УДК 621.039.51

ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНГУЛЯРНЫХ ФУНКЦИЙ

А.А. Безбородов*, Е.В. Долгов*, Д.А. Клинов, В.В. Колесов**, В.Ю. Стогов*, И.Р. Суслов*, В.И. Фоломеев***

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

***Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*

Исследовалась возможность применения быстродействующей методики использования сингулярных функций в практических задачах описания сечений взаимодействия нейтронов с ядрами нуклидов среды в резонансной области энергий для физического моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах, в которых важна неразрешенная область.

Ключевые слова: сингулярная функция, обобщенная функция, уравнение переноса, коэффициент размножения, реакторная установка на быстрых нейтронах.
Key words: singular function, generalized function, transport equation, multiplication factor, fast reactor plant.

Спектр нейтронов в быстрых реакторных установках может быть крайне нерегулярным, испытывать значительные резонансные флуктуации из-за характерного хода сечений нуклидов, что осложняет решение уравнения переноса нейтронов с нахождением подробного пространственно-энергетического распределения нейтронных полей и получением на их основе необходимых реакторных функционалов. В то же время для вычисления многих реакторных функционалов достаточно знать интегральные потоки нейтронов в физически однородных зонах, на которые разбивается реактор, и в энергетических группах [1]. В ряде областей физики и современной техники для нахождения необходимых функционалов используются численные методы с применением сингулярных функций для перехода к другим более плавным переменным при решении уравнений переноса частиц.

Пусть $BV[a, b]$ – банахово пространство определенных на интервале $[a, b] \in R_1$ (множества вещественных чисел) вещественных функций с ограниченной вариацией $f(x)$. По лемме Лузина [2] произвольная непрерывная функция действительного переменного аппроксимируется с любой степенью точности сингулярной функцией. Посредством функциональных преобразований Сакса [3] это распространяется на все множество R_1, а согласно теореме Каца [4], верно и для функций в пространстве $BV[a, b]$. Сингулярная мера s может быть продолжена до некоторой меры Лебега-Стилтьеса [5]. В связи с этим отметим, что сингулярная мера канторова множества (порожденная канторовой лестницей, производящая функция которой меняется от нуля до единицы) в качестве меры Лебега-Стилтьеса равна единице [6] и сосредоточена в точках роста ее производящей функции. Рассмотрим энергетическую группу g, в которой полное сечение σ изменяется от σ_{min} до σ_{max}. При пересечении любой горизонтальной прямой (со значением σ), параллельной оси абсцисс, на графике зависимости сечения σ (по оси ординат) от энергии E (по оси абсцисс), всякий раз получается конечное множество $g(\sigma)$ непересекающихся энергетических интервалов j = 1, 2,..., $J(\sigma)$, $E_j^-(\sigma) \le E \le E_j^+(\sigma)$, в пределах которых сечение $\le \sigma$. E_j^- – левая, а E_j^+ – правая границы интервала j. Пусть $\phi(E)$ – стандартный спектр [7] в группе g; $\phi_n(E)$ – он же, но нормированный на единицу:

$$\phi^g = \int_g \phi(E)dE, \quad \phi_n(E) = \frac{\phi(E)}{\phi^g}. \tag{1}$$

Определим меру Лебега-Стилтьеса для множества $g(\sigma)$ следующим образом [8]:

$$s = \int_{g(\sigma)} \phi_n(E)dE = \sum_j \int_{E_j^-(\sigma)}^{E_j^+(\sigma)} \phi_n(E)dE. \tag{2}$$

В результатте получим новое множество $g(s)$, состоящее из интервалов i = 1, 2, ... , $I(s)$, $E_i^-(s) \le E \le E_i^+(s)$, а на графике по оси ординат вместо σ будет s, меняющаяся от 0 до 1. Множество $g(s)$ плотно заполняет всю группу g при s = 1. Это некий аналог лестницы Кантора. Пусть $\partial g(s)$ – граница множества $g(s)$, в которую входят точки i = 1, 2, ... , I(s), E_i^-, E_i^+. В этих точках, количество которых зависит от s, значения полного макросечения $\sigma(E_i^-)$, $\sigma(E_i^+)$ одинаковы и равны $\sigma(s)$. Из (2) следует

$$s = \int_{g(s)} \phi_n(E)dE = \sum_i \int_{E_i^-(s)}^{E_i^+(s)} \phi_n(E)dE. \tag{3}$$

