

## УСЛОВИЯ МИНИМАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ ОТ НУЛЕВОГО ЗНАЧЕНИЯ РЕАКТИВНОСТИ В ТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ НЕБЛОКИРОВАННОГО ВЫГОРАЮЩЕГО ПОГЛОТИТЕЛЯ

**Ю.А. Казанский, Д.М. Титов**

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



Для реакторов сверхмалой мощности при реализации методов саморегулирования важно получить временную зависимость реактивности, по возможности, мало отличающуюся от нулевого значения. В то же время известно, что при использовании выгорающего поглотителя наблюдается положительный выбег реактивности. В работе приведены условия, полученные аналитически, при которых возможно найти минимальные отклонения реактивности от нулевого значения в процессе выгорания топлива.

**Ключевые слова:** физика реакторов, выгорающий поглотитель, реакторы малой мощности, минимизация реактивности.

**Key words:** reactor physics, burnable poison, low power reactors, reactivity minimization.

### ВВЕДЕНИЕ

В ядерной энергетике большое внимание уделяется проблеме управления мощностью ядерного реактора. Одна из основных задач – компенсация запаса реактивности, который необходим для «подпитки» потерь реактивности в процессе работы реактора в различных режимах. В основном, для регулирования реактора используются стрежни из высокопоглощающего материала и растворенная в теплоносителе первого контура борная кислота. Для регулирования используют и выгорающие поглотители, которые сокращают диапазон изменения реактивности в пассивном режиме.

Несмотря на то, что идея использования выгорающих поглотителей появилась более 50-ти лет назад [1–3], широкое применение в атомной энергетике она получила в последние 20 лет. На сегодняшний день практически все реакторы содержат в активной зоне тот или иной выгорающий поглотитель, например, добавка эрбия используется в реакторах РБМК [4], гадолиний в смеси с топливом применяют в качестве выгорающего поглотителя в водо-водяных реакторах (ВВЭР-1000 (АЭС-2006) [5] и EPR-1600 [6]).

Для реакторов сверхмалой мощности (до 10 МВт) рассматривают особые спо-

собы саморегулирования [7, 8]. Пассивное саморегулирование реакторов сверхмалой мощности – один из необходимых путей сокращения капитальных и эксплуатационных затрат, который дает возможность (наряду с другими усовершенствованиями) сделать реакторы экономически целесообразными.

В статье рассмотрен частный случай моделирования саморегулирования мощности реактора, основанный на использовании гомогенного неблокированного выгорающего поглотителя. Основная задача состояла в том, чтобы получить условия нахождения наименьшего отклонения реактивности от нулевого значения при заданных характеристиках реактора (потеря реактивности и изменение плотности потока нейтронов в течение кампании реактора) и сечении поглощения выгорающего поглотителя. Оказалось, что такая задача имеет аналитическое решение и позволяет при заданных свойствах реактора найти необходимые характеристики выгорающего поглотителя (сечение, внесенную в реактор отрицательную реактивность).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В процессе работы реактора без выгорающих поглотителей происходит практически линейная во времени потеря реактивности. Наличие выгорающих поглотителей существенно меняет поведение реактивности во времени и зависит при этом от темпа потери реактивности в связи с выгоранием топлива, сечения поглощения нейтронов ядрами выгорающего поглотителя и плотности потока нейтронов. Ставится задача найти такие характеристики выгорающего поглотителя, при которых зависимость реактивности от времени будет иметь минимальные отклонения от нулевого значения.

Пусть реактор после вывода на номинальный уровень мощности находится в критическом состоянии, и его запас реактивности  $\rho_B$  скомпенсирован введенным выгорающим поглотителем. Темп потери реактивности из-за выгорания топлива постоянен во времени, при этом полная потеря реактивности за кампанию  $T$  равна  $\rho_{\text{выг}}$ . Полагаем, что сечение выгорающего поглотителя  $\sigma_a$  не изменяется во времени, что возможно при низких концентрациях ядер поглотителя, вследствие чего можно пренебречь блокировкой сечений.

