

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ ДВУМЯ ЭФФЕКТИВНЫМИ ОСКОЛКАМИ. ВЕРИФИКАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ

Ю.В. Волков, О.Б. Дугинов

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Проведены верификационные расчеты для модели межизотопных переходов с учетом нуклидов, наиболее значимых для баланса нейтронов, и двух эффективных осколков деления. Продемонстрирована возможность применения данной модели для тепловых и быстрых реакторов.

В качестве тестовых вариантов рассматривалось облучение тяжелого нуклида в тепловом спектре, соответствующем реакторам ВВЭР-1000 и РБМК-1000, а также в быстром спектре БН-600. Сравнивались результаты расчета вклада в нейтронный баланс осколков деления для модели межнауклидных переходов с учетом максимально возможного числа нуклидов (детальный расчет) и модели с наиболее значимыми нуклидами и двумя эффективными осколками. Расчет проводился в одnogрупповом приближении. Поскольку для энергетических реакторов основным требованием является поддержание в течение длительного периода времени постоянного энерговыделения, то мощность была принятой постоянной. Учитывалось деление только одного делящегося нуклида (в данном случае ^{235}U). Отбор нуклидов, наиболее значимых для баланса нейтронов, проводился в соответствии с методикой, описанной в [1-3].

ЭФФЕКТИВНЫЕ ОСКОЛКИ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ

Вклад в баланс нейтронов в топливе реактора ВВЭР-1000 двух эффективных осколков и нуклидов, их образующих, представлен на рис. 1. Характеристики всех осколков деления для модели межнауклидных переходов с учетом максимально возможного количества нуклидов и модели с эффективными осколками (ЭО) сравниваются на рис. 2. Расчет проводился для различных значений потока нейтронов, характерных для реакторов этого типа [4]. В начале облучения активная зона содержала необлученное топливо. Отбор наиболее значимых нуклидов проводился по их эффективности для нейтронного баланса за весь период непрерывного облучения топлива, составивший ≈ 3 года. Отрицательные значения по оси ординат показывают, что происходит поглощение нейтронов.

Погрешности аппроксимации процессов взаимодействия с нейтронами для отобранных наиболее значимых нуклидов и эффективных осколков приведены в табл. 1.

Точное решение является суперпозицией десятков экспонент с широко варьирующимися показателями. Поскольку построенная модель межнауклидных переходов с