Дифференцируя тождество (3) по s, имеем

$$1 = \sum_i \left[\phi_n(E_i^+)\frac{\partial E_i^+}{\partial s} - \phi_n(E_i^-)\frac{\partial E_i^-}{\partial s} \right] = \sum_i \left(\phi_n(E_i^\Theta)\frac{\partial E_i^\Theta}{\partial s} \right) \Bigg|_{\Theta=-}^{\Theta=+}. \tag{4}$$

Плотность потока нейтронов на множестве $g(s)$

$$\varphi(s) = \int_{g(s)} \varphi(E)dE = \sum_i \int_{E_i^-(s)}^{E_i^+(s)} \varphi(E)dE. \tag{5}$$

В группе g она меняется от нуля при s = 0 до групповой плотности при s = 1. При дифференцировании формулы (5) по s и использовании формулы (4) получается

$$\frac{\partial\varphi(s)}{\partial s} = \sum_i \left[(E_i^+)\frac{\partial E_i^+}{\partial s} - \varphi(E_i^-)\frac{\partial E_i^-}{\partial s} \right] \cdot \frac{\phi_{n,i}}{\phi_{n,i}} = \left\langle \frac{\varphi(E)}{\phi_n(E)} \right\rangle \sum_i \left(\phi_n(E_i^\Theta)\frac{\partial E_i^\Theta}{\partial s} \right) \Bigg|_{\Theta=-}^{\Theta=+} = \left\langle \frac{\varphi(E)}{\phi_n(E)} \right\rangle. \tag{6}$$

Линейные функционалы типа чисел процессов на множестве $g(s)$ имеют вид

$$c(\varphi, s) = \int_{g(s)} c(E)\varphi(E)dE = \sum_i \int_{E_i^-(s)}^{E_i^+(s)} c(E)\varphi(E)dE, \tag{7}$$

где $c(E)$ может быть сечением радиационного захвата, деления и т.п.

Производная выражения (7) по s с использованием формулы (6) на точечном множестве $\partial g(s)$ может быть записана в виде тождества (опуская часть индексов):

$$\frac{\partial c}{\partial s}=\sum_i\left[c_i\varphi_i\frac{\partial E_i}{\partial s}\cdot\frac{\phi_{n,i}}{\phi_{n,i}}\right]\Bigg|_-^+=c(s)\frac{\partial\varphi(s)}{\partial s},\tag{8}$$

$$c(s)=\sum_i\left[c_i\phi_{n,i}\frac{\partial E_i}{\partial s}\right]\Bigg|_-^+=\frac{\partial}{\partial s}\int_{g(s)}c(s)\phi_n(E)dE.\tag{9}$$

Интегрируя $\dfrac{\partial c}{\partial s}$ по s и используя формулы (7) и (8), получим равенство

$$c(\varphi,s)=\int_{g(s)}c(E)\varphi(E)dE=\int_0^s c(s)\frac{\partial\varphi(s)}{\partial s}ds.\tag{10}$$

Аналогичное выражение получается и для дифференциального оператора $L=\Omega\nabla$ уравнения переноса нейтронов:

$$\int_{g(s)}L\varphi(E)dE=\int_0^s L^g\frac{\partial\varphi(s)}{\partial s}ds.\tag{11}$$

На рассматриваемых функциях ограниченной вариации на всем множестве $\partial g(s)$ существование этих линейных функционалов соответствует теореме Э. Хелли [9]. Путем интегрирования спектрального уравнения переноса нейтронов по множеству $\partial g(s)$, принадлежащему группе g, с использованием выражений (10) и (11) получается многогрупповое уравнение относительно $\varphi(s)$

$$L^g\frac{\partial\varphi^g}{\partial s}+\sigma^g(s)\frac{\partial\varphi^g}{\partial s}=S^g\varphi+F^g\varphi+\frac{\partial Q^g}{\partial s},\tag{12}$$

