

О РАБОТЕ ПОДКРИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА УСКОРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ В РЕЖИМЕ МОДУЛЯЦИИ РЕАКТИВНОСТИ

А.В. Гулевич, О.Ф. Кухарчук, А.И. Брежнев

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



Рассматривается возможность применения импульсного реактора в качестве размножающей нейтроны мишени для ускорительно-управляемых систем. Предполагается, что такой реактор работает в режиме модуляции реактивности, аналогично тому, как это организовано в реакторе ИБР-2. Теоретически это позволяет снизить энергетические требования к пучку ускорителя и повысить безопасность для такого рода установок.

Ключевые слова: ускорительно-управляемая система, импульсно-периодический реактор, ускоритель высокоэнергетических протонов.

Key words: acceleration-driven system, pulsed periodic reactor, accelerator high-energy protons.

В настоящее время в литературе активно обсуждается возможность создания ускорительно-управляемых систем (acceleration-driven system – ADS) [1-3], в частности, для решения проблемы утилизации радиоактивных отходов атомной энергетики (трансмутации минорных актинидов и выжигания долгоживущих осколков деления). Основные декларируемые преимущества концепции ускорительно-управляемой системы в сравнении с традиционным ядерным реактором следующие:

- исключение возникновения неконтролируемой цепной реакции деления, так как реактор (бланкет) ускорительно-управляемой системы функционирует в глубокоподкритическом режиме;
- возможность загрузки большого количества (теоретически до 100%) минорных актинидов в активную зону подкритического реактора (по оценкам доля минорных актинидов в традиционном критическом реакторе из-за соображений безопасности не может превышать 5–10%).

Вместе с тем имеются и существенные недостатки ADS-систем, связанные с большей энергетической «стоимостью» нейтрона по сравнению с традиционным реактором деления или термоядерным реактором [4, 5]. Кроме того, для работы бланкета ускорительно-управляемой установки в глубокоподкритическом состоянии при его значимых мощностных и энергетических характеристиках требуется использование мощного внешнего источника нейтронов на базе мощного ускорителя высокоэнергетических протонов или ионов и нейтронопроизводящей мишени. Надежность и безопасность работы таких систем существенно зависят от стабильности поддержания пучка. Например, если прерывание в работе пучка пре-

© А.В. Гулевич, О.Ф. Кухарчук, А.И. Брежнев, 2012

вышает одну секунду, то возможны, в частности, значительные перепады температуры топлива и оболочки твэла реактора, которые существенно влияют на его работоспособность [6].

Цель данной работы состоит в том, чтобы рассмотреть возможность использования в качестве размножающей нейтроны мишени ускорительно-управляемой системы импульсный ядерный реактор, т.е. применить уже реализованную на практике схему «ускоритель – импульсно-периодический реактор» [7].

Для этого с целью повышения средней мощности ускорительно-управляемой системы (при фиксированной мощности ускорителя) рассматривается возможность использования в подкритическом реакторе принципа периодической модуляции реактивности [7, 8]. В этой схеме предполагается, что реактор более 90% времени «проводит» в глубокоподкритическом состоянии и лишь на короткое время переходит в состояние, близкое к мгновенной критичности. При этом не предполагается переход в область надкритичности на мгновенных нейтронах (как это реализовано, например, в реакторе ИБР [7]), что позволяет надеяться решить как проблему обеспечения ядерной безопасности и увеличить в несколько раз среднюю мощность реактора и тем самым ослабить требования к мощности пучка ускорителя.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕЙТРОННОГО ИМПУЛЬСА

Будем рассматривать импульсно-периодический реактор, снабженный модулятором реактивности, который обеспечивает на короткое время его перевод из глубокоподкритического состояния в состояние мгновенной критичности и обратно. При этом в активной зоне генерируется нейтронный импульс. В промежутках между импульсами реактор находится в глубокоподкритическом состоянии.

