

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЧАСТИЧНОЙ ПРЕДРАВНОВЕСНОЙ ЭМИССИИ НУКЛОНОВ

**Ю.М. Мартиросян**

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



В рамках классической экситонной модели предравновесного распада с помощью моделирования по методу Монте-Карло реализована возможность расчета спектров эмиссии нескольких последовательно испущенных частиц и энергетических распределений остаточных ядер. Выполнено сравнение результатов предложенной модели с данными вычислений по обычной экситонной модели для одной предравновесной частицы – нейтрона и/или протона. Качественно оценена достоверность спектров многочастичной предравновесной эмиссии.

## ВВЕДЕНИЕ

Для вычисления характеристик ядерной реакции с нуклонами промежуточных (20–200 МэВ) и высоких (200–1000 МэВ) энергий используют метод, в котором механизм ядерной реакции включает в себя три стадии. Первая стадия – внутриядерный каскад, далее следует предравновесная стадия реакции и, наконец, на последней стадии происходит распад равновесного ядра (статистическая модель), включая испарение частиц, эмиссию гамма-квантов, деление и др.

Роль разных стадий реакции сильно зависит от энергии налетающих частиц и масс ядер-мишеней. При низких энергиях основной вклад в сечение реакции вносит равновесная стадия, т.к. налетающий нуклон не может инициировать предравновесные процессы и, тем более, вызвать внутриядерный каскад. По мере роста энергии вклад предравновесных процессов увеличивается и уже при энергиях 15–20 МэВ их доля в сечении реакции составляет десятки процентов. При этих энергиях вклад каскадных процессов все еще незначителен и составляет несколько процентов. В полной мере все три стадии реакции реализуются при энергиях, больших 50–70 МэВ.

Одной из трудностей представленного выше подхода является корректный учет испускания нуклонов в процессе установления статистического равновесия в составной системе. Ранее [1] для этой цели использовались две модели: экситонная (ЭМ) [2] и гибридная с моделированием по методу Монте-Карло (HMS), предложенная в работе [3].

Практическим недостатком классической экситонной модели является возможность расчета испускания только одной предравновесной частицы. В то же время, как показывает анализ результатов расчетов каскадной стадии реакции, энер-

гии возбуждения остаточных ядер достаточны для последовательного испускания нескольких предравновесных частиц.

За многие годы существования экситонной модели предравновесного распада известны многочисленные попытки ее улучшения, критики и даже отказа от ее использования.

Для дальнейшего совершенствования модели перехода составной системы к статистическому равновесию мы ввели в экситонную модель возможность расчета многочастичной последовательной эмиссии частиц.

В статье описан метод расчета спектров эмиссии нуклонов и выходов остаточных ядер в процессе перехода составной системы к равновесию. Метод основан на статистическом моделировании (метод Монте-Карло) испускания нуклонов в процессе решения системы мастер-уравнений экситонной модели предравновесного распада [2].

### МНОГОЧАСТИЧНАЯ ЭМИССИЯ

Идея многочастичной предравновесной эмиссии в рамках экситонной модели высказана достаточно давно [4], но, насколько известно, до сих пор реализована не была. Ее смысл понятен из предыдущего рассмотрения – после эмиссии первого нуклона повторять расчет перехода новой составной системы к равновесию и т.д.

В предлагаемой схеме расчета (модель МСР) сечений реакций с нуклонами промежуточных и высоких энергий на предравновесной стадии, которая начинается с различных начальных возбуждений и конфигураций, остаточные ядра должны перейти к равновесию, испуская при этом нуклоны.

1. На первой стадии расчетов по начальной энергии возбуждения и начальной конфигурации  $ph$  квазичастиц первого ядра определяется список ядер, которые могут образовываться в результате эмиссии нуклонов, и их максимальные энергии возбуждения  $E_{\max}$ . Пример такого списка, в который включены ядра с  $E_{\max} > 0$ , для реакции  $^{90}\text{Zr}(p, xn)$  при  $E_p = 20$  МэВ приведен в табл. 1. Для этой реакции при сравнительно низкой энергии налетающего протона в результате последовательной эмиссии нуклонов может быть заселено до семи остаточных ядер и последовательно испущено три нуклона.