В оговоренных условиях изменение во времени концентрации ядер выгорающего поглотителя  $N_a(t)$  можно найти из следующего уравнения:

$$\frac{dN_a(t)}{dt} = -\sigma_a \varphi(t) N_a(t). \quad (1)$$

Реактивность  $\rho_B$  зависит от количества поглотителя, загруженного в активную зону. По мере выгорания поглотителя будет появляться положительная реактивность  $\rho^+(t)$ , которая в свою очередь зависит от сечения поглощения выгорающего поглотителя и плотности потока нейтронов:

$$\rho^+(t) = \rho_B [1 - f(t)], \quad (2)$$

$$f(t) = \frac{N_a(t)}{N_a(0)}. \quad (3)$$

Считая, что изменение реактивности за счет выгорания топлива без поглотителей носит линейный характер, получаем зависимость поведения реактивности от времени

$$\rho(t) = \rho_B [1 - f(t)] - \rho_{\text{выг}} \frac{t}{T}, \quad (4)$$

которая является суммой двух функций. Первая имеет положительный знак и из-

меняется от 0 до  $+\rho_B$  (в случае полного выгорания поглотителя), вторая – линейная функция – изменяется от 0 до  $-\rho_{\text{выг}}$ .

В общем случае зависимость (4) в интервале  $0-T$  имеет максимум при  $t = t^*$ . Положение максимума можно найти, приравняв производную  $d\rho/dt$  нулю:

$$-\rho_{\text{вп}} \frac{df(t)}{dt} = \frac{\rho_{\text{выг}}}{T}. \quad (5)$$

Находим время  $t^*$  из уравнения (5), при котором значение функции  $\rho(t)$  находится в максимуме. Для того чтобы отклонения реактивности от нулевого значения во временном интервале  $0-T$  были минимальными, необходимо, чтобы положительный выбег реактивности  $\rho(t^*)$  по абсолютному значению был равен реактивности в конце кампании, т.е.

$$\rho(t^*) + \rho(T) = 0. \quad (6)$$

Для решения сформулированной задачи при условии постоянства микроскопического сечения поглощения выгорающего поглотителя необходимо сделать предположения о виде функции  $\varphi(t)$  в зависимости от плотности потока нейтронов, которая

- постоянна во времени,  $\varphi(t) = \varphi_0$ ;
- меняется по закону  $\varphi(t)/\varphi_0 = 1/[1 - \sigma_a^{25}\varphi_0 t]$  (реакторы с высокообогащенным топливом);
- меняется по линейному закону  $\varphi(t)/\varphi_0 = (1 + gt)$ .

### РЕАКТОР С ПОСТОЯННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ

В реакторах РБМК в связи с непрерывной перегрузкой топлива в первом приближении плотность потока нейтронов можно считать постоянной. В таком случае решение уравнения (1) принимает вид

$$N_a(t)/N_a(0) = \exp(-\sigma_a\varphi_0 t), \quad (7)$$

и зависимость реактивности от времени можно записать как

$$\rho(t)/\rho_{\text{выг}} = (\rho_B/\rho_{\text{выг}})[1 - \exp(-\sigma_a\varphi_0 t)] - t/T. \quad (8)$$

Значение  $t^*$  находим, приравняв нулю производную уравнения (8):

$$t^* = [\ln(\rho_B\sigma_a\varphi_0 T/\rho_{\text{выг}})]/\sigma_a\varphi_0. \quad (9)$$