Кинетика нейтронов в таком реакторе описывается простейшей одноточечной моделью, уравнения которой имеют вид [8]

$$\begin{cases} \ell \frac{dn(\tau)}{d\tau} = [k(\tau)(1-\beta) - 1]n(\tau) + \sum_i^D \lambda_i C_i(\tau) + S \\ \frac{dC_i(\tau)}{d\tau} = \beta_i n(\tau) - \lambda_i C_i(\tau) \\ n(0) = n(\tau_p) \\ C_i(0) = C_i(\tau_p), \quad i = \overline{1, D}, \end{cases} \quad (1)$$

где τ_p – длительность периода; $n(\tau)$ – мощность реактора; ℓ – время жизни мгновенных нейтронов. В уравнении системы (1) $C_i = C_i^{\text{эфф}}/c$ и $S = S^{\text{эфф}}/c$, $c = 3,12 \cdot 10^{10}$ дел./с при ℓ в [Вт] и энергии деления 200 МэВ.

Если реактор находится в подкритическом состоянии с постоянным коэффициентом размножения нейтронов k_0 на постоянном источнике S , то значение мощности оценивается известным соотношением

$$n_0 = \frac{S}{1 - k_0}. \quad (2)$$

Предположим, что периодическое изменение во времени на интервале от 0 до τ_p эффективного коэффициента размножения нейтронов в реакторе приближенно описывается функцией вида [7, 8]

$$k(\tau) = k_0 + \Delta k_m e^{-\frac{\alpha \nu^2 (\tau - \tau_0 - m\tau_p)^2}{\Delta k_m}} = k_0 + \Delta k_m e^{-\frac{(\tau - \tau_0 - m\tau_p)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\Delta k_m}{2\alpha \nu^2},$$

где k_0 – эффективный коэффициент размножения нейтронов в реакторе между импульсами; Δk_m – эффективность модулятора реактивности; αv^2 – параметр, связывающий скорость вращения модулятора реактивности, время и реактивность реактора; τ_p – период следования импульсов ($\nu = 1/\tau_p$ – частота следования импульсов); $m = 0, 1, 2, \dots$ – целое число; τ_0 – время достижения максимального значения реактивности. При исследовании равновесного режима (режима строго повторяющихся импульсов) достаточно рассмотреть только первый импульс, при этом для удобства положим $\tau_0 = 0$, т.е. будем предполагать, что импульс реактивности симметричен относительно нуля.

Реактивность реактора на мгновенных нейтронах $\varepsilon(\tau)$ связана с $k(\tau)$ соотношением $\varepsilon(\tau) = k(\tau)(1-\beta) - 1$. Очевидно, что при малых значениях $\tau \sim 0$ для $\varepsilon(\tau)$ справедливо представление вида $\varepsilon(\tau) = \varepsilon_m - \alpha v^2 \tau^2$ [7], где ε_m – максимальное значение надкритичности, обеспечиваемое модулятором реактивности.

Будем предполагать, что мощность реактора можно представить в виде [8]

$$n(\tau) = Q\delta(\tau) + n_b, \quad (4)$$

где Q – энергия импульса; n_b – фоновая мощность (мощность между импульсами), которую можно считать постоянной при $\nu = 1/\tau_p \geq 1$ Гц.

Подставляя (4) во второе уравнение (1), после интегрирования и подстановки в первое уравнение (1), можно получить выражение (при $S = \text{const}$)

$$\Delta k_0 n_b + \frac{k_0 \beta Q}{\tau_p} + S = 0; \quad \Delta k_0 = k_0 - 1. \quad (5)$$

Будем также предполагать, что максимальное значение реактивности реактора, реализуемое в момент времени 0, в точности равно значению мгновенной критичности, т.е. $\varepsilon_m = 0$. В этом случае для оценки энергии Q и полуширины $\Theta_{1/2}$ импульса в работе [7] получены приближенные соотношения, которые в наших обозначениях имеют вид

$$Q = \frac{3.84 \cdot \left(k_0 \sum_{i=1}^D \lambda_i C_i + S \right)}{(\alpha v^2 \sqrt{\ell})^{2/3}}; \quad \Theta_{1/2} = 1.98 \cdot \left(\frac{\ell}{\alpha v^2} \right)^{1/3}. \quad (6)$$