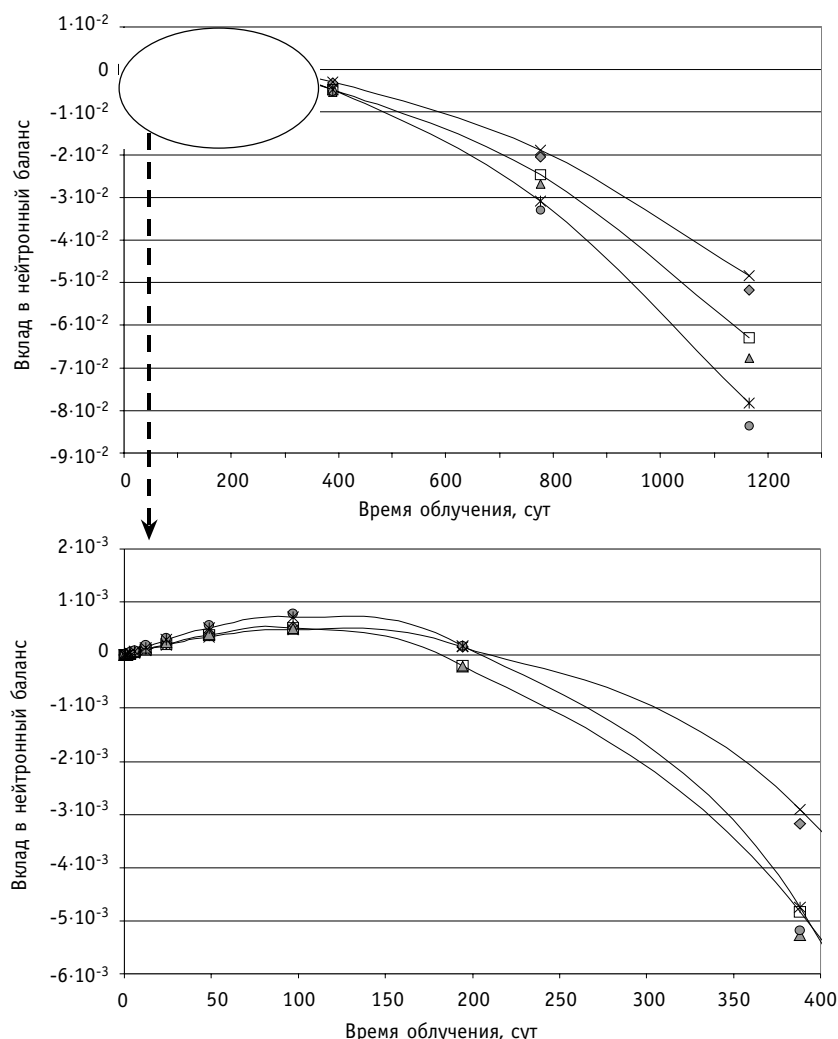


Рис. 1. Вклад в нейтронный баланс в топливе реактора ВВЭР-1000 двух эффективных осколков и нуклидов, их образующих: \blacklozenge нуклиды, образующие ЭО ($\Phi=3,0 \cdot 10^{14}$); \times эффективные осколки ($\Phi=3,0 \cdot 10^{14}$); \blacktriangle нуклиды, образующие ЭО ($\Phi=3,5 \cdot 10^{14}$); \blacksquare эффективные осколки ($\Phi=3,5 \cdot 10^{14}$); \bullet нуклиды, образующие ЭО ($\Phi=4,0 \cdot 10^{14}$); \blackstar эффективные осколки ($\Phi=4,0 \cdot 10^{14}$)

эффективными осколками не учитывает цепочки образования тех или иных нуклидов (в том числе и наиболее значимых для баланса), то невозможно аппроксимировать процессы взаимодействия нуклидов с нейтронами одинаково хорошо на всем рассматриваемом интервале времени, используя комбинацию всего нескольких экспонент. Если полагать, что переходные процессы в топливе завершаются достаточно быстро (50-100 сут), то можно считать, что разработанная модель аппроксимирует взаимодействие с нейтронами отдельных нуклидов и их суммы с приемлемой для поисковых исследований точностью (7-17%).

Следует отметить, что разработанный метод определения параметров эффективных осколков позволяет учесть и тот факт, что в течение первых 200 сут облучения суммарный вклад в нейтронный баланс нуклидов, формирующих эффективные осколки, оказывается положительным. Это обусловлено тем, что в начале периода облучения, когда концентрация продуктов деления в топливе еще низка, положительный вклад в нейтронный баланс сравнительно короткоживущих ядер-предшественников запаздывающих нейтронов довольно велик. За 200 сут облучения короткожи-

Таблица 1

Относительные погрешности аппроксимации числа взаимодействий с нейтронами (%)

Время облучения, сут	3	12	49	97	194	388	777	1165
⁹⁴ Rb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
⁹⁹ Tc	5.5	13.2	6.5	3.6	2.1	1.4	1.0	0.9
¹⁰³ Rh	2.7	1.3	3.1	3.2	4.5	4.7	5.7	6.1
¹³⁷ I	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
¹³¹ Xe	4.2	3.8	4.6	3.5	2.7	2.3	2.0	1.9
¹³⁵ Xe	1.0	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
¹³³ Cs	19.3	17.0	13.7	10.8	7.2	4.2	2.8	2.4
¹⁴³ Nd	42.5	3.6	16.6	11.3	9.8	7.5	4.8	3.9
¹⁴⁷ Pm	0.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8
¹⁴⁹ Sm	1.5	11.2	15.3	12.4	9.2	5.4	5.3	0.5
¹⁵¹ Sm	14.5	19.7	15.6	11.8	9.7	7.4	5.7	0.3
Эффективные осколки	56.0	18.7	11.2	7.3	1.7	9.0	9.6	9.9
Все нуклиды	11.4	5.0	6.1	6.9	5.8	2.3	1.7	3.8

вущие нуклиды достигают состояния насыщения концентрации, а остальные поглощающие осколки успевают накопиться в достаточных количествах, чтобы начать вносить в баланс преимущественно отрицательный вклад.