где

$$S^g\varphi=\sum_{g'=1}^{G}\int_\Omega d\Omega\int_0^1\frac{\partial w^{g'g}(T,S,\Omega)}{\partial s}\sigma_s^{g'}(T)\frac{\partial\varphi^{g'}(T,\Omega)}{\partial T}dT,\tag{13}$$

$$F^g\varphi=\frac{1}{4\pi}\sum_{g'=1}^{G}\nu^{g'}\int_0^1\frac{\partial\chi^{g'g}(T,S)}{\partial s}\sigma_f^{g'}(T)\frac{\partial\varphi^{g'}(T)}{\partial T}dT,\tag{14}$$

$$Q^g(s)=\int_{g(s)}Q(E)dE,\tag{15}$$

$$\sigma_{s,f}^{g'}=\frac{\partial}{\partial T}\int_{g'(T)}\sigma_{s,f}(E)\phi_n(E)dE,\tag{16}$$

$$w^{g'g}(T,S,\Omega)=\frac{1}{\sigma_s^{g'}(T)}\frac{\partial V^{g'g}(T,S)}{\partial T},\tag{17}$$

$$V^{g'g}(S,T,\Omega)=\int_{g(s)}dE\int_{g'(T)}w(E',E)\sigma_s(E')\phi_n(E')dE',\tag{18}$$

$$\chi^{g'g}(T,S)=\frac{1}{\sigma_f^{g'}(T)}\frac{\partial X^{g'g}(T,S)}{\partial T},\tag{19}$$

$$X^{g'g}(T,S)=\int_{g(s)}dE\int_{g'(T)}\chi(E',E)\sigma_f(E')\phi_n(E')dE'.\tag{20}$$

S и T относятся к энергиям E и E' в группах g и g' соответственно. Коэффициенты в выражениях (12)–(20) – более гладкие функции по сравнению с теми, которые входят в уравнение переноса нейтронов в случае их зависимости от E, что положительно сказывается при решении уравнения (12), а также уменьшается количество информации о нейтронных сечениях особенно в неразрешенной области резонансов. Возможным способом дискретизации уравнений типа (12) может служить использование разложений в ряды Фурье на ортогональных на сегменте [0,1] полиномах, а также другие подобные методы в задачах теории переноса частиц [8]. Так при решении ряда задач атмосферной радиации экономия расчетных ресурсов составила 10000 раз [10].

Сопоставим сингулярную обобщенную функцию f нулевого порядка мере Лебега-Стилтьеса μ в R_n, имеющей конечную вариацию в каждом шаре R_n:

$$(f,\varphi)=\int\varphi(x)d\mu(x)=\int f(x)\varphi(x)dx, \tag{21}$$

где функция f является производящей функцией сингулярной меры μ, а φ – некая «хорошая функция» (по Л. Шварцу [11]). Учет соответствия вышеприведенных линейных функционалов (7)–(11) и (21) и того, что, например, δ-функция является также обобщенной функцией нулевого порядка, позволяет проводить дискретизацию для практических целей и на этапе вывода уравнений переноса частиц.

Рассмотрим тройку $G[\Sigma_{\min}, \Sigma_{\max}]$, $\Im$, P – пространство с мерой P: $\Im\to G$. G – множество всех возможных значений полного сечения Σ в энергетической группе g; $\Im$ – σ-алгебра его подмножеств; P – вероятностная мера на $\Im$:

$$P(E,\Sigma)=\frac{1}{\Delta E}\lim_{\Delta\Sigma\to 0}\frac{1}{\Delta\Sigma}\int\limits_{\Sigma-\frac{\Delta\Sigma}{2}}^{\Sigma+\frac{\Delta\Sigma}{2}}d\Sigma'\int\limits_{E-\frac{\Delta E}{2}}^{E+\frac{\Delta E}{2}}dE'\delta(\Sigma(E')-\Sigma') \tag{22}$$

– плотность вероятности найти среди нейтронов, распределенных по интервалу ΔE, группы g такие, которые взаимодействуют с полным сечением Σ. Использование квадратурных формул вида

$$\left\langle f(\Sigma)\right\rangle^{g}=\sum_{k=1}^{K_g}a_k f(\Sigma_k) \tag{23}$$

соответствует аппроксимации $P^g(\Sigma)$ конечной суммой взвешенных δ-функций (δ-представление):

$$P^{g}(\Sigma)=\sum_{k=1}^{K_g}a_k\delta(\Sigma-\Sigma_k), \tag{24}$$

где a_k и S_k (k = 1,..., K_g) – фиксируемые для группы g константы, не зависящие от вида интегрируемой функции $f(\Sigma)$. Точность выражения (23) соответствует теореме Э. Хелли.

