

УДК 621.039.56

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОДКРИТИЧНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО УРАН- ГРАФИТОВОГО РЕАКТОРА: РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В.В. Шидловский*, П.М. Гаврилов*, А.А. Цыганов*, А.Г. Кохомский*,
В.Б. Чуканов*, М.В. Антоненко*, И.В. Шаманин**, В.Н. Нестеров**

* ФГУП Сибирский химический комбинат, г. Северск

** Томский политехнический университет, г. Томск



Приведено описание системы контроля подкритичности промышленного уран-графитового реактора (ПУГР) и режимов ее работы. Изложена методика проверки импульсных каналов и определения их рабочих характеристик. Проведена оценка быстрого мощностного коэффициента реактивности. В результате проведения экспериментов по сбросу стержней в подкритическом состоянии реактора были оценены параметры процесса перевода реактора в глубоко подкритическое состояние. Предложена и реализована схема проведения минимизации влияния пространственных эффектов и повышения точности определения параметров данного быстрого процесса.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОДКРИТИЧНОСТИ РЕАКТОРА

Проектом реакторов АДЭ-4, АДЭ-5 не предусмотрены аппаратно-технические средства контроля текущего значения подкритичности в процессе перегрузочных работ (загрузка рабочих каналов, извлечение стержней системы управления и защиты (СУЗ)).

Система контроля подкритичности (СКПР) реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 была разработана РНЦ «КИ» в соответствии с требованиями документов Министерства атомной энергии Российской Федерации. Система предназначена для определения и контроля текущего (фактического) значения подкритичности в процессе перегрузки активной зоны, при ремонте оборудования остановленного реактора и в процессе вывода реактора в критическое состояние в широком диапазоне значений реактивности от -20β до $+0,5\beta$.

Контрольно-измерительная часть СКПР состоит из следующих блоков [1]:

- измерительно-вычислительный крейт (ИВК);
- крейт регистрации импульсных сигналов (КРИС);
- коробка питания и коммутации сигналов токовых ионизационных камер (КПК-1);
- предусилители (МПУ).

© В.В. Шидловский, П.М. Гаврилов, А.А. Цыганов, А.Г. Кохомский, В.Б. Чуканов, М.В. Антоненко, И.В. Шаманин, В.Н. Нестеров, 2006

В системе предусмотрена возможность записи показаний нейтронных датчиков (импульсных или токовых) и вычисленных параметров на магнитный носитель персонального компьютера. Вычисление реактивности и подкритичности обеспечивают как программы обработки экспериментальных данных, встроенные в систему, так и внешнее программное обеспечение.

Методы определения подкритичности, используемые в системе СКПР, основываются на реализации обращенного решения уравнения кинетики реактора в точечном приближении с учетом шести групп запаздывающих нейтронов. Параметры запаздывающих нейтронов задаются в памяти модуля микропроцессорного контролера ИВК. Может быть выбрана любая версия констант из имеющихся в программируемом запоминающем устройстве. Исходными данными для решения уравнения являются изменяющаяся во времени плотность нейтронного потока и константы, характеризующие запаздывающие нейтроны. Изменения плотности нейтронного потока определяются экспериментально по показаниям счетчиков нейтронов.

Имеется режим вычисления подкритичности реактора в присутствии источника нейтронов неизвестной интенсивности, так называемый «режим приращений» или Δ -режим. Физическая сущность Δ -режима, реализованного в СКПР, заключается в том, что после возмущения нейтронного потока (органами регулирования или изменением интенсивности источника) реактивность постоянна, хотя нейтронная мощность изменяется в течение некоторого времени.

Для применения Δ -режима в реакторе должен быть создан динамический режим. Способ создания динамики не имеет значения. К моменту начала Δ -измерений, процесс создания динамики должен быть закончен, а динамика достаточна для ее надежной регистрации используемыми детекторами. Условием корректности определения подкритичности в этом случае является постоянство неинформативной составляющей в течение времени измерений, что обычно выполняется.

Режим «источник» используется для работы в подкритическом состоянии. При работе в этом режиме оператору необходимо установить исходное значение (измеренное или вычисленное) подкритичности, соответствующее текущему состоянию реактора. Для случаев, когда значение реактивности постоянно и мало относительно шумов в СКПР предусмотрен режим усреднения значений реактивности. Для оперативной оценки экстраполированного значения подкритичности при извлечении из активной зоны стержней СУЗ или загрузки рабочих каналов в СКПР реализован режим « $1/N$ ».