Более удобную форму записи получим, введя следующие обозначения:  $\tau = t/T$ ,  $Z = \rho_B/\rho_{\text{выг}}$  и  $Y = \sigma_a\varphi_0 T$ . В таком случае уравнения (8) и (9) принимают вид

$$\rho(t)/\rho_{\text{выг}} = Z [1 - \exp(-Y\tau)] - \tau, \quad (10)$$

$$\tau^* = [\ln(YZ)]/Y. \quad (11)$$

Следовательно, максимум функции (10) возможен на временном интервале  $0 \leq \tau \leq 1$ , если  $YZ > 1$  и  $Y > \ln(YZ)$ . При этих условиях максимальное значение реактивности будет при  $\tau = \tau^*$ :

$$\rho(\tau^*)/\rho_{\text{выг}} = Z [1 - 1/YZ] - [\ln(YZ)]/Y, \quad (12)$$

а значение реактивности в конце кампании составит

$$\rho(\tau = 1)/\rho_{\text{выг}} = Z [1 - \exp(-Y)] - 1. \quad (13)$$

Используя условие (6) и полученные равенства (12) и (13), запишем уравнение, решение которого позволяет получить минимальные отклонения реактивности от нулевого значения для каждой пары значений  $Y$  и  $Z$ :

$$2Z - 1/Y = 1 + Z\exp(-Y) + (1/Y)\ln(ZY). \quad (14)$$

На рисунке 1 показана кривая, соединяющая такие значения  $Z$  и  $Y$ , при которых

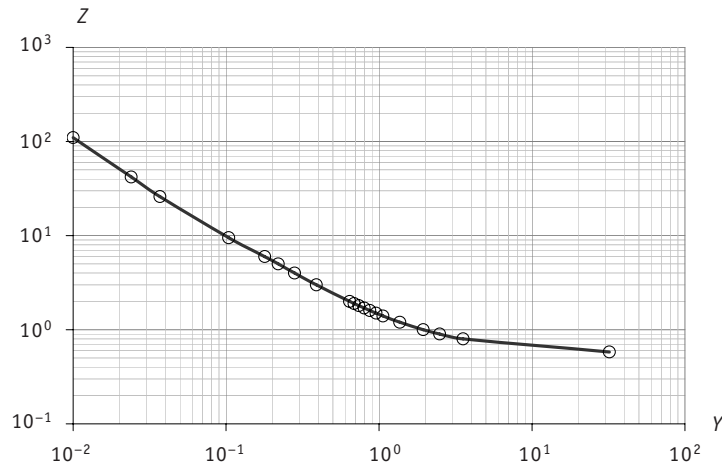


Рис. 1. Рассчитанная по (14) зависимость  $Z(Y)$ , при которой реализуется минимальное отклонение реактивности от нулевого значения при постоянной плотности потока нейтронов

реализуется минимальное отклонение реактивности от нулевого значения, т.е. когда выполняется требование (6).

### РЕАКТОР С ВЫСОКИМ ОБОГАЩЕНИЕМ ТОПЛИВА

Когда в реакторе используется высокое обогащение топлива (например, реакторы транспортного назначения), можно пренебречь накоплением делящихся нуклидов. В работе [9] показано, что для поддержания постоянной мощности при высоком обогащении топлива плотность потока нейтронов  $\phi(t)$  надо изменять следующим образом:

$$\phi(t)/\phi_0 = 1/[1 - \sigma_a^{25}\phi_0 t], \quad (15)$$

где  $\sigma_a^{25}$  – сечение поглощения нейтронов ядрами  $^{235}\text{U}$ .

Зная зависимость плотности потока нейтронов от времени можно найти количество ядер выгорающего поглотителя в функции времени. Вновь полагая сечение поглощения выгорающего поглотителя независимым от времени, находим решение (1), принимая во внимание изменение во времени плотности потока нейтронов (15):

$$N_a(t)/N_a(0) = [1 - \sigma_a^{25}\phi_0 t]^{\sigma_a/\sigma_a^{25}}. \quad (16)$$

Находим временную зависимость реактивности с учетом полученной закономерности выгорания поглотителя (16). Введем обозначения:  $k = \sigma_a^{25}\phi_0 T$ ,  $Z = \rho_B/\rho_{\text{выг}}$  и  $Y = \sigma_a\phi_0 T$ , тогда

$$N_a(\tau)/N_a(0) = [1 - (1 - k\tau)^{Y/k}] \text{ и } \rho(t)/\rho_{\text{выг}} = Z\{1 - [1 - k\tau]^{Y/k}\} - \tau. \quad (17)$$

Обратим внимание: введенный параметр  $k$  пропорционален глубине выгорания (при высоком обогащении).

