

## ГИБРИДНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ ЯЭУ НА ОСНОВЕ СХЕМЫ УМЕНЬШЕНИЯ ДИСПЕРСИИ CADIS

**И.Р. Суслов, И.А. Лямцев, С.В. Чернов**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. Лейпунского, г. Обнинск*



Представлен гибридный метод расчета защиты на основе совместного использования метода Монте-Карло с непрерывной зависимостью сечений от энергии и метода характеристик. Метод реализует схему автоматического уменьшения дисперсии CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling) на основе решения многогрупповой сопряженной задачи методом характеристик по программе MCG3D и генерации пространственно-энергетических весовых окон на вспомогательной сетке для расчета по Монте-Карло. Представлена общая структура метода, включающая в себя результаты модельных расчетов, подтверждающие высокую эффективность гибридного метода. Обсуждены преимущества использования метода характеристик в схеме CADIS.

**Ключевые слова:** расчет защиты, CADIS, гибридный метод, метод характеристик.

**Key words:** shielding calculation, CADIS, hybrid technique, method of characteristics.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время результаты расчетов защитных экспериментальных бенчмарков SINBAD[1,2], FENDL[3] и других показывают, что наиболее точное моделирование защиты ЯЭУ обеспечивается методом Монте-Карло с непрерывной зависимостью сечений от энергии. При ослаблении потоков нейтронов и гамма-квантов за защитой на много порядков (10–15) даже при большом числе моделируемых частиц лишь очень малое их количество достигает внешних областей защиты, где и необходима оценка физических параметров. Большая сложность геометрий и высокие требования к точности таких расчетов с прямым моделированием приводит к очень большим вычислительным затратам, которые занимают значительное количество времени даже при использовании современных многопроцессорных вычислительных систем.

Проблема еще более усложняется для задач оптимизации сложной трехмерной неоднородной защиты. Усложнение связано с тем, что в этом случае желательно иметь пространственные поля нейтронов и фотонов на достаточно мелкой пространственной сетке. Примером такой сетки является дополнительная (не входящая в задание расчетной геометрии) XYZ- либо RZ $\theta$ -сетка оценки FMESH в MCNP. При этом для локальной оптимизации, например, профилирования тяжелого компонента защиты, значения функционалов желательно знать на мелкой сетке с высокой точностью. Отметим, что из-за разностного харак-

тера процесса оптимизации требуется точность, превышающая предъявляемую к собственно оптимизируемому функционалу.

Наиболее перспективным методом решения защитных задач, сочетающих высокую точность и приемлемые вычислительные затраты, является использование гибридных расчетных схем, основанных на совместном использовании детерминистических и стохастических (метода Монте-Карло) программ. Длительное время эти подходы развивались независимо, однако последние 10–15 лет большое внимание привлекло развитие гибридных методов. Примеры развития гибридных расчетных схем представлены в [4, 5].

В работе в качестве детерминистического метода используется метод характеристик, реализованный в программе MCCG3D (Method of Characteristics in Complicated Geometry, 3D) для многогруппового уравнения переноса нейтронов и гамма-квантов [6–12]. Выбор метода характеристик для детерминистической части гибридной схемы обусловлен следующим.

Метод характеристик обладает нулевой вычислительной дисперсией. Это позволяет гарантированно избегать лучевого эффекта (ray-effect), приводящего к вычислительным осцилляциям полей нейтронов и фотонов. Для сравнения, широко применяемая в детерминистических методах алмазная схема в задачах с сильной гетерогенностью может приводить к осцилляциям из-за лучевого эффекта при любых сколь угодно детальных угловых сетках (хотя в значительном числе задач удается смягчить лучевой эффект до приемлемого уровня). Отсутствие вычислительных осцилляций поля ценностей чрезвычайно важно для эффективности гибридных методов.

Метод характеристик сходится к точному решению (в рамках многогруппового подхода) при сгущении пространственной, угловой и траекторной сеток. Для сравнения отметим, что, как показали исследования на международном вычислительном бенчмарке, разностные схемы, реализованные в программах TORT, могут сходиться к точному значению при сгущении пространственной сетки, не сходиться вообще либо сходиться к неверному значению [13]. Сходимость метода характеристик важна для исследований в области гибридных схем с малой (в пределе – нулевой) дисперсией, что является одной из долговременных целей исследований в области гибридных схем.