Параметры эффективных осколков приведены в табл. 2. Расчет показал, что при изменении потока нейтронов список наиболее значимых нуклидов остается неизменным, и параметры эффективных осколков меняются незначительно. Поэтому для практических расчетов можно использовать усредненные значения параметров, выделенные жирным шрифтом.

Таким образом, в созданной модели для аппроксимации суммарного вклада осколков в нейтронный баланс (разности между числом рожденных и поглощенных осколком нейтронов за время t) в тепловом реакторе применяются несколько спе-

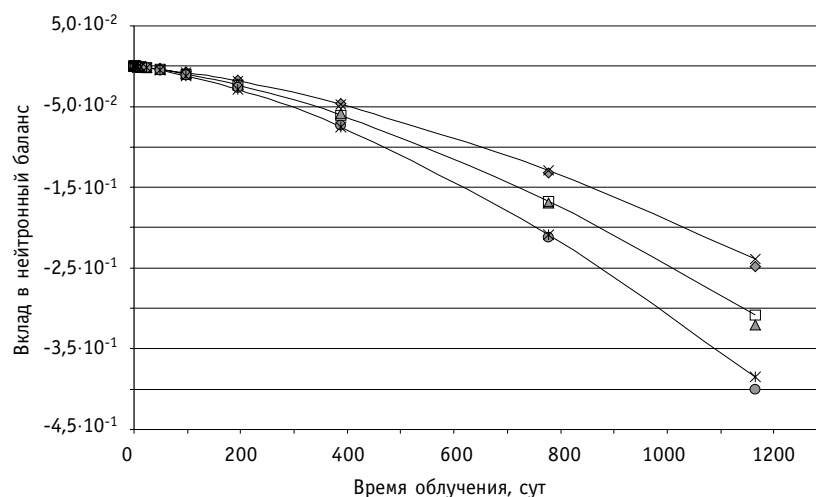


Рис. 2. Вклад всех осколков деления в нейтронный баланс в топливе реактора ВВЭР-1000 для моделей междунуклидных переходов с учетом максимально возможного количества нуклидов и с двумя эффективными осколками: \diamond все нуклиды ($\Phi=3,0 \cdot 10^{14}$); \times модель с ЭО ($\Phi=3,0 \cdot 10^{14}$); \triangle все нуклиды ($\Phi=3,5 \cdot 10^{14}$); \square модель с ЭО ($\Phi=3,5 \cdot 10^{14}$); \bullet все нуклиды ($\Phi=4,0 \cdot 10^{14}$); \star модель с ЭО ($\Phi=4,0 \cdot 10^{14}$)

Таблица 2

Параметры эффективных осколков для реакторов ВВЭР-1000 и РБМК-1000

	ВВЭР-1000				РБМК-1000			
$\Phi, 10^{14}/\text{см}^2\text{с}$	3	3.5	4		2	2.5	3	
$\lambda_{\text{эо1}}, 10^{-5}/\text{с}$	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
$\sigma_{\text{эо2}}(n, \gamma), \text{барн}$	1.7	1.5	1.5	1.57	1.78	1.77	1.75	1.77
$g_{\text{эо1}}, \%$	0.75	0.73	0.77	0.75	0.72	0.78	0.75	0.75
$g_{\text{эо2}}, \%$	160	159	162	160.3	159	160	160	159.7
$Z_{\text{эо1}}$	22	22	23	22	21	22	22	22
$A_{\text{эо1}}$	56	56	59	57	55	56	56	56
$Z_{\text{эо2}}$	65	65	65	65	65	65	65	65
$A_{\text{эо2}}$	164	164	164	164	164	164	164	164

циально отобранных наиболее значимых нуклидов, один эффективный осколок-предшественник запаздывающих нейтронов с периодом полураспада $T_{1/2} \approx 14.5$ ч и второй слабопоглощающий осколок с $\sigma_{(n,\gamma)} = 1.57$ барн для ВВЭР-1000 и $\sigma_{(n,\gamma)} = 1.77$ барн для РБМК-1000.