Максимальное значение функции (17) имеет место при  $\tau = \tau^*$ :

$$\tau^* = (1/k) \left\{ 1 - (1/Y)^{[k/(Y-k)]} \right\}. \quad (18)$$

Приравниваем значения функции  $\rho(\tau)$  при  $\tau = 1$  и  $\tau = \tau^*$  и, используя (18), получаем уравнение, по смыслу совпадающее с (14):

$$Z \left[ 1 - \left( 1 - \left[ 1 - \left( \frac{1}{ZY} \right)^{\frac{k}{Y-k}} \right]^{\frac{Y}{k}} \right) \right] - \frac{1}{k} \left[ 1 - \left( \frac{1}{ZY} \right)^{\frac{k}{Y-k}} \right] + Z \left[ 1 - (1-k)^{\frac{Y}{k}} \right] - 1 = 0. \quad (19)$$

Равенство (19) реализуется, когда  $\rho(\tau^*) + \rho(1) = 0$ , но при различных значениях  $Z$  и  $Y$ , зависящих от  $k$  (от глубины выгорания). Результаты расчетов по (19) показаны на рис. 2.

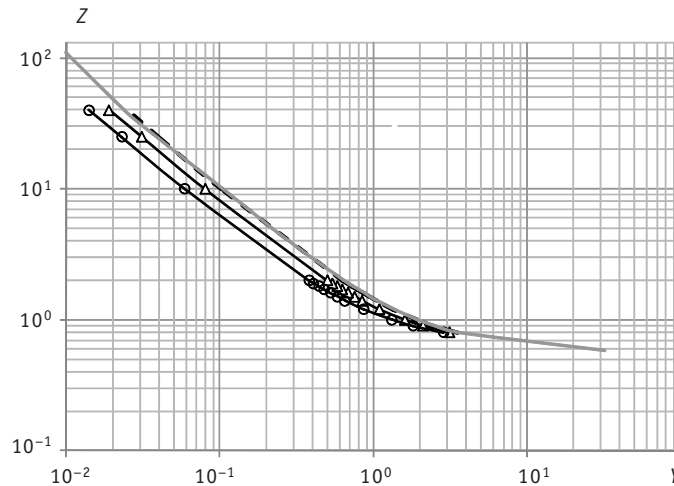


Рис. 2. Зависимость, соединяющая значения  $Z = \rho_B/\rho_{\text{выг}}$  и  $Y = \sigma_a \phi_0 T$ , при которых реализуется минимальное отклонение реактивности от нулевого значения при различных значениях  $k$ : — — — — —  $k = 0,05$ ;  $\Delta$  —  $k = 0,5$ ;  $\circ$  —  $k = 0,8$ ; — — — — — расчет по формуле (14)

Из графика видно, что при глубинах выгорания меньших 10% ( $k < 0,1$ ) расчеты по (19) не зависят от значений  $k$  и совпадают с результатами расчетов по (14) (рис. 1).

## РЕАКТОР С ПЛОТНОСТЬЮ ПОТОКА, ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЛИНЕЙНО ВО ВРЕМЕНИ

В общем случае для энергетических реакторов не удастся простым способом найти зависимость  $\phi(\tau)/\phi_0$  для вычисления изменения количества ядер выгорающего поглотителя от времени  $N_a(\tau)/N_a(0)$ . Это связано с тем, что в процессе выгорания появляются новые делящиеся нуклиды. Однако можно использовать расчетную зависимость  $\phi(\tau)/\phi_0$ . Расчеты для водо-водяных реакторов позволяют аппроксимировать искомую зависимость следующим образом [10]:

$$\phi(\tau)/\phi_0 = (1 + g\tau). \quad (20)$$

Коэффициент пропорциональности  $g$  зависит от типа реактора, количества перегрузок топлива, величины обогащения топлива в активной зоне данного реактора.