В СКПР предусмотрено два режима работы: токовый и импульсный. В токовом режиме для измерения нейтронного потока используются токовые счетчики нейтронов (одновременно может быть подключено до 6 ионизационных камер КНК-56). В импульсном режиме для измерения нейтронного потока задействованы импульсные счетчики нейтронов (одновременно может быть подключено до 6 камер деления КНТ-31).

Измерение нейтронного потока осуществляется одновременно в двух режимах. Выбор режима работы системы для вычисления реактивности определяется уровнем нейтронного потока в реакторе. При низких уровнях нейтронного потока используется импульсный режим работы, в котором измерения выполняются с помощью камер деления, размещенных непосредственно в ячейках реактора на полувысоте активной зоны. При уровнях нейтронного потока, достаточных для регистрации токовыми счетчиками, используется токовый режим работы, в котором используются ионизационные камеры, размещенные в шахтах за пределом активной зоны.

В сентябре 2004 г. во время планово-перегрузочного ремонта реактора АДЭ-5 была выполнена проверка импульсных каналов и определены их рабочие характеристики. Для этого каждая импульсная подвеска (с соответствующей линией связи) с по-

мощью мостового крана устанавливалась в вертикальное положение, при этом камера деления КНТ-31 находилась над полом центрального зала. На камеру последовательно подавалось напряжение высоковольтного питания $U_{\text{выс}}$ для каждого значения $U_{\text{выс}}$ определялись дискриминационные характеристики. Цель этих измерений – определение величины порога дискриминации, при котором скорость счета при отсутствии полезных сигналов, вызываемых нейтронами (шумовая составляющая), отсекается. Эксперименты показали, что при $U_{\text{выс}} = (200 \div 400)$ В и $U_{\text{дискр}} = 1$ В шумовая составляющая счетных каналов полностью отсекается. Зависимости скорости счета импульсного канала №1 от уровней $U_{\text{выс}}$ и $U_{\text{дискр}}$ представлена на рис. 1.

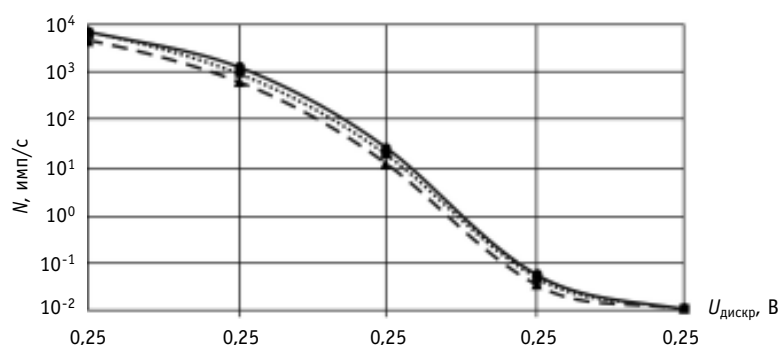


Рис. 1. Результаты измерений скорости счета импульсного канала № 1 (количество импульсов в секунду N) при различных значениях $U_{\text{выс}}$ и $U_{\text{дискр}}$: \blacktriangle — $U_{\text{выс}} = 200$ В; \blacksquare — $U_{\text{выс}} = 300$ В; \bullet — $U_{\text{выс}} = 400$ В

На следующем этапе определялись дискриминационные характеристики импульсных каналов при размещении камеры КНТ-31 в нейтронном поле (нижний конец подвески с камерой помещался в бак с плутоний-бериллиевым источником нейтронов, заполненный парафиновым замедлителем). Эксперименты показали, что дискриминационные характеристики импульсных каналов, полученные при различных значениях $U_{\text{выс}}$ совпадают. Зависимости скорости счета импульсного канала №1 от уровней $U_{\text{выс}}$ и $U_{\text{дискр}}$ представлены на рис. 2.

После выполнения предварительных проверок подвески были установлены в подготовленные каналы и сняты дискриминационные характеристики (рис. 3) при