Характеристики осколков деления для реактора РБМК-1000 рассчитывались аналогично ВВЭР-1000. Вклад в баланс нейтронов всех осколков деления и эффективных осколков для реакторов ВВЭР и РБМК при одинаковом потоке нейтронов представлен на рис. 3, из которого следует, что в сумме осколки деления в реакторе РБМК вносят несколько больший вклад в нейтронный баланс, чем в реакторе ВВЭР. Это обусловлено более мягким спектром нейтронов в реакторах этого типа, что приводит к увеличению одnogрупповых сечений деления и поглощения нейтронов. При прочих равных условиях облучения сечение деления тяжелого нуклида будет определять количество осколков деления в реакторе. Чем выше концентрация осколков, тем больше нейтронов ими рождается или поглощается. Таким образом, смягчение

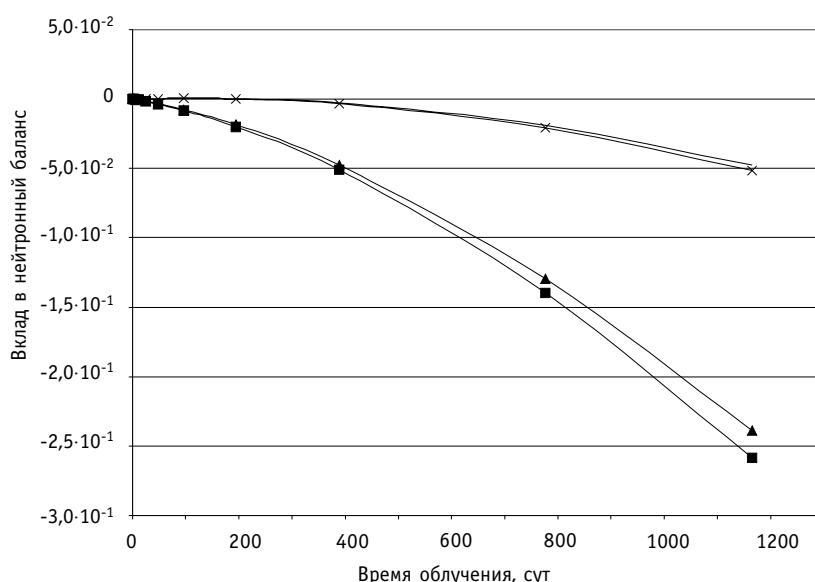


Рис. 3. Вклад в нейтронный баланс всех осколков деления и эффективных осколков для топлива реакторов ВВЭР-1000 и РБМК-1000: — 30 ВВЭР-1000; —×— 30 РБМК-1000; —▲— все осколки ВВЭР-1000; —■— все осколки РБМК-1000

спектра нейтронов приводит к росту числа поглощений нейтронов наиболее значимыми осколками деления в тепловом реакторе.

Выясним, какие осколки деления вносят в нейтронный баланс теплового реактора наибольший вклад. Относительные эффективности осколков за кампанию топлива ≈ 3 года приведены в табл. 3. Видно, что и для реактора ВВЭР, и для РБМК наиболее важными будут одни и те же нуклиды. По своему вкладу в нейтронный баланс эффективные осколки занимают вторую позицию и их эффективность сопоставима с эффективностью ^{135}Xe .

ЭФФЕКТИВНЫЕ ОСКОЛКИ ДЛЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

При исследовании характеристик осколков деления для реактора БН-600 кампания топлива принималась равной 1 году. Параметры эффективных осколков приведены в табл. 4; в табл. 5 – относительные эффективности осколков за кампанию топлива ≈ 1 год (поток $3 \cdot 10^{15}$ $1/\text{см}^2\text{с}$). Вклад осколков деления в нейтронный баланс показан на рис. 4. Приведены расчетные данные, полученные с применением модели эффективного осколка. Результаты, полученные при учете максимально возможного числа осколков деления, отличаются от них незначительно и поэтому не приводятся. Из графиков видно, что суммарный вклад в нейтронный баланс всех осколков деления в начале облучения положительный и возрастает в течение первых 100-150 сут. Такая зависимость обусловлена тем, что в начале короткоживущие предшественники запаздывающих нейтронов дают положительный вклад в нейтронный баланс, а осколки, обладающие очень большими сечениями поглощения быстрых нейтронов, отсутствуют. Необходимо время для накопления поглощающих осколков в количествах, достаточных для внесения заметного отрицательного вклада в баланс. С увеличением интегрального потока нейтронов возрастает отрицательный вклад осколков в баланс. Примечательно, что при значении потока $2 \cdot 10^{15}$ $1/\text{см}^2\text{с}$ осколки деления вносят положительный вклад в баланс нейтронов в топливе на протяжении всей кампании топлива. Иными словами, при таких параметрах облучения поглощающие осколки не успевают поглотить нейтронов больше, чем было испущено предшественниками запаздывающих нейтронов.