При выводе (6) предполагалось, что источник, формируемый внешними нейтронами и предшественниками запаздывающих нейтронов, постоянен

($k_0 \sum_{i=1}^D \lambda_i C_i + S = \text{const}$), что справедливо лишь при частоте импульсов больше 1 Гц.

В промежутке между импульсами $k_0 \sum_{i=1}^D \lambda_i C_i + S = n_b (1 - k_0 (1 - \beta))$. С учетом выражений (5) и (6) можно получить следующие формулы для оценки энергии импульса Q , полной энергии E , выделенной за период τ_p , фоновой мощности между импульсами n_b , максимальной мощности n^{\max} и полуширины импульса $\Theta_{1/2}$:

$$Q = - \frac{S}{\frac{\Delta k_0}{3.84 \cdot (1 - k_0 (1 - \beta))} \cdot \left(\frac{\Delta k_m \sqrt{\ell}}{2\sigma^2} \right)^{2/3} + \frac{k_0 \beta}{\tau_p}}; \quad E = Q + n_b \tau_p; \quad (7)$$

$$n_b = \frac{Q \cdot \left(\frac{\Delta k_m \sqrt{\ell}}{2\sigma^2} \right)^{2/3}}{3.84 \cdot (1 - k_0 (1 - \beta))}; \quad n^{\max} = 2 \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{Q}{\Theta_{1/2}} = \frac{Q}{1.064 \cdot \Theta_{1/2}},$$

где $\Theta_{1/2} = 1.98 \cdot \left(\frac{2\sigma^2 \ell}{\Delta k_m} \right)^{1/3}$.

Отметим, что при выводе (7) основным предположением являлось то, что форма импульса мощности имеет форму гауссиана [7, 8]. Из формул (1), (5) и (7) также следует, что относительное увеличение средней мощности установки за счет ее функционирования в режиме модуляции реактивности (при мощности внешнего источника S и эффективном коэффициенте размножения нейтронов между импульсами k_0) составляет величину

$$\frac{\bar{n}}{n_0} = \frac{Q + n_b \tau_p}{n_0 \tau_p} = \frac{1 - \frac{\tau_p}{3.84 \cdot \Delta k_\beta} \cdot \left(\frac{\Delta k_m \sqrt{\ell}}{2\sigma^2} \right)^{2/3}}{\frac{k_0 \beta}{\Delta k_0} - \frac{\tau_p}{3.84 \cdot \Delta k_\beta} \cdot \left(\frac{\Delta k_m \sqrt{\ell}}{2\sigma^2} \right)^{2/3}}; \quad (8)$$

$$\Delta k_\beta = k_0(1 - \beta) - 1; \quad \Delta k_m = -\frac{\Delta k_\beta}{1 - \beta}.$$

Результаты расчетов по формуле (8) зависимости \bar{n}/n_0 при изменении параметров k_0 , ℓ и σ показаны на рис. 1.

Из рисунка видно, что эффект от использования в бланкете ускорительно-управляемой системы принципа модуляции реактивности более существенен для установок с быстрым спектром нейтронов (малые значения параметра ℓ). Значимое увеличение мощностных (энергетических) характеристик ADS-системы можно получить с увеличением частоты следования импульсов при малых подкритичностях реактора между импульсами. Для всех случаев увеличение длительности импульса модуляции (увеличение параметра σ) приводит к улучшению энергетической эффективности работы установки. Отметим также, что вид зависимостей, представленных на рис. 1, слабо меняется при изменении эффективной доли запаздывающих нейтронов (параметр β).

