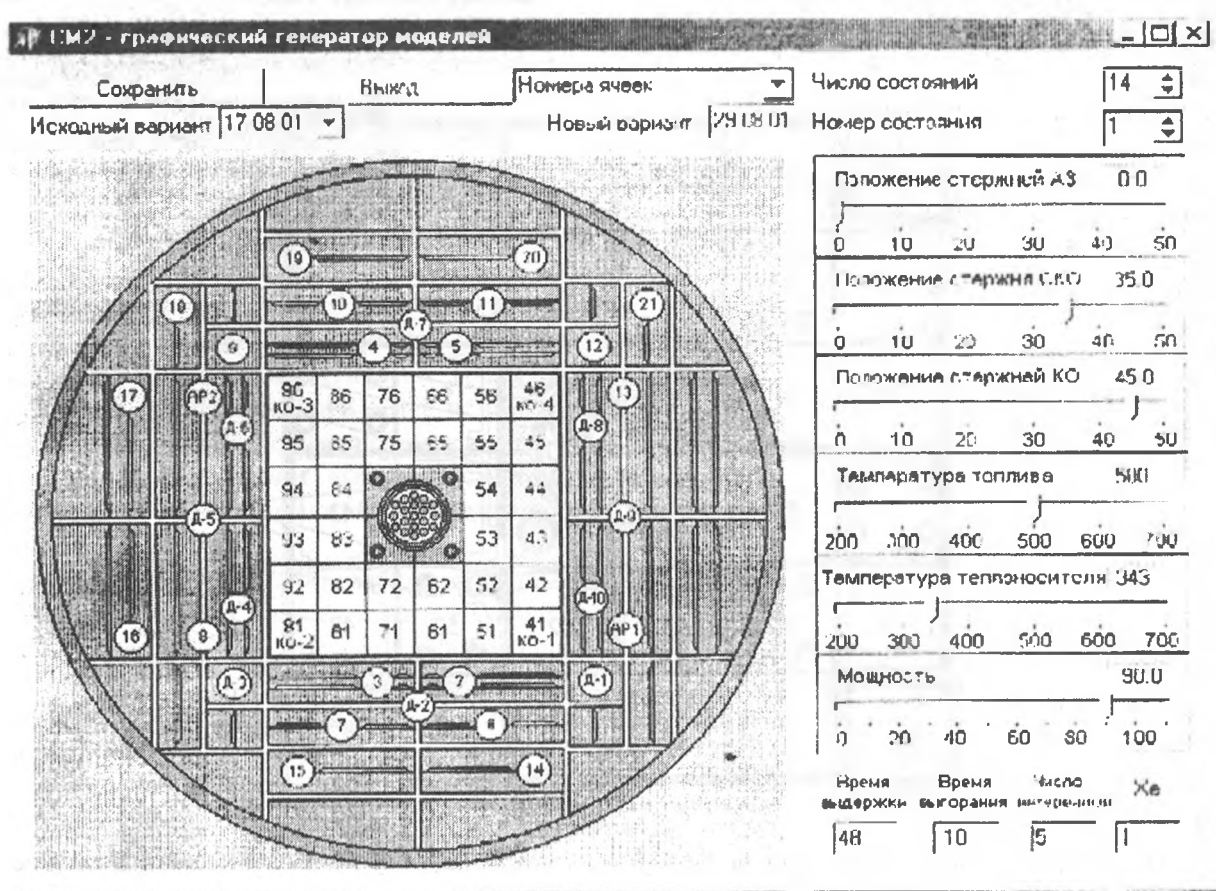


Рис. 2. Экранная форма программы GRAMOD

в начале кампании по мере накопления ксенона-135 и соответствующего извлечения КО нарастает отклонение от критичности, а после достижения ксеноном-135 равновесной концентрации это отклонение стабилизируется на уровне  $1,4 \pm 0,1 \%$   $\Delta k/k$ .

Значения выгорания топлива, полученные из этого расчета и по инженерной методике, удовлетворительно согласуются между собой в пределах расчетных погрешностей.

После завершения моделирования последовательности состояний АЗ в кампании №1 формируется финальный файл с измененными кон-

центрациями нуклидов в "горящих" зонах, который становится файлом исходных данных для начального состояния следующей кампании №2 (дата начала 29.08.2001). В этом файле программы GRAMOD и SMRUN делают замену выгружаемых ТВС в ячейках 62, 66 и 83 на "свежие" и корректируют концентрации осколков деления за счет их распада в течение времени выдержки 1,0 сутки.

Результаты моделирования кампании №2 приведены в табл. 3. Отмечается тот же эффект нарастания отклонений от критичности и их стабилизация на уровне  $1,7 \pm 0,1 \%$   $\Delta k/k$ .

Таблица 1

Характеристики "холодных" состояний реактора в начале кампании №1

Характеристика	Расчет (Р)	Эксперимент (Э)	Р/Э
Эффективность органов СУЗ перед началом кампании, % $\Delta k/k^*$ :			
— участка ЦКО 350—125 мм	$2,2 \pm 0,1$	2,2	1,00
— всего ЦКО (при положении 4КО — 270 мм)	$3,3 \pm 0,1$	3,2	1,03
— участка КО 450—270 мм (при ЦКО — 125 мм)	$0,5 \pm 0,1$	0,49	1,02
— каждого КО (при ЦКО — 170 мм):			
— КО-1	$2,3 \pm 0,1$	2,3	1,00
— КО-2	$2,1 \pm 0,1$	2,0	1,05
— КО-3	$2,6 \pm 0,1$	2,4	1,08
— КО-4	$2,1 \pm 0,1$	2,2	0,95
— всех КО:	$9,1 \pm 0,1$	8,9	1,02
Начальная подкритичность, % $\Delta k/k$ (при ЦКО — 350 мм, 4КО — 450 мм)	$-2,1 \pm 0,1$	-2,2	0,95
Отклонение от критичности, % $\Delta k/k$ (при ЦКО — 125 мм, 4КО — 450 мм)	$0,1 \pm 0,1$	0	—

\*Всюду в таблицах и в тексте  $\Delta k/k = \frac{(1 - K_{эф})}{K_{эф}}$ .