При условии (20) решение уравнения (1) имеет следующий вид:

$$N_a(\tau) = N_a(0) \exp[-Y\tau(1 + g\tau/2)]. \quad (21)$$

Запишем баланс реактивности в реакторе, как и в предыдущих случаях:

$$\rho(\tau)/\rho_{\text{выг}} = Z \left[ 1 - \exp[-Y\tau(1 + g\tau)] \right] - \tau. \quad (22)$$

В данном случае невозможно найти явный вид выражения для  $\tau^*$ , поэтому его находили численно.

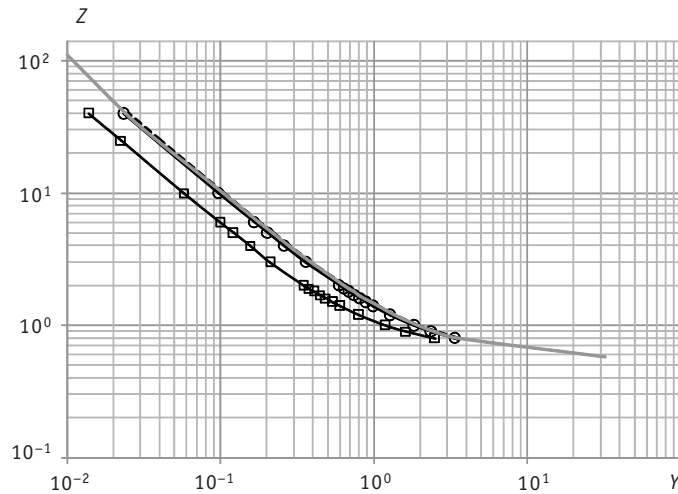


Рис. 3. Зависимости  $Z = \rho_{\text{в}}/\rho_{\text{выг}}$  от  $Y = \sigma_a \phi_0 T$ , при которых реализуются минимальные отклонения реактивности от нулевого значения, при различных значениях  $g$ : — — —  $g = 0,02$ ; ○ —  $g = 0,2$ ; □ —  $g = 2$ ; — — — расчет по формуле (14)

Условие  $\rho(\tau^*) + \rho(1) = 0$ , при котором находим минимальные отклонения реактивности от нулевого значения для различных пар значений  $Z$  и  $Y$ , получаем из уравнения (22) в виде

$$Z[1 - \exp[-Y\tau^*(1 + g\tau^*)]] - \tau^* + Z[1 - \exp[-Y(1 + g)]] - 1 = 0. \quad (23)$$

Результаты расчетов по (23) показаны на рис. 3.

Из графика видно, что при изменениях плотности потока нейтронов в течение кампании до 20% (в реакторах ВВЭР плотность потока нейтронов в течение года вырастает не более, чем на 10%) рассчитанные оптимальные значения  $Z$  и  $Y$  по (23) не зависят от значений  $g < 0,2$  и совпадают с рассчитанными по (14).

Представление о влиянии выгорающего поглотителя на максимальное отклонение реактивности от нулевого значения дает зависимость  $\rho(\tau^*)/\rho_{\text{выг}}$  от характеристик реактора и выгорающего поглотителя  $Z$  и  $Y$  на рис. 4.