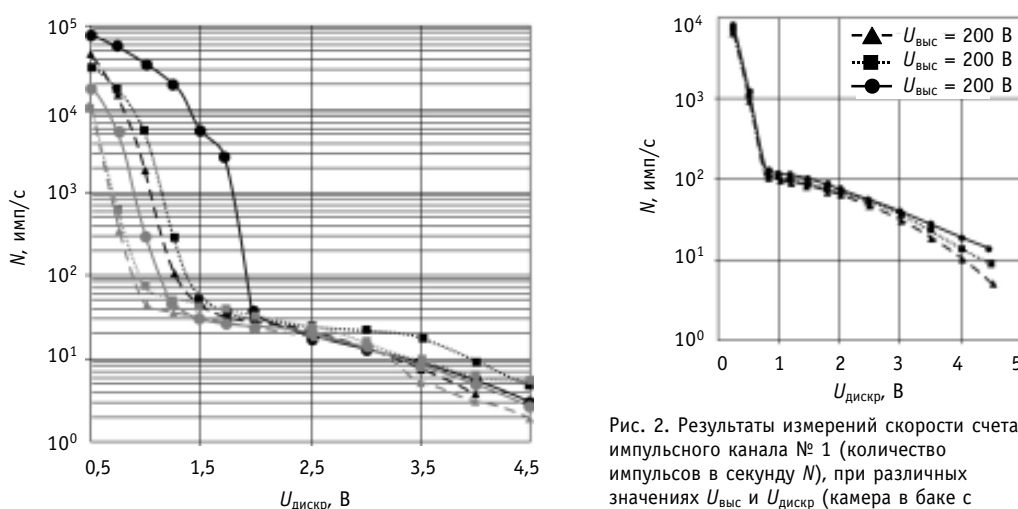


Рис. 3. Зависимость скорости счета импульсных каналов от уровня дискриминации

Рис. 2. Результаты измерений скорости счета импульсного канала № 1 (количество импульсов в секунду N), при различных значениях $U_{\text{выс}}$ и $U_{\text{дискр}}$ (камера в баке с плутоний-бериллиевым источником нейтронов, заполненном парафиновым замедлителем)

$U_{\text{выс}} = 300$ В для шести импульсных каналов (6 зависимостей). Из графика (рис. 3) видно, что все датчики, кроме датчика 4-го канала СКПР, дают приблизительно одинаковые показания при $U_{\text{дискр}} = 1.5$ В. При увеличении $U_{\text{дискр}}$ с 1.5 до 2.5 В чувствительность каналов (1, 2, 3, 5, 6) снизилась приблизительно в $1.5 \div 2$ раза. При этом максимальное различие скорости счета отдельных каналов составило около 50%, что объясняется как индивидуальными особенностями подвесок (различной чувствительностью каналов СКПР), так и неравномерностью распределения нейтронного потока в активной зоне реактора. По результатам выполненных измерений были определены рабочие характеристики импульсных каналов для последующих испытаний СКПР.

ОЦЕНКА БЫСТРОГО МОЩНОСТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОСТИ

В ноябре 2004 г. при остановке реактора на планово перегрузочный ремонт был проведен эксперимент по оценке быстрого мощностного коэффициента реактивности. Для этого к СКПР были подключены две штатные камеры КНК-57, используемые в системе автоматического регулятора.

Кнопками индивидуального сброса в активную зону было введено 4 стержня СУЗ. Графики изменения величины суммарного тока I от времени t , построенные по данным с аналогового выхода ИВК, регистрируемым на ленте самописца, (график 1) и по результатам, сохраненных в ПЭВМ (график 2), приведены на рис. 4. Графики изменения величины реактивности ρ от времени t , построенные по результатам расчета реактивности в блоке ИВК и регистрируемые на ленте самописца (график 1) и по результатам расчета на ПЭВМ по программе R1SKPR (график 2), приведены на рис. 5.

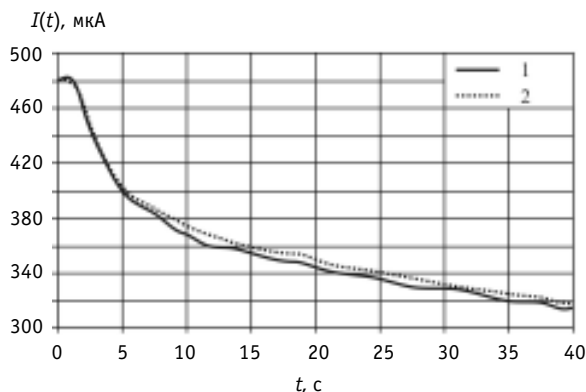


Рис. 4. Изменение суммарного тока камер во времени

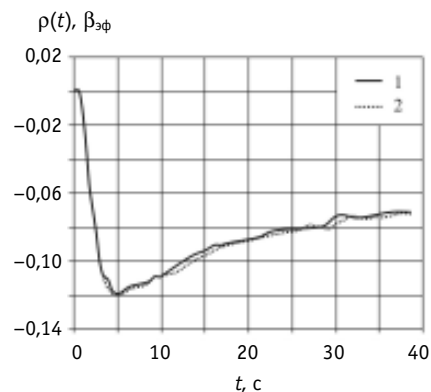


Рис. 5. Изменение реактивности во времени

В результате эксперимента установлено, что использование штатных рабочих камер КНК-57 в качестве токовых датчиков СКПР не вызвало технических и технологических затруднений. Сбои в работе и отказы оборудования СКПР не зафиксированы.