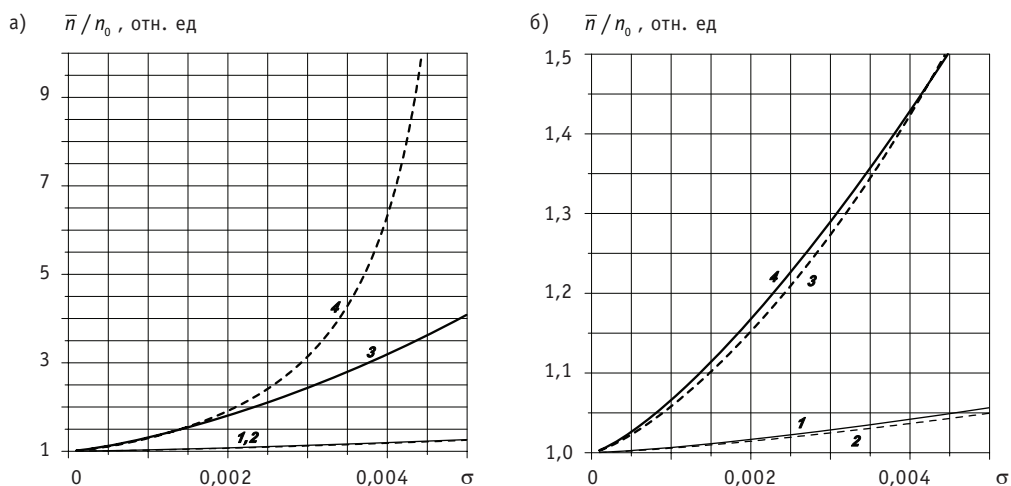


Рис.1. Зависимость параметра \bar{n}/n_0 от σ (а – $\ell = 10^{-6}$ с; б – $\ell = 10^{-4}$ с): 1 – $k_0 = 0.9$; $\nu = 1$ Гц; $\beta = 0.007$; 2 – $k_0 = 0.99$; $\nu = 1$ Гц; $\beta = 0.007$; 3 – $k_0 = 0.9$; $\nu = 10$ Гц; $\beta = 0.007$; 4 – $k_0 = 0.99$; $\nu = 10$ Гц; $\beta = 0.007$

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

1. Для проверки точности предположений, положенных в основу вывода формул для оценки параметров импульсов, были выполнены расчеты характеристик однозонного blankets ускорительно-управляемой установки.

В расчетах принималось $\nu = 1$ Гц; $S=10^4$ Вт ($\sim 8 \cdot 10^{14}$ н/с); $k_0=0.993$; $\Delta k_m=0.014$; $\tau_0=0.5$ с; $\ell=10^{-6}$ с; $\beta=0.007$. Значение параметра u варьировалось.

Результаты численных расчетов (расчет процессов в системе в рамках модели (1) по программе STIK [9]) в сравнении с результатами оценок по формулам (7), (8) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов кинетических характеристик реактора ADS-системы

Вариант	Численный расчет			Расчет по формулам (7), (8)					
	n^{\max} , МВт	E , МДж	\bar{n}/n_0	Q , МДж	n_b , МВт	$\theta_{1/2}$, мс	n^{\max} , МВт	E , МДж	\bar{n}/n_0
1	1.4	1.4	1	–	–	–	–	–	–
2; $\sigma = 10^{-3}$ с	19.1	1.5	1.07	0.02	1.45	1.04	19.3	1.47	1.05
3; $\sigma = 10^{-2}$ с	120	2.9	2.07	0.66	2.08	4.8	128	2.74	1.96

Из приведенных данных видно, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с аналитическими оценками по формулам (7) и (8). В качестве примера на рис. 2 показано временное поведение мощности реактора для рассмотренных вариантов из табл. 1. Можно отметить, что предположение (4) является достаточно справедливым – при частоте, равной 1 Гц, значение фоновой мощности отличается от константы не более чем на 20%.