Таблица 1

**Список остаточных ядер реакции  $^{90}\text{Zr}(p, xn)$  при  $E_p=20$  МэВ  
( $K$  – количество испущенных нуклонов,  $E_{\max}$  – максимальная энергия ядра,  $B$  – энергия связи нуклона в данном ядре)**

№	$K_p$	$K_n$	$Z$	$A$	$E_{\max}$ МэВ	$B_{nr}$ МэВ	$B_p$ МэВ
1	0	0	41	91	25.16	12.05	5.16
2	0	1	41	90	13.11	10.15	5.08
3	0	2	41	89	2.96	12.71	4.24
4	1	0	40	90	20.00	11.97	8.36
5	1	1	40	89	8.03	9.31	7.86
6	2	0	39	89	11.64	11.47	7.07
7	2	1	39	88	0.17	9.36	6.71
8	3	0	38	88	4.57	11.11	10.62

2. На второй стадии расчетов для всех возможных ядер и их энергий возбуждения от 0 до  $E_{\max}$  вычисляются вероятности эмиссии нуклонов  $W(n, E, \varepsilon)$  и вероятности квазичастичных переходов  $\lambda(n, E)$ . Шкала энергий возбуждения делится на некоторое количество равных отрезков с шагом  $\Delta E$ , одинаковым для всех ядер. Списки частично-дырочных конфигураций формируются так, чтобы число частиц в первой конфигурации отличалось от предыдущего ядра на число испущенных нуклонов. Данная стадия выведена за пределы процесса статистических испытаний с целью экономии времени счета. Дальнейшие стадии выполняются заданное число раз (историй).

3. Решается система мастер-уравнений. Производится статистический розыгрыш событий «эмиссия нуклона – квазичастичный переход» по соотношению их вероятностей, которые вычисляются как

$$P_1 = \frac{\lambda_+(n, E) + \lambda_-(n, E) + \lambda_0(n, E)}{\lambda_+(n, E) + \lambda_-(n, E) + \lambda_0(n, E) + \sum_v L_v(n, E)} \quad (1)$$

– вероятность квазичастичного перехода;

$$P_2 = \frac{L_n(n, E)}{\lambda_+(n, E) + \lambda_-(n, E) + \lambda_0(n, E) + \sum_v L_v(n, E)} \quad (2)$$

– вероятность эмиссии нейтрона.

Случайное число  $x \in (0; 1)$  используется для определения типа процесса.

Если  $x < P_1$ , происходит квазичастичный переход; если  $P_1 < x < P_1 + P_2$ , то происходит эмиссия нейтрона; в третьем случае, если  $x > P_1 + P_2$ , происходит эмиссия протона. На данном этапе исследований вылет более сложных частиц не предусмотрен. После квазичастичного перехода продолжается решение системы мастер-уравнений – составная система продолжает движение к равновесию.

4. После эмиссии нуклона определяется его энергия путем решения уравнения

$$x = \int_0^\varepsilon W(n, E, \varepsilon) d\varepsilon, \quad (3)$$

где  $x$  – случайное число,  $\varepsilon$  – энергия испущенного нуклона.

Производится накопление спектра с весом заселенности данного квазичастичного состояния  $P(n, t)$  в данный момент времени.

Вылет нуклона приводит к уменьшению энергии возбуждения составной системы на величину  $(\varepsilon + B_v)$ , к уменьшению величин  $Z, A$  на  $Z_v$  и  $A_v$ , а также к уменьшению числа квазичастиц на единицу. Полученные значения задаются как начальные величины для следующего расчета. Далее осуществляется переход на стадию 3, т.е. решается система мастер-уравнений для новых начальных условий.

5. Данная история заканчивается, если достигнуто состояние равновесия или энергия остаточного ядра недостаточна для эмиссии нуклонов. Производится накопление заселенности ядер при фиксированной энергии возбуждения.

Таким образом, при достаточном количестве историй получают спектры предравновесных частиц и заселенности остаточных ядер, находящихся в равновесном состоянии.

## ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА

Первой стадией тестирования предложенной модели является сравнение ее результатов с данными вычислений по обычной экситонной модели для одной предравновесной частицы – нейтрона и/или протона. Целью этой стадии является

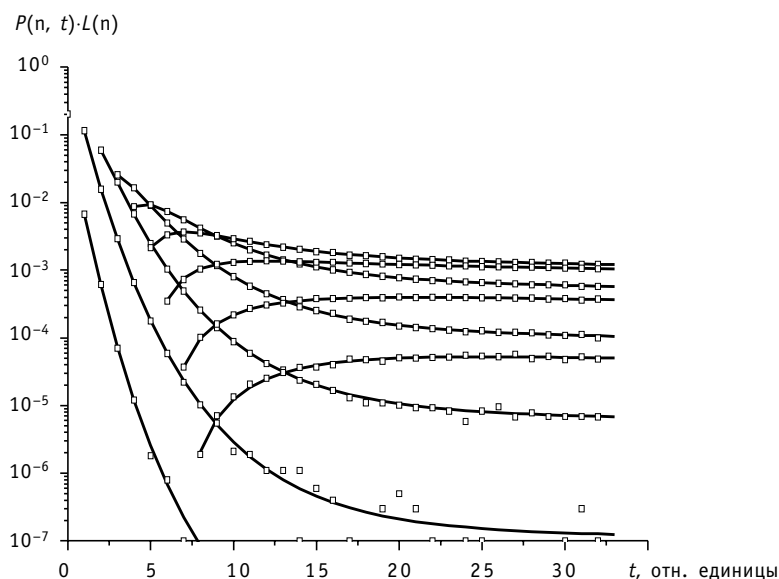


Рис. 1. Произведение заселенности квазичастичных состояний на вероятности эмиссии нуклона из различных состояний уравнивающейся системы в зависимости от времени: линиями показаны результаты расчетов по экситонной модели, символами – результаты моделирования по методу Монте-Карло

ся не только проверка правильности компьютерного моделирования, но и, главным образом, проверка математического представления процесса эмиссии нуклонов на стадии установления равновесия.

Главной величиной, определяющей спектр предравновесных нуклонов, является произведение заселенности квазичастичных состояний в данный момент времени установления равновесия на вероятность эмиссии нуклона с данной энергией. Сравнение указанных величин затруднено только сложностью представления этой многомерной картины, поэтому на рис. 1 приводится сравнение просуммированных по энергии величин для данного момента времени и для выделенного квазичастичного состояния – вклад в предравновесную долю. Из рис. 1 видно, что для величин предравновесной доли, больших  $10^{-5}$ , достигнуто хорошее согласие результатов. Необходимость добиваться согласия меньших долей предравновесной эмиссии едва ли имеет практическую необходимость из-за их пренебрежимо малого вклада в результаты и больших затрат вычислительного времени. Это подтверждается данными рис. 2, где получено хорошее согласие спектров первых нуклонов.

Надлежащее тестирование спектров многочастичной предравновесной эмиссии и выходов остаточных ядер, полученных по модели МСР, очевидно выполнено быть не может. Оценить их достоверность можно только качественно. Анализ данных рис. 3 показывает, что рассчитанные спектры последующих частиц достаточно разумны. Так, для энергии налетающих нейтронов 25 МэВ спектры вторичных частиц значительно ниже спектров первых нуклонов из-за недостатка энергии оставшейся в ядре после вылета первых частиц, имеющих достаточно жесткий спектр. Очевидно, что протонный спектр «обрезан» кулоновским барьером в мягкой части.