Не следует понимать данный результат следующим образом: поскольку осколки дают положительный вклад, то реактивность реактора растет. Изначально, когда реактор только выведен на номинальную мощность и критичен, в реакторе есть процессы, дающие как положительный вклад в баланс нейтронов (или реактивность), так и отрицательный. Сумма всех эффектов равна нулю. У осколков в начале работы быстрого реактора, по описанным выше причинам, преобладает положительная составляющая. С течением времени этот положительный вклад в баланс нейтронов уменьшается (что естественно, т.к. накапливаются

Таблица 3

Нуклид	Эффективность	
	ВВЭР	РБМК
^{135}Xe	0.304	0.300
^{149}Sm	0.088	0.088
^{143}Nd	0.081	0.080
^{147}Pm	0.061	0.061
^{103}Rh	0.050	0.050
^{133}Cs	0.044	0.044
^{131}Xe	0.036	0.037
^{151}Sm	0.034	0.033
^{99}Tc	0.032	0.032
^{94}Rb	0.011	0.011
^{137}I	0.010	0.010
Сумма	0.750	0.746
$\Sigma\text{O1}+\Sigma\text{O2}$	0.250	0.254

Таблица 4

$\Phi, 10^{15}/\text{см}^2\text{с}$	2	3	4	5	
$\lambda_{\Sigma\text{O1}}, 10^{-5}/\text{с}$	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33
$\sigma_{\Sigma\text{O2}}(n, \gamma), \text{барн}$	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09
$g_{\Sigma\text{O1}}, \%$	0.25	0.2	0.19	0.22	0.22
$g_{\Sigma\text{O2}}, \%$	149	141	137	144	143
$Z_{\Sigma\text{O1}}$	17	16	16	18	17
$A_{\Sigma\text{O1}}$	44	42	42	45	43
$Z_{\Sigma\text{O2}}$	65	65	65	65	65
$A_{\Sigma\text{O2}}$	164	164	164	164	164

Таблица 5

Нуклид	Эффективность	Нуклид	Эффективность
^{94}Rb	0.09	^{95}Rb	0.027
^{137}I	0.082	^{97}Y	0.026
^{147}Pm	0.051	^{140}I	0.024
^{89}Br	0.046	^{87}Br	0.023
^{88}Br	0.041	^{138}I	0.018
^{99}Y	0.039	^{103}Rh	0.015
^{139}I	0.038	^{143}Nd	0.015
^{133}Cs	0.033	^{149}Sm	0.015
^{90}Br	0.033	^{145}Nd	0.014
^{99}Tc	0.028	^{97}Mo	0.012
^{93}Rb	0.028		
^{101}Ru	0.027	сумма	0.725

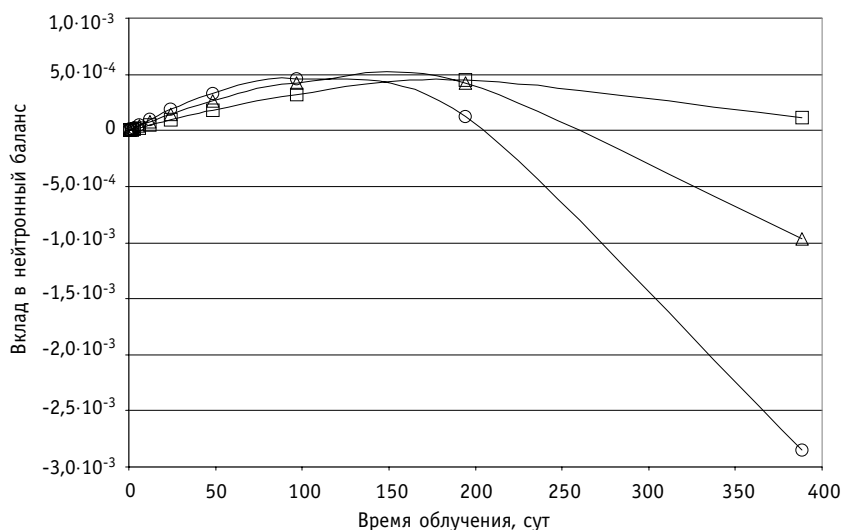


Рис. 4. Вклад осколков деления в нейтронный баланс в топливе быстрого реактора: —□— все осколки БН-600 ($\Phi=2,0 \cdot 10^{15}$); —△— все осколки БН-600 ($\Phi=3,0 \cdot 10^{15}$); —○— все осколки БН-600 ($\Phi=4,0 \cdot 10^{15}$)