Быстрый мощностной коэффициент реактивности оценивался следующим образом.

В начальный период (в период времени от t_1 до t_2) после сброса стержней СУЗ зависимость реактивности от нейтронной мощности W можно представить уравнением:

$$\rho(W) = \rho_1 + \int_{W_1}^W \frac{\partial \rho}{\partial W} dW, \quad (1)$$

где ρ_1 – реактивность в момент времени t_1 от начала сброса стержней, в единицах $\beta_{\text{эф}}$; W_1 – нейтронная мощность в момент времени t_1 .

Поскольку ток ионизационных камер пропорционален нейтронной мощности, то

$$W = \frac{W_0}{I_0} \cdot I \cdot \frac{1}{W_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $W_{\text{ном}} = 100\%$ – номинальная мощность реактора; W_0 – мощность в % от $W_{\text{ном}}$ перед сбросом стержней (в момент времени t_0); I_0, I – ток ионизационных камер непосредственно перед и после сброса стержней соответственно.

Из результатов обработки данных, полученных после первого сброса стержней (рис. 4, 5), следует, что в период от $t_1 = 5$ с до $t_2 = 35$ с ($\Delta t = 30$ с) зависимость (1) с высокой достоверностью (0,98) аппроксимируется линейной функцией с постоянным значением производной $\frac{\partial \rho}{\partial W} = -0,0041\beta_{\text{эф}} / \%W_{\text{ном}}$, т.е. в указанном диапазоне времени с учетом соотношения (2)

$$\rho(W) \approx -0,127\beta_{\text{эф}} + \alpha_W(W - W_1), \quad (3)$$

где $\alpha_W = -0,0041\beta_{\text{эф}} / \%W_{\text{ном}}$; $W_1 = 65,6\%$ – нейтронная мощность реактора (% от $W_{\text{ном}}$) в момент времени t_1 .

Графическое представление последнего соотношения приведено на рис. 6, где также приведены экспериментальные значения исследуемой функции.

По сути, α_W есть быстрый мощностной коэффициент реактивности при изменении уровня нейтронной мощности реактора в указанном диапазоне значений и при температуре графита, равной температуре графита перед сбросом стержней в активную зону. В относительно короткий промежуток времени после сброса стержней коэффициент α_W определяется, в основном, эффектом Доплера на уране-238 и изменением температуры воды. При этом изменением реактивности, связанным с инерционным изменением температуры графита и «отравлением» топлива ксеноном, можно пренебречь.

Следует отметить, что оценка величины быстрого мощностного коэффициента реактивности согласуется с результатами, полученными ранее при использовании реактимитра ПИР-4 [2].

После выполнения всех регламентных работ по подготовке реактора к пуску начался второй этап реакторных испытаний СКПР. Задачами испытаний являлись:

- проверка работоспособности различных режимов работы СКПР в подкритическом и критическом состояниях реактора;
- проверка работоспособности внешнего программного обеспечения СКПР;
- экспериментальная оценка подкритичности реактора после планового перегруженного ремонта;
- определение границ функционирования как самой системы, так и внешнего программного обеспечения (по скорости счета, показаниям токовых каналов, глубине подкритичности реактора).

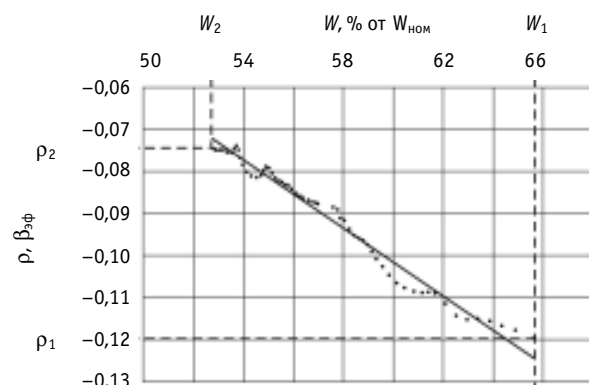


Рис. 6. Зависимость $\rho(W)$ в период от $t_1 = 5$ с до $t_2 = 35$ с ($\Delta t = 30$ с) при сбросе стержней СУЗ: эксперимент; — линейная аппроксимация