Авторы полагают, что создание высокоэффективного гибридного расчетного инструмента на основе сочетания методов Монте-Карло и метода характеристик позволит сделать очередной шаг в решении таких амбициозных долговременных задачах нейтроники, как улучшение методов подготовки групповых констант, анализа экспериментальных бенчмарков и их информативности. Разрабатываемый гибридный метод повысит точность и надежность расчетов защиты и тем самым улучшит технические и экономические характеристики проектируемых ЯЭУ.

### МЕТОД ХАРАКТЕРИСТИК

В программе MCCG3D расчетная область покрывается набором лучей (траекторий), вдоль каждого из которых решается уравнение переноса.

В методе характеристик при предположении о плоском в пределах ячейки  $V_j$  источнике  $S_j$  вдоль любого отрезка – пересечения траектории  $l_\alpha(\Omega_m)$  в направлении  $\Omega_m$  с ячейкой  $V_j$  – угловой поток  $\psi_m(r)$  аналитически выражается через угловой поток во «входящей» точке отрезка и источник  $S_j$ .

Угловой поток в точке  $r_{i,m,\alpha}^+$  равен

$$\Psi_{i,m,\alpha}^+ = \Psi_m(r_{i,m,\alpha}^- + h_{i,m,\alpha} \Omega_m) = \Psi_m(r_{i,m,\alpha}^-) e^{-\sigma_t h_{i,m,\alpha}} + \int_0^{h_{i,m,\alpha}} S_i e^{-\sigma_t \tau} d\tau,$$

средний по отрезку угловой поток

$$\Psi_{i,m,\alpha} = [S_i h_{i,m,\alpha} + \Psi_m(r_{i,m,\alpha}^-) - \Psi_{i,m,\alpha}^+] / [\sigma_t h_{i,m,\alpha}],$$

где  $h_{i,m,\alpha}$  - длина отрезка.

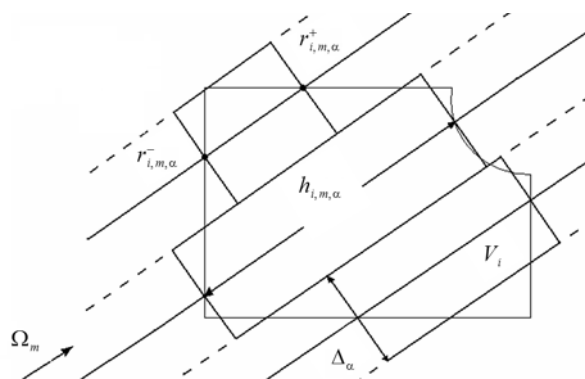


Рис. 1. Расчетная ячейка в программе MCG3D

Метод характеристик естественным способом ведет к итеративному решению, включающему в себя «проходы» (sweep) через расчетную область. На каждом проходе вдоль траектории с помощью одномерной конечно-разностной схемы вычисляется нейтронный поток вдоль траектории на основе ранее рассчитанного источника. Так как каждая входящая точка каждого из отрезков является выходной точкой предыдущего отрезка на той же самой линии  $l_\alpha(\Omega_m)$ , усреднение в направлении  $\Omega_m^\perp$ , перпендикулярном  $\Omega_m$ , не используется, и численная дисперсия равна нулю. Проинтегрированный по расчетной ячейке поток получается сложением величин по всем отрезкам, пересекающим ячейку (рис. 1):

$$I_{i,m} = \sum_{\alpha} \Psi_{i,m,\alpha} h_{i,m,\alpha} \Delta_{\alpha},$$

и средний по ячейке угловой поток получается делением интегрального потока на вычислительный объем  $V_{i,m}$  ячейки  $V_i$  в направлении  $\Omega_m$ :

$$V_{i,m} = \sum_{\alpha} h_{i,m,\alpha} \Delta_{\alpha}, \quad \Psi_{i,m} = I_{i,m} / V_{i,m},$$

где  $\Delta_{\alpha}$  – вес, соответствующий лучу  $l_\alpha(\Omega_m)$  при интегрировании в направлении  $\Omega_m^\perp$ . В простейшем случае равномерной сетки лучей величина  $\Delta_{\alpha}$  есть просто шаг между лучами для двумерной геометрии и произведение шагов в двух ортогональных направлениях для трехмерных задач. При сгущении сетки траекторий вычислительный объем  $V_{i,m}$  стремится к точному объему  $V_i$ . Тогда усредненный по ячейке полный (усредненный по углу) поток в ячейке  $V_i$  получается как обычно:

$$\Phi_i = \sum_m \Psi_{i,m} W_m.$$

Отметим, что при сгущении пространственной сетки метод длинных характеристик обеспечивает квадратичную сходимость по пространственной переменной для решений, сошедшихся относительно сгущения по траекториям.

## МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ДИСПЕРСИИ В MCNP

### Критерий статистической эффективности

Во всех методах уменьшения дисперсии (variance reduction) критерием эффективности является величина  $FOM$  (Figure-of-Merit), определяемая как

$$FOM = (RE^2 \times T)^{-1},$$

где  $RE$  – относительная погрешность в оцениваемом функционале;  $T$  – время, необходимое для вычисления заданного количества  $n$  историй [14, 15]. Так как  $RE^2$  должно быть обратно пропорционально  $T$ , значение  $FOM$  должно быть приблизительно постоянным при заданных параметрах задачи. Значение  $FOM$  представляется удобной мерой оценки эффективности методов уменьшения дисперсии, так как она включает в себя достигаемую точность (погрешность) и затраты компьютерного времени на получение этой точности. Методы уменьшения дисперсии обычно приводят к увеличению компьютерного времени на одну историю (т.е.  $T$  увеличивается), однако при их применении целью является уменьшение  $RE^2$  большее, чем увеличение  $T$ , так что знаменатель в целом уменьшается и  $FOM$  увеличивается.

### Стандартные весовые окна в MCNP

Стандартные весовые окна либо вводятся непосредственно пользователем, либо задаются им с помощью генератора весовых окон в коде MCNP [16]. Суть метода весовых окон заключается в комбинации методов расщепления и рулетки для каждой точки фазового пространства рассчитываемой системы.

В каждой ячейке расчетной модели задается нижняя граница весового окна, обратно пропорциональная ценности частицы. Верхняя граница кратна нижней, и эти границы нормированы так, чтобы частицы источника испускались в интервале весового окна. При моделировании блуждания частицы, если вес частицы выше верхней границы весового окна, то она дробится на равные доли от первоначального веса (расщепление). Вес каждой новой частицы лежит внутри границ весового окна. Если вес частицы ниже весового окна, то срабатывает принцип рулетки. Частица либо уничтожается, либо ее вес увеличивается до значения, лежащего в диапазоне весового окна. Русская рулетка статистически случайно уменьшает количество незначимых частиц. Ни расщепление, ни рулетка не смещают оценки, так как суммарный вес сохраняется.

Стандартный генератор весовых окон в MCNP производит статистическую оценку (методом Монте-Карло) границ окон по вкладам частиц из данной ячейки фазового пространства в функционал, однако при этом требуется итерационное использование генератора. В течение первых циклов набирается совокупность весовых окон для последующих расчетов. В типичном случае пользователь многократно запускает на расчет созданные весовые окна и полученные на выходе новые весовые окна использует для последующих расчетов.

Тем не менее, в силу статистической природы полученных таким способом окон, за разумное счетное время не удается избежать статистического разброса значений границ окон, и пользователь всегда должен быть готов выровнять весовые окна вручную. Нет никакой гарантии, что данное множество весовых окон будет правильным, не говоря уж о том, что оно будет оптимальным.

### Методы автоматического уменьшения дисперсии на основе детерминистических расчетов

В литературе представлено достаточно много подходов к автоматическому уменьшению дисперсии на основе сочетания различных детерминистических и статистических программ [17].

AVATAR [18] – это расширенная версия MCNP, реализованная с помощью графического интерфейса Justine. В сформулированной задаче AVATAR автоматически генерирует сетку для сопряженных вычислений, производит с помощью кода THREEDANT [19] вычисления на этой сетке, строит трехмерные зависящие от энергии весовые окна из сопряженного решения, которые в свою очередь используются в MCNP. Пользователь может вмешаться и исправить сетку для весовых окон после того, как она была создана Justine.

Сетка для сопряженных вычислений с кодом THREEDANT представляет собой прямоугольник либо в системе координат XYZ, либо в цилиндрической системе координат RZ $\theta$ , покрывающий всю расчетную систему, и состоит из интервалов сетки (coarse mesh), разбиваемых на ячейки (fine mesh). Материал, приписываемый ячейке сетки, – это материал в центре ячейки (более сложное приближение планируется в будущем). MCNP получает данные весовых окон из этой прямоугольной сетки.