2. Проведены расчеты кинетических процессов в реакторе ADS-системы при разных значениях параметров k_0 , Δk_m и σ из (2) (табл. 2).

На рисунке 3 показано временное поведение на периоде τ_p реактивности и мощности реактора для последнего варианта из табл. 2.

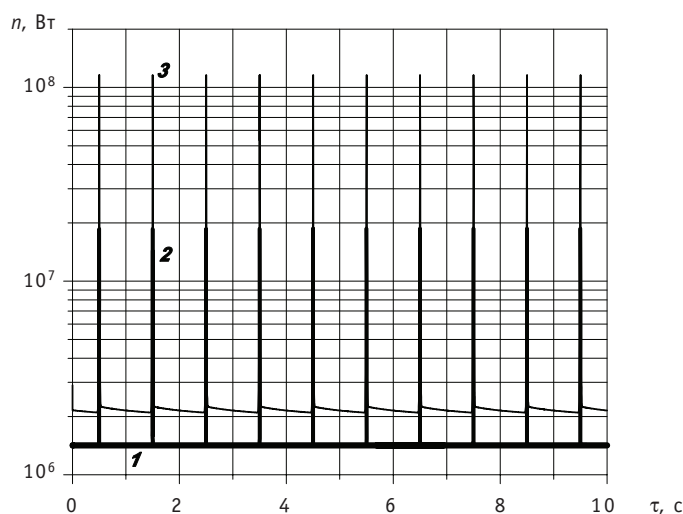


Рис. 2. Изменение мощности импульсно-периодического реактора для разных вариантов изменения реактивности из табл. 1: 1 – вариант 1; 2 – вариант 2; $\sigma = 10^{-3}$ с; 3 – вариант 3; $\sigma = 10^{-2}$ с

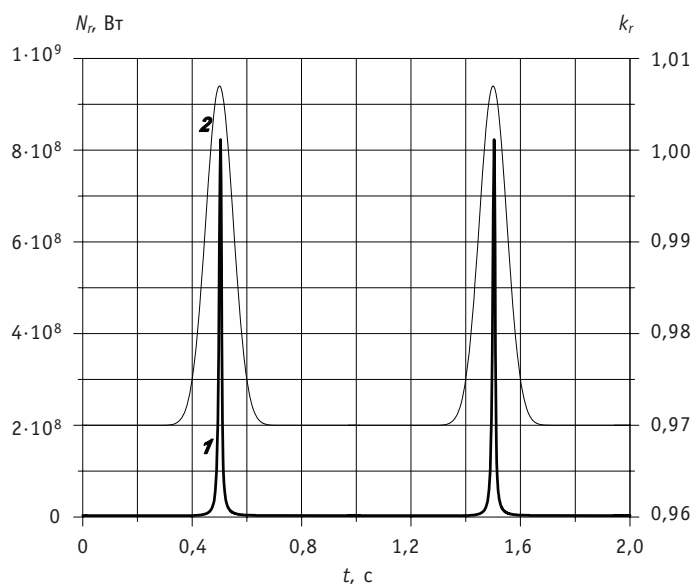


Рис. 3. Изменение за период следования импульсов полной мощности (1) и эффективного коэффициента размножения нейтронов (2) в реакторе для последнего варианта из табл. 2

Таблица 2

Результаты расчетов кинетических характеристик реактора ADS-системы при разных параметрах модуляции реактивности

Вариант	Численный расчет		Расчет по формуле (8)	
	n^{\max} , МВт	E , МДж	n^{\max} , МВт	E , МДж
$\nu = 1$ Гц; $k_0 = 0.95$; $\Delta k_m = 0.057$; $\sigma = 10^{-3}$ с	6.7	0.200	6.8	0.205
$\nu = 10$ Гц; $k_0 = 0.95$; $\Delta k_m = 0.057$; $\sigma = 10^{-3}$ с	6.9	0.025	6.9	0.025
$\nu = 1$ Гц; $k_0 = 0.95$; $\Delta k_m = 0.057$; $\sigma = 10^{-2}$ с	31.1	0.335	32.8	0.319
$\nu = 1$ Гц; $k_0 = 0.98$; $\Delta k_m = 0.027$; $\sigma = 10^{-2}$ с	50.4	0.835	55.0	0.804
$\nu = 1$ Гц; $k_0 = 0.97$; $\Delta k_m = 0.037$; $\sigma = 5 \cdot 10^{-2}$ с	76.7	14.68	72.6	9.96