Таблица 2

Результаты моделирования кампании №1 (ЦКО извлечен)

Характеристика	Положение 4КО, мм	Энерговыработка, МВт · сутки	Расчетное значение
Реактивность, % $\Delta k/k$ :			
— при выходе реактора на мощность 90 МВт	295	24,9	+0,6
— при достижении стационарного отравления $^{135}\text{Xe}$	190	220	+1,3
— в конце кампании	77	981	+1,5
Среднее по АЗ выгорание $^{235}\text{U}$ в конце кампании, %			19,3 ( $20 \pm 1$ )*

\* Расчет по инженерной методике.



## Результаты моделирования кампании № 2

Характеристика	Положение		Энерго- выработка, МВт·сутки	Расчетное значение
	ЦКО, мм	4КО, мм		
Реактивность, % $\Delta k/k$ :				
— при выходе реактора на мощность 90 МВт	141	280	9,2	0
— при достижении стационарного отравления $^{135}\text{Xe}$	0	180	214	+1,6
— в конце кампании	0	65	892	+1,8
Среднее по АЗ выгорание $^{235}\text{U}$ в конце кампании, %				19,9 ( $21 \pm 1$ )*

\* Расчет по инженерной методике.

Результаты расчетов последующих кампаний показали, что сохраняются отмеченные тенденции нарастания отклонений от критичности в начале кампании, что связано, по-видимому, с недостаточно точным заданием состава пэлов КО, время эксплуатации которых  $\sim 10$  лет. Тем не менее разработанные модели АЗ в целом удовлетворительно описывают холодные ее состояния и выгорание топлива в ТВС в процессе кампании.

### Заключение

В данной работе сформулированы общие требования к комплексу ВС для РСЭ ИР, основным компонентом которого является имитатор АЗ IMCOR на базе прецизионной программы MCU-RR/P. Представлены основные положения технологии разработки такого имитатора и результаты их реализации применительно к реактору СМ. Первый этап верификации разработанных MCU-моделей АЗ этого реактора показал, что при выбранном разбиении ТВС на однородные зоны результаты моделирования холодных состояний удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. При расчете же состояний в первые сутки работы реактора на номинальной мощности отмечены отклонения от критичности (1–2 %  $\Delta k/k$ ), что требует дальнейшей корректировки расчетных моделей.

Разработанные MCU-модели АЗ реактора СМ и получаемые на их основе результаты расчетов уже на данной стадии разработки имитатора IMCOR\_SM могут быть использованы для уточнения инженерной методики расчета выгорания топлива в ТВС, для оценки различных эффектов реактивности, связанных с изменениями состава АЗ и каналов облучения.

Опыт разработки имитатора IMCOR\_SM в НИИАР позволяет сформулировать общие рекомендации по РСЭ ИР на предприятиях отрасли, где они эксплуатируются:

1. На каждом предприятии целесообразно иметь свой кластер, который должен функционировать в режиме постоянной готовности, а также имитатор АЗ реактора (типа IMCOR) на базе распараллеленной версии прецизионной программы (например MCU-RR/P).
2. При отсутствии у предприятий средств на внедрение новой технологии РСЭ ИР возможен вариант использования (на договорной основе) части ресурсов существующего кластера в одном из научных центров, где установлены соответствующие программные средства и отработана процедура пересылки информации.

### Список литературы

1. Ванеев Ю. Е., Марихин Н. Ю. Новые подходы к задачам расчетного сопровождения эксплуатации исследовательских реакторов с использованием программы MCU // Сб. трудов семинара "Нейтроника-2000". Обнинск: ФЭИ, 2001. С. 203–210.
2. Цыканов В. А. Исследовательские реакторы института и внутриреакторные методы исследования: Препринт НИИАР-1(682). М.: ЦНИИАтоминформ, 1986.
3. Gomin E., Maiorov L. The MCU Monte Carlo code for 3D depletion calculation // Proc. of Int. Conf. on Math. and Comp., Reactor Phys. and Environ. Anal. in Nucl. Applic. Madrid, 1999. Vol. 2. P. 997–1006.

4. Ванев Ю. Е., Булычева Л. В., Дорофеев А. Н. и др. Опыт использования пакета программ MSU для обоснований ядерной и радиационной безопасности работ в топливном цикле исследовательских реакторов НИИАРа // Тез. докл. межд. науч.-тех. конф. "Исследовательские реакторы: наука и высокие технологии". Димитровград, 25–29 июня 2001г. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2001. С. 238–239.
  5. Алексеев А. Н., Гомин Е. А., Гуревич М. И. и др. Верификация программы MSU на серии критических экспериментов с высокообогащенным топливом и водяным замедлителем: Препринт № 6009/5. М.: ИАЭ, 1995.
  6. Гуревич М. И., Маритин Н. Ю. Некоторые проблемы реализации расчета реакторов методом Монте-Карло на многопроцессорной ЭВМ МВС-1000/М // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2002. Вып. 4. С. 15–22.
-