Интегрирование спектрального уравнения переноса нейтронов с использованием δ-представления на групповом интервале энергий группы g переводит его в подгрупповое представление [12, 13]. Учет резонансной структуры всех нуклидов среды в пределах группы нейтронов можно производить способом разделения их на множество макроподгрупп (в каждую из которых входит по одной подгруппе от каждого отдельного нуклида всей среды) – путем построения упорядоченных наборов-кортежей из прямого декартова произведения множеств [14] подгрупп отдельных нуклидов. Количество макроподгрупп в группе определяется по правилу произведения перечислительной комбинаторики [15]. Имеем

$$\Omega\,\nabla\varphi^{g,p}+\Sigma^{g,p}\varphi^{g,p}=S\varphi^{g,p}+F\varphi^{g,p}+Q\varphi^{g,p}, \tag{25}$$

где $\varphi^{g,p}$ – макроподгрупповой поток нейтронов; S, F, Q – источники рассеяния, деления и внешний для образования $\varphi^{g,p}$. Резонансная структура нейтронных сечений всей среды менее выражена, чем структура ее отдельных нуклидов, что определяется качественными следствиями вариационного принципа квантовой механики [16] – для основного состояния наиболее существенны те структуры, энергия которых минимальна. Чем выше энергия данной структуры по сравнению с минимальной величиной энергии структур, тем менее существенна эта структура для описания среды в целом. Согласно вариационному принципу, энергия E, вычисляемая с оптимальной линейной комбинацией волновых функций структур i, меньше энергии E_i каждой отдельной структуры. Количество нуклидов, определяющих реальную резонансную структуру среды, обычно от одного до трех. Формально уравнение (25) не отличается от группового уравнения переноса нейтронов. Для его решения применимы как вероятностные (Монте-Карло), так и детерминистические численные методы. В работе [17] отмечалось, что макроподгрупповые константы целесообразно готовить в известных форматах CCC-254/ANISN и CCC-547/TWODANT, используемых многими компьютерными кодами в различных исследовательских центрах. Это реализовано нами в компьютерной программе SANS-B на основе данных российской системы констант БНАБ-93 [18], имеющей статус рекомендованных справочных данных (сертификат ВНИЦСМВ ГСССД № 444 от 01.08.95). Не вдаваясь в алгоритмические детали технологии программы, которые по объему довольно велики, приводим результаты расчетов на $k_{эф}$ быстрой сборки ZPR-III-54 [19], при которых макроподгрупповые константы в формате CCC-547/TWODANT готовились по коду SANS-B, а решение уравнения переноса (25) проводилось по коду ONEDANT (опция IGEOM=SPH) из системы DANTSYS 3.0 [20]. Сборка ZPR-III-54 состояла из двух физических зон: центральная – с плутониевым топливом (обогащение по ^{239}Pu 38%) и железный экран. Объем 190 литров. Полное сечение в группе g Σ_t^g при подготовке констант для решения кинетического уравнения переноса нейтронов с учетом индикатрисы рассеяния до первой гармоники может быть усреднено с весом нулевой гармоники потока нейтронов $\Sigma_{t,0}^g$ и первой гармоники потока нейтронов Σ_{t1}^g в конкретной физической зоне. В таблице 1 приводятся результаты расчетов для всех четырех возможных комбинаций такого усреднения, из которых следует, что на результаты влияет только вторая зона – железный экран. Приводятся многогрупповые расчеты в 28-ми и 299-ти группах, а «ультрагрупповые» – с учетом макроподгруппового представления

Таблица 1

Значения $k_{эф}$ в зависимости от числа групп и способа усреднения полного сечения

Количество групп, резонансные нуклиды	Способ усреднения полного сечения Σ_t^g			
	$\Sigma_{t0}^g, \Sigma_{t0}^g$	$\Sigma_{t1}^g, \Sigma_{t1}^g$	$\Sigma_{t0}^g, \Sigma_{t1}^g$	$\Sigma_{t1}^g, \Sigma_{t0}^g$
28	0,9388	0,9415	0,9415	0,9388
51, Fe	0,9781	0,9782	0,9781	0,9782
197, Fe, ^{238}U, ^{239}Pu	0,9779	0,9779	0,9779	0,9779
299	0,9598	0,9614	0,9614	0,9598
433, Fe	0,9866	0,9866	0,9866	0,9866
1054, Fe, ^{238}U, ^{239}Pu	0,9870	0,9870	0,9870	0,9870