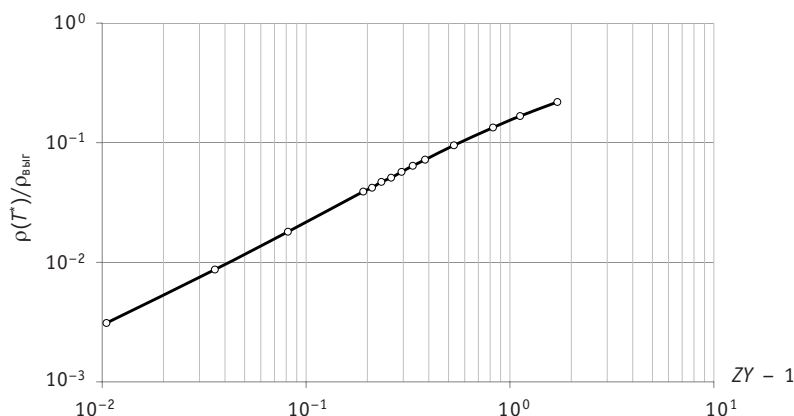


Рис. 4. Зависимость  $\rho(\tau^*)/\rho_{\text{выг}}$  от характеристик реактора и выгорающего поглотителя  $Z = \rho_{\text{в}}/\rho_{\text{выг}}$  и  $Y = \sigma_a \phi_0 T$ , рассчитанная по формуле (14)

## ВЫВОДЫ

1. Получено аналитическое соотношение, которое для реактора с неблокированным выгорающим поглотителем позволяет определить наименьшее отклонение реактивности от нулевого значения при заданных характеристиках реактора путем подбора характеристик выгорающего поглотителя.

2. Показано, что соотношение между  $Z = \rho_B/\rho_{\text{выг}}$  и  $Y = \sigma_a \phi_0 T$ , при которых отклонения реактивности от нулевого значения минимальны, не зависит от существующих глубин выгорания топлива в энергетических реакторах и может быть оценено по (14) и рис. 1, 4.

3. При росте  $Y = \sigma_a \phi_0 T$  значение  $Z = \rho_B/\rho_{\text{выг}}$  достигает предельного значения, равного 0,5.

4. Идеальный случай, когда реактивность практически не изменяется во времени, реализуется при  $ZY$ , стремящемся к единице. Это, в частности, означает, что запас реактивности, скомпенсированный введенным поглотителем, должен существенно превышать необходимый запас реактивности для компенсации выгорания топлива в реакторе.

5. Если потеря реактивности за кампанию реактора мала (реакторы очень малой мощности), то использование значений  $ZY$ , близких к единице, может быть полезным для достижения саморегулирования реактора за счет выгорающего поглотителя без системы регулирующих стержней.

## Литература

1. Radkowsky A. Theory and Application of Burnable Poisons/Proc. of the Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy. – V. 13. – P. 426-445, 1958.
2. Орлов В.В., Андреев В.С., Калашников А.Г., Тошинский Г.И. и др. Выбор некоторых оптимальных характеристик компенсирующих элементов ядерных реакторов/Труды Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, 1960.
3. Тошинский Г.И., Калашников А.Г. Методы расчета выгорания поглотителя в реакторах. Теория и методы расчета. – М.: Госатомиздат, 1962.
4. Абрамов М.И., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. – М.: НИКИЭТ, 2006.
5. Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. – М.: Академ. книга, 2004.
6. Schebitz F., Mekmouche A. Design Basis of Core Components and their Realization in the frame of the EPRs™ Core Component Development. – AREVA NP GmbH. – IYNC 2008 Interlaken, Switzerland, 20–26 September, 2008.
7. Kambe M. RAPID Operator-Free Fast Reactor Concept without Any Control Rods Reactor Concept and Plant Dynamics Analyses//Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY. – 2005. – V. 42. – №. 6. – P. 525-536.
8. Казанский Ю.А., Левченко В.А., Баршевцев В.А., Дорохович С.Л., Мачула А.А. Новый способ пассивной компенсации потери реактивности в результате выгорания топлива, основанный на давлении, образующемся при выделении газообразных продуктов ядерных и химических реакций. Рег. номер 2006141152 от 22.11.2006.
9. Саркисов А.А., Пучков В.Н. Физические основы эксплуатации ядерных паропроизводящих установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
10. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

Поступила в редакцию 4.10.2010



## 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 energetika» (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  $^{208}\text{Pb}$  as a coolant. The paper demonstrates that unique neutron-physical properties of  $^{208}\text{Pb}$  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 energetika» (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 energetika» (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 energetika» (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 energetika» (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