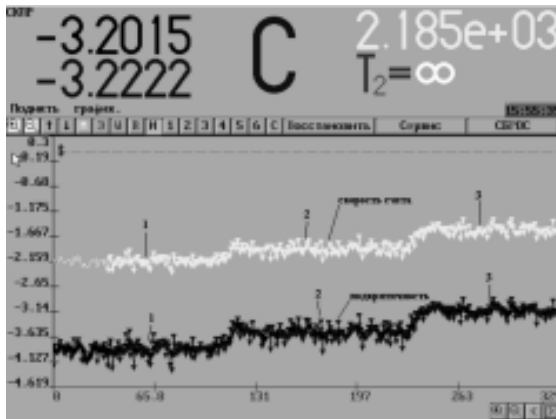


Рис. 7. Изменения скорости счета и подкритичности при извлечении групп стержней аварийной защиты, фиксируемые при помощи внешнего программного обеспечения

Для проверки различных режимов работы СКПР и внешнего программного обеспечения в подкритическом состоянии реактора проведена серия из 8 экспериментов. Для инициации динамического процесса в реакторе применялся метод сброса стержней. В активную зону вводились предварительно извлеченные стержни СУЗ. Количество стержней СУЗ, используемых для инициации динамических процессов, варьировалось от 21 до 73.

Графическая иллюстрация изменения скорости счета и подкритичности реактора при извлечении

стержней аварийной защиты, которые извлекаются, в первую очередь, согласно требованиям Технологического регламента, представлена на рис. 7.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КИНЕТИКИ ХОЛОДНОГО РАЗОТРАВЛЕННОГО РЕАКТОРА ПРИ ЕГО «ЗАГЛУШЕНИИ»

В результате проведения экспериментов по сбросу стержней в подкритическом состоянии реактора были оценены параметры кинетики реактора в процессе его перевода в глубоко подкритическое состояние. Отличия значений этих параметров, рассчитанных по результатам измерений различных импульсных каналов, достигали 100%, что объясняется существенным влиянием пространственных эффектов на фоне низкого уровня плотности нейтронного потока. Низкий уровень плотности нейтронного потока в подкритическом состоянии создает проблему проведения измерений параметров кинетики ПУГР. При этом значительно возрастают требования к помехозащищенности импульсных каналов, чтобы «поймать» изменения на фоне низкой скорости счета. Поэтому плотность нейтронного потока напрямую связана с погрешностью определения параметров кинетики реактора.

С целью минимизации влияния пространственных эффектов и повышения точности определения параметров кинетики реактора при его «заглушении» была предложена и реализована следующая схема проведения эксперимента:

- 1) полностью извлекаются стержни аварийной защиты;
- 2) оставшиеся в активной зоне стержни СУЗ извлекаются частично (до одной высотной отметки);
- 3) перевод реактора в глубоко подкритическое состояние обеспечивается одновременным вводом всех извлеченных стержней аварийной защиты и частично извлеченных стержней СУЗ.

В результате параметры кинетики реактора при его «заглушении» (эффективная интенсивность источника нейтронов и подкритичность), рассчитанные по результатам измерений различных импульсных каналов, совпали в пределах статистической ошибки измерений.

Для определения области перекрытия диапазона показаний импульсных и токовых каналов системы, проверка режима $1/N$, а также работоспособности СКПР в токовом режиме с камерами КНК-56 было проведено 10 экспериментов, при которых реактор выводился в критическое состояние.

В процессе извлечения стержней фиксировались суммарный счет шести импульсных каналов и показания токового канала. До значения скорости счета $N \sim 6 \cdot 10^4$ имп/с изменений (роста) нейтронного потока в активной зоне по показаниям токового канала не было зафиксировано. Увеличение показаний токового канала (относительно скомпенсированной величины $i_{\text{ком}} \sim 10^{-9}$ А) начинается при суммарной скорости счета $N > 10^5$ имп/с (при $N \approx 2 \cdot 10^5$ имп/с, $i \approx 1,15 \cdot 10^{-9}$ А), но при этом происходит перегрузка (просчеты) импульсных каналов. Таким образом, перекрытие диапазонов импульсных и токового каналов достигается при суммарной скорости счета в интервале $1 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^6$ имп/с, однако при этом не сохраняется пропорциональность между уровнем нейтронного потока и показаниями импульсных каналов. Для увеличения перекрытия диапазонов было рекомендовано уменьшить ток компенсации камер на порядок. Эффект достигался в результате ревизии токовых каналов – поиска элементов с неудовлетворительными параметрами. Данную проблему, как правило, удастся решить заменой ионизационной камеры на новую.