резонансной структуры одного железа и варианта для трех нуклидов: Fe, ^{238}U, ^{239}Pu. Вклад подгрупповой структуры остальных нуклидов примерно такой же, как и последних двух ~ 0,04% по сравнению с расчетами, учитывающими резонансную структуру одного железа. Вклад резонансной структуры железа в $k_{эф}$ очень значительный (в абсолютном и относительном выражении). Проводились расчеты по учету влияния отдельных групп на $k_{эф}$. В 28-групповом приближении подгрупповая структура железа имеется с 6-ой по 16-ую группу: 0,215 кэВ–0,8 МэВ (всего 11 групп). Учет подгруппового представления с 8-ой по 12-ую группу: 4,64 кэВ–0,2 МэВ (всего 5 групп) составляет 97,5% от вклада всей резонансной структуры железа в полный резонансный эффект в $k_{эф}$, что важно учитывать, например, в трехмерных расчетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование сингулярных функций для получения на практике необходимых реакторных функционалов весьма эффективно. Это можно использовать для физического моделирования различных реакторных установок на быстрых нейтронах. Макроподгрупповой подход удачно развивает групповые принципы описания сечений и позволяет корректно и в то же время компактно учитывать резонансную гетерогенность (пространственно-энергетическую корреляцию сечений одинаковых нуклидов, разделенных средами иного изотопного состава) посредством методики сквозных подгрупп. Компьютерная программа SANS-B позволяет готовить макроподгрупповые константы в широко известных форматах CCC-254/ANISN и CCC-547/TWODANT, используемых многими компьютерными кодами как российских, так и зарубежных исследовательских центров, например, от ONEDANT до THREEDANT из системы DANTSYS 3.0. Сначала по одномерной программе ONEDANT можно найти «ответственные» нуклиды и энергетические группы, а затем провести двух- и трехмерные расчеты полномасштабных моделей реакторных установок на быстрых нейтронах.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект №09-02-97513).

Литература

1. *Франк-Каменецкий А.Д.* Моделирование траекторий нейтронов при расчете реакторов методом Монте-Карло. – М.: Атомиздат, 1978.

2. *Лузин Н.Н.* Интеграл и тригонометрический ряд. – М.-Л.: Гостехиздат, 1951.

3. *Сакс С.* Теория интеграла. – М.: ИИЛ, 1949.

4. *Кац И.С.* К вопросу о структуре сингулярных функций ограниченной вариации //Успехи математических наук. – 1953. – Т. 8. – Вып. 5(57). – С. 157-159.

5. *Толстов Г.П.* Мера и интеграл. – М.: Наука, 1976.

6. *Рунова Л.П., Рунов Л.В.* Элементы теории мер. – Ростов-на-Дону: РГУ, 1999.

7. *Шихов С.Б., Трояновский Е.Б.* Теория ядерных реакторов, газокинетическая теория. Т. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

8. *Шильков А.Е.* Математическая модель для описания неравновесной излучающей плазмы/Препринт ИПМ АН СССР-125. – М., 1988.

9. *Натансон И.П.* Теория функций вещественной переменной. – М.: Наука, 1974.

10. *Аристова Е.Н.* Математическое моделирование переноса излучения и переноса нейтронов с учетом процессов в сплошных средах. – Автореферат дисс. на соиск. ст. д.ф.-м.н. – М., 2009. – С. 46.

11. *Бирман М.Ш., Виленкин Н.Я., Горин Е.А. и др.* Функциональный анализ. – М.: Наука, 1972.

12. *Николаев М.Н., Филиппов В.В.* Измерение параметров резонансной структуры полных сечений некоторых элементов в области энергий 0,3-2,7 МэВ//Атомная энергия. – 1963. – Т. 15. – Вып. 6. – С. 493.

13. *Николаев М.Н., Хохлов В.Ф.* Система подгрупповых констант/В кн. Бюллетень информационного центра по ядерным данным. Вып. 4. – М.: Атомиздат, 1967. – С. 392.

14. *Колмогоров А.Н., Фомин С.В.* Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1972.