Изменение во времени мощности для последнего варианта из табл. 2 и для случая, когда в реакторе ADS-системы отсутствует модулятор реактивности ($k_0=0.97$, $n_0 = S/(1-k_0) = 3.33 \cdot 10^5$ Вт), показано на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Применение в реакторе ускорительно-управляемой установки принципа модуляции реактивности с переводом реактивности реактора в область, близкую к мгновенной критичности, позволяет значительно улучшить ее мощностные (энергетические) характеристики (среднюю мощность можно увеличить в перспективе более, чем на порядок). При этом для получения большего эффекта длительность импульса реактивности должна быть несколько десятков миллисекунд. Применение более высоких частот модуляции имеет смысл при малых подкритичностях между импульсам. Кроме того, модуляцию реактивности целесообразно применять в реакторах с быстрым спектром нейтронов.

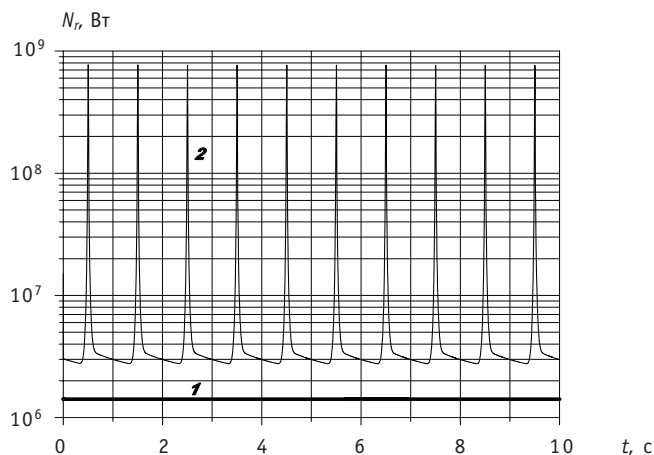


Рис. 4. Временное поведение полной мощности реактора для двух вариантов изменения реактивности: 1 – реактор без модуляции реактивности; 2 – реактор с модуляцией реактивности ($\nu = 1$ Гц; $k_0 = 0.97$; $\Delta k_m = 0.037$; $\sigma = 5 \cdot 10^{-2}$)

Для оценки параметров импульсов в системе получены аналитические выражения. Результаты расчетов по этим формулам согласуются с данными прямого численного модулирования процессов в ADS-установке с точностью не хуже 5% при относительно небольших длительностях импульса реактивности (до 10 мс). При увеличении этого времени до десятков миллисекунд погрешность аналитических оценок становится заметной. Следует также заметить, что их применение оправдано лишь при частоте следования импульсов больше 1 Гц.