Код Justine может автоматически создавать сетку для сопряженных вычислений кода THREEDANT. Сначала создается прямоугольная область, содержащая в себе всю систему. В каждом направлении эту область разделяют на интервалы, которые образуют крупные элементы сетки. Равномерная крупная сетка создается путем равномерного деления по всем направлениям ограниченного блока. Неравномерная или «разумная» (smart) сетка создается путем разбиения исходной области на меньшие прямоугольные подобласти так, что каждая из них касается по всем направлениям ячейки MCNP. Хотя разумная сетка не связана непосредственно с ячейкой MCNP, эта конструкция подходит для адекватного детального описания геометрии. Кодом Justine создается «разумная» сетка, хотя пользователь может вмешаться и выбрать равномерную крупную сетку.

Вычисленные крупные элементы (coarse mesh) могут быть равномерно либо логарифмически поделены на более точные. По умолчанию AVATAR делит сетку равномерно, но пользователь может вмешаться и выбрать логарифмическое разбиение. Обычно используются равномерные, а не логарифмически поделенные сетки, тогда программа работает несколько быстрее при выборке информации о весовых окнах в MCNP.

## **ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ГИБРИДНОГО РАСЧЕТА ЗАЩИТЫ**

Гибридный метод расчета реализован в виде расчетной цепочки (MCCG3D + MXWWG + MCNP).

Основная мотивация применения гибридного метода для расчета защиты:

- возможность прямого учета всех элементов конструкции ЯЭУ, многие из которых вносят заметный вклад в ослабление излучения;
- непосредственный расчет важнейших функционалов без дополнительных экстраполяций;

– использование корректного описания сечений взаимодействий, прежде всего анизотропии рассеяния гамма-квантов и нейтронов высоких энергий.

Наиболее приближенная к реальной геометрии модель рассчитываемой ЯЭУ позволяет уменьшить запасы на неопределенность и получить минимальные массогабаритные характеристики.

Этапы проведения расчета по гибриднему методу.

1. Расчет сопряженной задачи по MCCG3D (построение геометрической модели и расчетной сетки MCCG3D, решение сопряженного уравнения поля ценности для выбранного функционала).

2. Подготовка файла весовых окон с помощью программы MX\_WWG:

- построение сетки WWG (Weight Windows Grid) для весовых окон;
- проектирование сетки MCCG3D на сетку WWG;
- проверка выполнения условия  $w_i/w_{i+1} < 2$  (если указанное условие не выполняется, то построение сетки WWG выполняется заново, т.е. она разбивается на более мелкие ячейки до тех пор, пока условие не будет выполнено);
- проверка отсутствия осцилляций в решении сопряженной задачи по MCCG3D (если осцилляции присутствуют, то выполняются дополнительные итерации по MCCG3D с более детальной угловой сеткой).

3. Расчет по программе MCNP.

4. Подготовка файла дозовых функционалов с помощью программы Meshtal2MX.

5. Визуализация дозовых функционалов с помощью программы-визуализатора MCCG\_G.

С помощью графического визуализатора MCCG\_G выполняется построение трехмерной геометрической модели, для которой по программе MCCG3D решается сопряженная задача в групповом приближении.

Подготовка файла весовых окон выполняется с помощью программы MX\_WWG. Данный код вычисляет величины обратно пропорциональные ценностям частиц и получает нижние границы весовых окон каждого элемента и каждой группы. Весовые окна затем нормируются на источник таким образом, что он генерирует частицы с весом внутри весового окна. Так же, как сеточный генератор весовых окон WWG в MCNP, MX\_WWG выводит значения весовых окон в форматный файл WWINP, стандартный для MCNP, который может использоваться стандартной немодифицированной версией MCNP.

После того, как файл весовых окон WWINP сгенерирован, производится прямой расчет дозовых функционалов. По окончании вычислений получается файл, содержащий значения доз на вспомогательной сетке во всей расчетной области. После проведения расчетов по MCNP, полученные данные преобразуются программой Meshtal2MX в формат MCCG3D. Затем визуализатор MCCG\_G графически изображает трехмерные дозовые поля для всей расчетной области или ее выделенных частей.