15. *Гульден Я, Джексон Д.* Перечислительная комбинаторика. – М.: Наука, 1990.

16. *Зубарев А.Л.* Вариационный принцип Швингера//Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1978. – Т. 9. – Вып. 2. – С. 453-489.

17. *Безбородов А.А., Клинов Д.А., Колесов В.В.* и др. Макроподгрупповое моделирование реакторной установки на быстрых нейтронах//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 177-184.

18. *Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsiboulya A.M.* The ABBN-93 Group Data Library. Part 1: Nuclear Data for Calculation of Neutron and Photon Radiation Fields. INDC(CCP)-409/L, Vienna, IAEA, 1997. – P. 65.

19. *Hardie R.W., Schenter R.E., Wilson R.E.* An analysis of selected fast critical assemblies using ENDF/B-IV neutron cross sections//Nuclear Science and Engineering. – 1975. – V. 57. – № 3. – P. 222-238.

20. *Alcouffe R.E., Baker R.S., Brinkley F.W. et.al.* DANTSYS: A Diffusion Accelerated Neutral Particle Transport Code System//LA-12969-M (1995), CCC-547/DANTSYS 3.0 Code Package. ORNL: 1997.

Поступила в редакцию 20.04.2010

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.534

Some Benefits from Use of Radiogenic Lead as a Coolant of Fast Reactors\V.A. Apse, A.N. Shmelev, A.M. Sirotkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 7 tables. – References, 12 titles.

The paper evaluates a possibility to improve some thermal-physical parameters of lead-cooled fast reactors (BREST-type reactors) by using radiogenic lead with large content of isotope ^{208}Pb as a coolant. The paper demonstrates that unique neutron-physical properties of ^{208}Pb allow to use more sparing conditions for routine operation of lead-cooled fast reactors on coolant velocity and pressure drop for coolant flow through the reactor core while coolant heating up and total thermal power is kept constant.

УДК 621.039.51

Singular Approach in Physical Calculations of the Fast Reactor Plant\A.A. Bezborodov, E.V. Dolgov, D.A. Klinov, V.V. Kolesov, V.Yu. Stogov, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 1 table. – References, 20 titles.

The aim of the paper is considering of the application of the singular functions technique employment in practical tasks for description of neutron cross-sections interactions with media nuclides nuclei in resonance part of energy for physical simulation of the fast reactor plants, in which non-resolution field is important.

УДК 621.039.548

Peculiar Features of the MIR Reactor Core Configuration\A.L. Izhutov, V.V. Kalygin, A.P. Malkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 5 illustrations. – References, 7 titles.

Presented are principles of core configuration of the MIR lope-type research reactor, which allow the required irradiation conditions of experimental fuel elements and assemblies to be provided. Preliminary testing results substantiated an increase in the number of control rods. This ensured the observance of nuclear safety requirements during reloading of the reactor taking account of personnel errors and also possibility to provide conditions in the MIR core suitable for the performance of new types of experiments. The proposed and implemented method of non-uniform loading of the core ensures saving of fuel, minimization of the reactor power during simultaneous irradiation of several experimental fuel assemblies and constancy of neutron flux profile in the experimental channels.

УДК 621.039.56

Conditions for Minimum Deviation from Zero Level of Reactivity in Point Model for Unlocked Burnable Poison\Yu.A. Kazansky, D.M. Titov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 10 titles.

For the low power reactors in the implementation of the idea of self-control, it is important to obtain the time dependence of reactivity, possibly a little different from zero level. At the same time, we know that by using of burnable poison positive overshoot of reactivity is observed. In this paper we present conditions under which it is possible to realize the minimum deviation from zero reactivity during burnup

УДК 621.039.548

Arrangement of Additional High-Flux Irradiation Volumes in the SM Reactor Core\Yu.A. Krasnov, A.P. Malkov, A.L. Petelin, V.V. Pimenov, V.A. Uzikov, S.I. Chekalkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 5 titles.

To increase the effectiveness of the SM operation by arranging additional irradiation volume in the high-flux channels, it was proposed to locate two FAs with experimental channels 24.5mm in diameter in the core cells adjacent to the neutron trap. The channels should be adjacent both to the neutron trap and to each other. In this case, additional irradiation volume, so-called «small trap», can be arranged, The calculations and experiments performed to investigate the SM characteristics in the