Литература

1. Rubbia C. CERN-group Conceptual Design of a Fast Neutron Operated Power Energy Amplifier. Accelerator Driven Systems: Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste/Status Report: IAEA-TECDOC-985, 1997.
2. Minato K., Ikegami T., Inoue T. Recent Research and Development Activities on Partitioning and Transmutation of Radioactive Nuclides in Japan/In: Eighth Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning & Transmutation, Las Vegas, Nevada, USA, November 9-11, 2004, p. 29-48.
3. Zrodnikov A., Gulevich A. e.a. Nuclear Waste Burner for Minor Actinides Elimination// Progress in Nuclear Energy, v. 47, No 1-4, pp 339-346.
4. Slessarev I., Alexeev P. New-Quality Nuclear Power without Substantial Threats and Risks: Vital Risk Free Fast Reactors and Fuel Cycles/Proc. Int. Conf. IAEA on Fast Nuclear Reactors, Kyoto, Dec. 07-11, (2009).
5. Dyachenko P.P., Zrodnikov A.V., Prokhorov A.M. et al. Concept of a Combined ICF Power Plant and a Fission Reactor-Laser Driver//Fusion Techn. – 1991. – V. 20. – №4.
6. Gromov B.F., Orlov Y.I., Gulevsky V.A. e.a. Problems of Heavy Coolant Technology for Accelerator-Driven Systems/In: Intern. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Application (ADTTA'99), Praha, Czech Rep., 1999.
7. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1976.
8. Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. – М.: Энергоатомиздат, 2003.
9. Гулевич А.В., Качанов Б.В., Кухарчук О.Ф. Модели и программы расчета динамических характеристик реакторно-лазерных систем/Препринт ФЭИ-2454. – Обнинск, 1995.

Поступила в редакцию 23.01.2012

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.5: 621.362

Indirect Method of Determining the Efficiency of a Thermionic Reactor for Space \A.I. Brezhnev, E.G. Vinogradov, V.A. Linnik, M.K. Ovcharenko, A.P. Pyshko, Yu.S. Yuryev, V.I. Yarygin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 1 illustration. – References, 4 titles.

The method of determining the efficiency of the space nuclear thermionic power plant by the set of current-voltage characteristics without the direct measurement of the reactor thermal power, yet with fixing the relative thermal power for various current-voltage characteristics is described.

УДК 621.039.51

On ADS Subcritical Reactor Operation in the Reactivity Modulation Mode \A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk, A.I. Brezhnev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 2 tables, 9 illustrations. – References, 18 titles.

In the present paper consideration is given to the possibility of applying a pulsed reactor as a neutron-breeding target for accelerator-driven systems. It is assumed that such a reactor operates in the reactivity modulation mode similar to that of the IBR-2 reactor. In theory, it enables energy requirements for the accelerator beam to be reduced, while at the same time enhancing the safety of installations of this type.

УДК 621.039.51

Analysis of the BOR-60 Cells Utilization to Carry out Experiments \I.Yu. Zhemkov, Yu.V. Naboishchikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 12 illustrations. – References, 6 titles.

The efficiency of BOR-60 core cells and blanket utilization to carry out experiments was analyzed for the 40-year operating period. Reactor cells that are used the most often to carry out experiments as well as the parameters influencing their attractiveness were identified.

УДК 621.039.543.6

Methodology of Conversion of Plutonium of Various Isotopic Compositions to the Equivalent Plutonium as Applied to System Studies in Nuclear Power \E.M. Yatsenko, A.N. Chebeskov, V.S. Kagramanyan, A.G. Kalashnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 11 pages, 3 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

In this work the simplified methodology of correction of the initial enrichment, based on plutonium equivalent of uranium, plutonium, americium, neptunium, curium isotopes on loading is offered. The developed methodology, possessing comprehensible accuracy, allows not only to correct enrichment, but also to lower uncertainty degree at carrying out of system researches of atomic engineering taking into account dynamics of change of fuel isotopic composition at its multiple recycle in fast reactors.

УДК 621.039.51

Software Analysis of in-core monitoring system and reporting on the state of the reactor core of VVER-1000 KARUND \R.R. Alyev, S.T. Leskin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 13 titles.

On the basis of algorithms [2], [3] developed a software system KARUND whose function is to monitor the state of the measuring system of RMC, software in-core monitoring system, core VVER-1000 reactor, and visual representation in the form of information to the operator. Completed description of the main modes of operation of the program and. Partially, describes the interface software system KARUND and some results.

УДК 621.039.58

Lifetime NPP Equipment Management Under Ageing by System Analysis Procedures \O.M. Gulina, N.L. Salnikov, V.P. Politukov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 1 illustration. – References, 6 titles.