С использованием гибридного метода появилась возможность вычисления дозовых функционалов за биологической защитой с ослаблением 10–12 порядков с погрешностью 5–10%. Гибридный метод является максимально точным по описанию реальной геометрии, сечений взаимодействия нейтронов и гамма-квантов с веществом. Внутренний контроль по статистике расчетов позволяет утверждать о правильности полученных результатов. Выполненные расчеты экспериментальных бенчмарков не выявили существенных погрешностей метода.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ

С использованием гибридного метода проведены расчеты тестовых задач в упрощенной геометрии, показательных с точки зрения физики радиационной защиты.

Рассмотрена модельная задача из набора бенчмарков Кобаяши[20]. Геометрия задачи состоит из трех зон: источника, пустого канала сложной формы и защиты, геометрия которых представлена на рис. 2. На плоскостях  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 0$  заданы граничные условия отражения, а на внешних границах – вакуумные граничные условия.

Были реализованы три варианта задачи. Во-первых, математический бенчмарк OECD с однокрупными сечениями, для которого в табл. 1 приведены сечения нейтронов и мощность источника в зонах тестовой задачи. Кроме того, решались две многокрупные задачи, где материалом защиты в одном случае был бетон, а в другом – полиэтилен.

Таблица 1

**Макросечения нейтронов тестовой задачи**

Область	Мощность источника	Полное сечение	Сечение рассеяния
1 (источник)	1	0.1	0.05
2 (канал)	0	$10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
3 (защита)	0	0.1	0.05

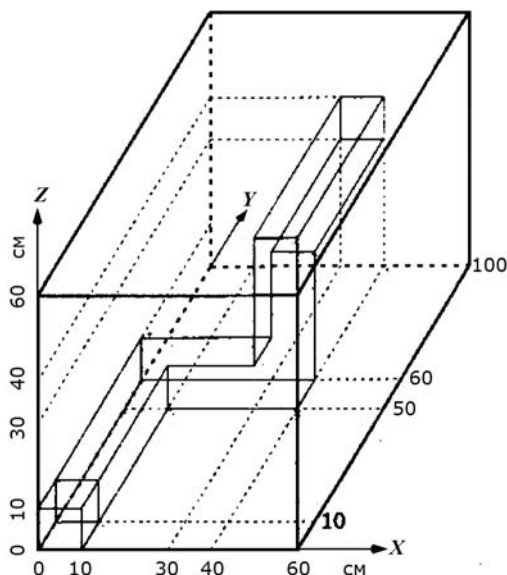


Рис. 2. Геометрия тестовой задачи

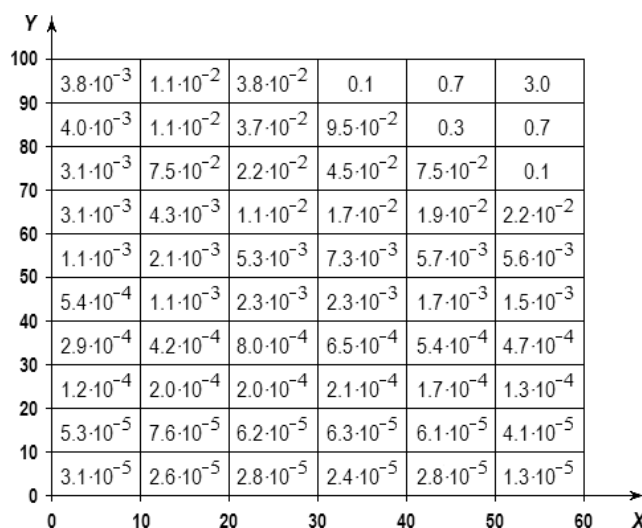


Рис. 3. Сопряженное решение для одногрупповой задачи (плоскость  $Z = 35.0$ )

В расчетах MCG3D и при задании весовых окон в MCNP использовалась сетка  $6 \times 10 \times 6$  (с шагом 10 см по каждой из координат). Источник размещен в ячейке с центром (5, 5, 5). Детектор помещался в «труднодоступную» для прямого моделирования ячейку с координатами (55, 95, 35).

Представленный на рис. 3 срез решения сопряженной задачи через плоскость  $z = 35.0$  иллюстрирует способность метода характеристик, реализованного в про-

грамме MCG3D, получать гладкое решение даже на относительно грубой сетке.