Проверка работы СКПР в режиме «обратного счета» $1/N$ показала, что система обеспечивает прогнозирование достижения критического состояния реактора при изменении состава активной зоны, а также измерение и контроль уровня подкритичности.

Проверка работы «Дельта-режим» показала, что этот режим работоспособен и может использоваться при проведении экспериментов на реакторе. В процессе проверки также были сделаны оценки глубины подкритичности реактора в зависимости от количества стержней СУЗ в активной зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем краткий итог проделанной работе.

- Испытания системы СКПР и внешнего программного обеспечения показали, что все режимы работы СКПР и внешнего программного обеспечения функционируют.
- Даны методические рекомендации по применению СКПР и проведению экспериментов по определению реактивных эффектов.
- Система СКПР готова к вводу в опытную эксплуатацию.

Литература

1. Система контроля подкритичности реактора (СКПР): Руководство по эксплуатации, КАЛБ.412161.001 РЭ, инв. №90-1658 от 03.08.2004.
2. Прибор для измерения реактивности ПИР-4: Технические характеристики и инструкция по эксплуатации (1-я редакция). – М., 1987.

Поступила в редакцию 10.04.2006

УДК 621.039.53

Calculated Analysis of WWER Type Fuel Cladding \A.V. Korzunin, S.A. Subbotin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 2 illustrations, 3 tables. – References – 4 titles.

Change of specific radioactivity of WWER reactor type fuel cladding was estimated. Analysis of the contribution of nuclides was performed. This analysis includes consideration them as activation products of the nuclides of the initial chemical elements. Substantiation of re-use of this cladding(alloy) as MOX-fuel cladding was proposed.

УДК 539.125.523.348

Modeling of the Multiparticle Preequilibrium Nucleon Emission \J.M. Martirosyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 6 pages, 3 illustrations. – References – 4 titles.

New exciton model of preequilibrium decay (MCP), that allows to compute the spectra of multiparticle emission during the establishment of statistical equilibrium, is proposed. Testing of the offered model in comparison with results of calculations on the basis of classical exciton model for the one preequilibrium nucleons – neutron and/or proton is executed. Reliability of multiparticle preequilibrium emission spectra is qualitatively estimated.

УДК 539.125

Calculation of Multiparticle Preequilibrium Emission Spectra \J.M. Martirosyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 6 pages, 4 illustrations. – References – 17 titles.

Systematic comparison of the results of calculations on the basis of exciton model of multiparticle preequilibrium decay with the experimental spectra of nucleons from (p, xn), (p, xp), (n, xn) and (n, xp) reactions in a wide projectile energy region from 10 up to 60 MeV for targets from ²⁷Al up to ²⁰⁹Bi was carried out.

УДК 621.039.52

Comparison of Ball-Poured Core with Pin-Holder Core of the Sodium-Cooled Fast Reactor \G.B. Usynin, A.A. Kravchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 9 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References – 7 titles.

The ball-poured located in a tank and supported by hydrodynamic force of the coolant at a level of the top abutment lattice is considered. Simplicity of the design and small size of the fuel element allow to reprocess it immediately after extraction from the core at the nuclear plant size. Layer thickness, fuel composition and the design of the fuel element are defined by the following factors: maintenance of the criticality, required level of power, necessity of breeding. The ball-poured core with traditional pin-holder core are compared.

УДК 621.039.56

The System of Monitoring of the Under-Critical Condition of the Industrial Uranium-Graphite Reactor: the Results of Tests \V.V. Shidlovskiy, P.M. Gavrilov, A.A. Thiganov, A.G. Kohomskij, V.B. Chukanov, M.V. Antonenko, I.V. Shamanin, V.N. Nesterov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 7 pages, 7 illustrations. – References – 2 titles.

The description of the system of monitoring of the under-critical condition of the Industrial Uranium-Graphite Reactor (PUGR) and modes of its operation are listed. The technique of check of pulse channels and definitions of their operational factors are stated. The fast power factor of reactivity was estimated. As a result of carrying out the experiments on dump of rods in under-critical condition of reactor parameters of translation of a reactor into under-critical condition have been estimated. The plan of carrying out the minimization of influence of spatial effects and increase of accuracy of definition of parameters of this fast process were offered and realized.