ся поглощающие нуклиды), но может на протяжении всей кампании оставаться положительным (как в приведенном примере).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты позволяют сделать вывод о том, что разработанная модель эффективного осколка на основе теории марковских цепей [2,3,5] с доходами позволяет корректно моделировать процессы взаимодействия осколков деления с нейтронами для любого типа реакторов.

Литература

1. Волков Ю.В., Дугинов О.Б., Клинов Д.А., Колесов В.В. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка и верификация марковской модели эффективного осколка деления» Марковская модель эффективного осколка деления (заключительный). № гос. регистрации 01200013135, Инв. № 02200100388, 2000.
2. Волков Ю.В., Дугинов О.Б. Марковская цепь с доходами для выбора наиболее значимых осколков деления. Общая модель//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 2. – С. 90-97.
3. Волков Ю.В., Дугинов О.Б. Представление осколков деления двумя эффективными осколками. Теоретическая модель//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – № 2. – С. 31-37.
4. Колобашкин В.М., Рубцов П.М. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Ховард Р. Динамическое программирование и марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1964.

Поступила в редакцию 25.11.2003

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.56

On Expediency of Change of Requirements RNS RI APP to Sodium Density a Component of Reactivity of a Feedback In Fast Reactors \ A.V. Danilytshev, D.G. Elistratov, V.I. Matveev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 16 pages, 5 tables, 10 illustrations. – References, 11 titles.

Most generalizing requirement GSR-88/89 to all effects of reactivity is added in RNS RI APP with the additional limiting requirement of negativity sodium density reactivity coefficient. At the analysis of the major accidents obviously expressed communication of their consequences with the given additional requirement is not found out. It is shown, that at observance by the designer of basic requirements OPB-88/ in a combination to correct selection of interrelation of all others a component of reactivity and Thermal-physical properties of materials of an active zone the additional requirement of negativity sodium density reactivity may be considered as the account excessive.

УДК 621.039.56

On Inverse Kinetics Method for Reactivity Determination \ B.D. Abramov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 13 pages, 1 illustration. – References, 29 titles.

In the paper some mathematical problems of the reactors neutron kinetic simulation and reactivity determination are considered.

УДК 621.039.51:519.85

Direct Simulation of Thermal Neutron Scattering by Monte Carlo Method Using Free Gas Model and Short Collision Time Approximation \ P.A. Androsenko, M.R. Malkov, N.A. Soloviev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 11 pages, 6 illustrations. – References, 12 titles.

Direct simulation algorithms of thermal neutron scattering using free gas scattering law and short collision time approximation realized in BRAND code collection are described. The comparison of BRAND algorithms with MCNP algorithms and modified MCU algorithms is given. An example of calculation task on neutron penetration through O in H₂O barrier is given. The agreement between BRAND results and MCU results is rather good but there is disagreement between BRAND results and MCNP results. The reason for this disagreement is likely to be caused in the fact that BRAND carry out the calculations using the algorithms that recommended by ENDF-6 format whereas the algorithms of MCNP is corrected to better coincide with benchmark experiments results.

УДК 621.039.524: 621.039.526

The Method for Description of Fission Fragments by Two Pseudo-Fission Fragments. Part II – Testing. \ Yu. V. Volkov, O.B. Duginov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 5 tables, 4 illustrations. – References, 5 titles.

The model for description of isotope transitions taking into account the most significant for the neutron balance isotopes and two pseudo-fission fragments has been tested. This model was applied for thermal and fast reactors.

УДК 621.039.524.4: 621.039.519.2

Integral In-Pile Experiments with a VVER-Type Fuel Assembly «SB-LOCA»-Test. A.V. Goryachev, I.V. Kiseleva, V.M. Makhin, V.N. Shulimov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.

Results of 19-rod and 7-rod VVER-type fuel assembly tests «SB LOCA» in research reactor MIR are presented. The influence of regime parameters LOCA and design peculiarities of fuel assembly on fuel behaviour was investigated.