Были проведены вычисления по гибриднему методу, а также прямые расчеты по MCNP. Результаты расчетов и сопоставление скоростей сходимости представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты тестовых расчетов**

ПАРАМЕТР	OECD		Бетон		Полиэтилен	
	Прямой расчет MCNP	Расчет по гибриднему методу	Прямой расчет MCNP	Расчет по гибриднему методу	Прямой расчет MCNP	Расчет по гибриднему методу
Расчетное значение	4.43E-5	4.44E-5	8.78E-4	8.79E-4	3.18E-07	3.19E-07
Оценка относительной погрешности, %	0.9	0.6	0.5	0.7	0.9	0.8
Число историй	5E+10	1E+8	1E+9	4E+5	6.4E+10	4E+8
FOM	3.1E+0	6.1E+2	5.2E+0	4.0E+2	1.2E-02	3.2E+1
FOM/FOM <sub>0</sub>	1	2.0E+2	1	7.7E+1	1	2.7E+3

Гибридный метод показал высокую эффективность в ускорении сходимости на тестовых задачах. Вместе с тем его эффективность зависит от выбранных параметров решения по методу характеристик и выбора сетки весовых окон непосредственно в программе MCNP. Выбор оптимальных параметров может быть очень существенным. Поэтому наряду с использованием разработанного гибридного метода в практических задачах необходимо проведение дополнительных расчетных исследований по развитию гибридной методики. Предполагаются следующие шаги в этом направлении:

- включение в код MX\_WWG алгоритмов оптимизации сетки весовых окон;
- реализация в коде MX\_WWG процедуры формирования смещенного источника (в соответствии с методологией CADIS).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработан гибридный метод для вычислений переноса частиц методом Монте-Карло с помощью кода MCNP и весовых окон, полученных методом характеристик по программе MCG3D. Разработана программа MX\_WWG для связи кодов MX и MCNP. Проведены тестовые испытания, показавшие высокую эффективность расчетной схемы, скорость вычислений возросла в сто – тысячу раз.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. ORNL Shielding Integral Benchmark Archive and Database (SINBAD).
2. I.A. Kodeli, E. Sartori, A. Milocco, P. Ortego. 20 years of SINBAD, ICRS-12 and RPSD-2012 SCHEDULE.
3. Forschungszentrum Karlsruhe, U. Fischer (Ed.). Wissenschaftliche Berichte FZKA 5785 INDC(GER)-41, Integral Data Tests of the FENDL-1 Nuclear Data Library for Fusion Application, August 1996.
4. Becker T.L., Larsen E.W. A General Transform for Variance Reduction in Monte Carlo Simulation, M&C 2011, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, May 8–12, 2011, on CD-ROM.
5. Zhang Q., Abdel-Khalik H.S. A Joint Based Global Variance Reduction Approach for Reactor Analysis Problems, M&C 2011, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, May 8–12, 2011, on CD-ROM.



6. *Suslov I.R.* MCG3D - 3D Discrete Ordinates Transport Code for Unstructured Grid/ State of Art and Future Development / Сб. трудов семинара «Нейтроника-96». С. 162. – Обнинск: ФЭИ, 1996.
7. *Suslov I.R.* A Consistent and Efficient Fix-Up for DD Scheme in X-Y Geometry based on Quasi-Stationary Derivatives Principle, M&C'99 – Madrid, Mathematics and Computations, Reactor Physics and Environmental Analysis in Nuclear Applications p.84 (CD), Madrid, 27–30 September, 1999.
8. *Suslov I.R.* An Improved Transport Theory Schemes Based on the Quasi-Stationary Derivatives Principle, Proceedings of International Conference on Mathematical Methods and Supercomputing in Nuclear Applications, Saratoga Springs, USA, October 5–9, 1997.
9. *Suslov I.R.* An Algebraic Collapsing Acceleration in Long Characteristics Transport Theory. Proc. of the 11-th Symposium of AER. p.179-188. Csopak, Hungary, 24–28 September 2001.
10. *Суслов И.Р.* Метод характеристик в сложной геометрии для расчета защиты // ВАЯТ, серия ФЯР, 1, 88, 1991.
11. *Suslov I.R.* Solution of Transport Equation in 2- and 3-Dimensional Irregular Geometry by the Method of Characteristics, Proceedings of International Conference on Mathematical Methods and Supercomputing in Nuclear Applications, p. 752, Karlsruhe, Germany, April 19–23, 1993.
12. *Suslov I.R., Pevey R.E., Bently C., Goluoglu S., DeMeglio R., Norton K., Dodds H.L.* Efficiency of Method of Characteristics for Criticality Safety Calculations. Trans. Am. Nuc. Soc., 75, p.427, Orlando, USA, 1–5 July 1997.
13. Progress in Nuclear Energy, v.39, p.223, 2001.
14. *Goertzel G., Kalos M.H.* Monte-Carlo Methods in Transport Problems/ Progr. Nucl. Energy ser. I, Vol. 11, Physics and Mathematics, Pergamon Press, New York (1958).
15. *Pederson S., Forster R.A., Booth T.E.* Confidence Interval Procedure for Monte-Carlo Transport Simulations/ Nucl. Sci. Eng., 127, 54–77 (1997).
16. *Briesmeister J.F.* MCNP – A General Purpose Monte-Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C/ LA-13709-M, December 2000.
17. *Smith H.P., Wagner J.C.* A case study in manual and automated Monte Carlo variance reduction with a deep penetration reactor shielding problem/ Nuclear Mathematical and Computational Sciences: A Century in Review, A Century Anew, Catlinburg, Tennessee, April 6–11, 2003.
18. *Van Riper K.A., Urbatsch T.J., Soran P.D., Parsons D.K., Morel J.E., McKinnely G.W., Lee S.R. etc.* AVATAR - Automatic Variance Reduction in Monte Carlo Calculation/ Joint International Conference on Mathematical Methods and Supercomputing for Nuclear Applications, Saratoga Springs, New York, October 5–9, 1997.
19. DOORS 3.2: One, Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Code System, Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-650.
20. *Kobayashi K., Suugimura N., Nagaya Y.* 3-D Radiation Transport Benchmark Problems and Results for Simple Geometries with Void Regions/ Nuclear Energy Agency, November 2000.

Поступила 18.12.2012

*Belozеров V.I., Shilina A.S., Ananieva O.A., Kunizina T.E., Gordienko A.B.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 illustrations. References, 10 titles.*

The paper presents the results of research on hydrogen generation in heterogeneous compositions containing aluminum, liquid sodium glass, crystalline sodium metasilicate and water of varying salinity. Found that silicon reagents remove the passivation oxide coating on the surface of aluminum and its translation into an activated state, effectively decompose water into hydrogen. Chemical decomposition into hydrogen efficiently are aqueous solutions with varying degrees of mineralization. The process of generating hydrogen is carried out at low temperatures and atmospheric pressure at high speed and theoretically limiting the release of hydrogen  $H_2$  0.12 kg / 1 kg of Al. The study of chemical processes of decomposition and removal of surface oxide films and the generation of hydrogen from restoration water by reactor metallic materials is one of the tasks of hydrogen safety for nuclear power plants.

#### **УДК 621.039.586.001.57**

*Application of computer codes RELAP\SCDAP and MELCOR for the analysis of management of WWER-1000 accidents \ Samokhin D.S., Chuklin A.A.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 10 pages, 4 tables, 5 illustrations. References, 7 titles.*

The article describes the problem of shortage of significant information about the processes occurring in a nuclear reactor during heavy failure, about parameters of these processes, and as consequence, absence of optimum actions for management of heavy failures. The article gives a description of power plants, performed with the code MELCOR. There is compares the results of calculations of WWER-1000 severe accidents generated by means computer codes MELCOR and RELAP/SCDAP.

#### **УДК 621.039.586: 536.42**

*About the Nature of the course of BN Reactor beyond Design Accidents under post-accident Core Materials Relocation \ Vlasichev G.N.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 7 pages, 3 illustrations. References, 22 titles.*

In the safety analysis of BN reactor accepted division of beyond design accident into four stages: initial, transitional, post-accident material relocation and post-accident heat removal. Formed in transitional stage as a result of the molten cladding relocation and solidification initial steel blockages of channels for a while impede the flow down of liquid fuel and form a solid foundation for the pool. To move the fuel in channels it is required at first a melting of blockages. After reactor shutdown it is possible in the case of insufficient heat to the surrounding fuel assemblies. Under melt-through of blockage the melt will be flow into the channels between the yet solid parts of the fuel rods at some length, it hardens there and again forms a layer of blockages. As a result, the process of heat-generating mass moving will be not smooth, and the intermittent nature and will consist of repeating phases: melt-through of blockages layer, leaking of melt at some length and solidification, the melting of the next layer, etc.

#### **УДК 620.172.251.222**

*Mechanical properties of E110 alloy at temperature range up to 1273K \ Izmalkov I.N., Loshmanov L.P., Kostyukhina A.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 7 pages, 4 illustrations. References, 22 titles.*

E110 alloy is one of the main structural materials of VVER type reactor core. The effect of temperature up to 1273 K and strain rate on the mechanical properties of the E110 alloy have been studied. The ring samples manufactured from VVER fuel rod cladding was tested. Tests have been conducted in the air and in a vacuum. As a result the strength and ductility properties of E110 alloy have been developed.

#### **УДК 621.039.54**

*Hybrid technique for shielding calculations on basis of CADIS \ Suslov I. R., Lyamcev I.A., Chernov S.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 3 tables, 3 illustrations. References, 20 titles.*

Presented a hybrid technique for shielding calculation that uses continuous energy Monte Carlo

with the weight windows generated with the method of characteristics. Technique proposed implements CADIS (Consistent Adjoint Driven Importance Sampling) scheme and includes solving the adjoint multigroup problem with characteristics code MCG3D to generate the space-energy weight windows for the Monte-Carlo calculation. A general structure of the technique for use in design calculation is described. Presented numerical results confirm the high efficiency and accuracy of the proposed hybrid technique. The advantages of using the method of characteristics in the CADIS scheme are discussed.

#### **УДК 519.6:621.039.5**

*Space-time calculation of transient processes in fast reactors \ Ginkin V.P., Troyanova N.M.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 8 pages, 7 illustrations. References, 4 titles.*

Algorithms of 3-D neutron physics simulating for fast transient abnormal conditions in BN-type reactors core were developed in the GVA code. A quasi-static approximation is used for the solution of non-stationary equation of reactor physics. This approach divides the original equation onto the system of two equations: for calculating of the amplitude factor, which is quickly changed during the time and does not depend on spatial coordinates, and form-function, which depends on spatial coordinates and is slightly changed during the time. The results of test simulating in flow rate stop conditions and in self-movement of control rods conditions are demonstrated.

#### **УДК 537.58:539.321.9**

*The physical phenomenon of emission of electrons in metals under the action of ultrasound \ Trofimov A.I.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 tables, 5 illustrations. References, 9 titles.*

A theoretical and experimental study of a new physical phenomenon – the emission of electrons in metals under the influence of ultrasound. Shows the analogy mechanisms to increase the internal energy in metals by heating and effect of ultrasound. The substantiation of a possible rise in the emissivity of the emitter thermionic converters.

#### **УДК 621.039.052**

*Numerical and experimental investigations of thermohydraulic characteristics for fast reactor vessels on integral model SARH in different operation regimes \ Zaryugin D.G., Kalyakin S.G., Leskin S.T., Opanasenko A.N., Sorokin A.P.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 8 illustrations. References, 4 titles.*

Features of the stratified flows on examples of reactors on fast neutrons, possibility of their scale modelling are considered. Some results of experimental and numerical researches in mixing chambers and pipelines are presented. It is underlined necessity of the account of the stratification phenomena at a substantiation of reliability, safety, periods of operation for various nuclear power plants.

#### **УДК 621.039.517**

*Simulation of loop test conditions for the modified SM reactor fuel rods and test results in justification of their performance \ Starkov V.A., Fedoseev V.E., Shishin V.Yu.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 1 table, 9 illustrations. References, 9 titles.*

Irradiation conditions were simulated to test pilot modified fuel rods of the SM reactor under middle (10MW/m<sup>2</sup>) and maximal (up to 15MW/m<sup>2</sup>) thermal load. Some post-irradiation results are presented. A conclusion was made about the performance of the pilot SM fuel rods with the U content increased by 20%. A comparative analysis of both test conditions and material tests of the SM fuel rods was performed. The material tests results were used as a basis to propose and justify a phenomenological model of fuel rods swelling.

#### **УДК 621.039.519**

*Tests of experimental low neutron poisoning fuel assemblies in reactor SM \ Klinov A.V., Kalinina N.K., Marikhin N.Yu., Pimenov V.V., Petelin A.L., Starkov V.A., Fedoseev V.E.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) Obnibsk, 2013. 9 pages, 6 tables, 6 illustrations. References, 12 titles.*

The paper presents the heat rate distribution, thermal flux density and burnup for three experimental