Для энергий нейтронов 50 МэВ вторые и даже третьи частицы вполне конкурентоспособны с первыми, их спектры очевидно мягче и имеют соответственно меньшие максимальные энергии. «Смягчение» спектров объясняется уменьшени-

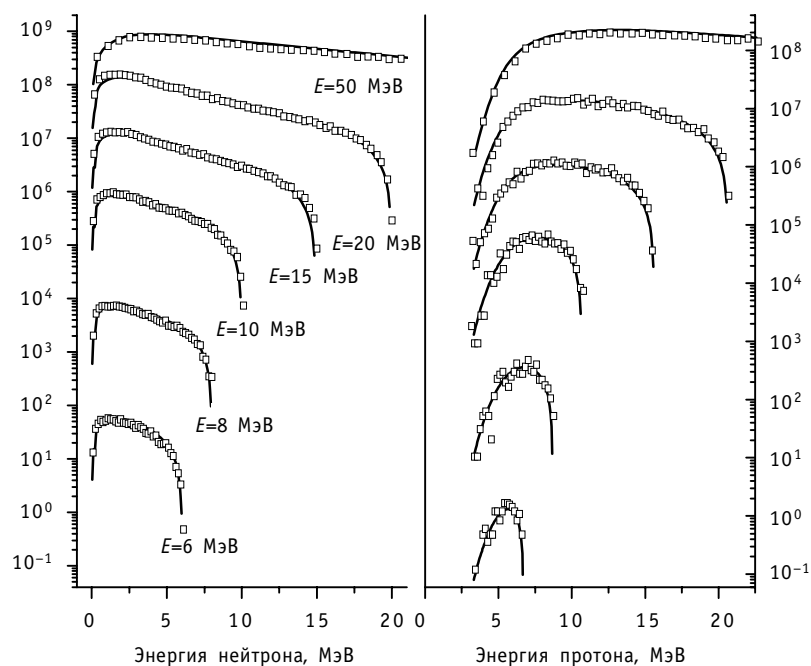


Рис. 2. Спектры нейтронов (слева) и протонов (справа) из реакции взаимодействия нейтронов с энергиями 6, 8, 10, 15, 20 и 50 МэВ (снизу вверх) с ядром  $^{93}\text{Nb}$ : линиями показаны результаты расчетов по экситонной модели, символами – по модели МСР

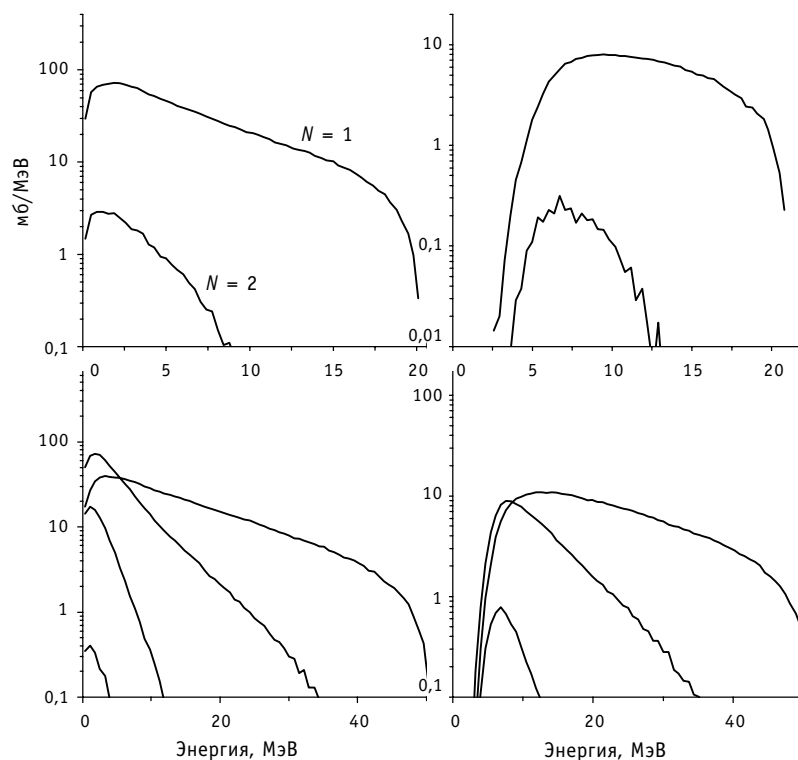


Рис. 3. Спектры многочастичной предравновесной эмиссии нейтронов (слева) и протонов (справа) из реакции взаимодействия нейтронов с энергиями 20 и 50 МэВ (снизу вверх) с ядром  $^{93}\text{Nb}$ : линиями показаны результаты расчетов по модели МСР, цифрами у кривых – номер частицы

ем энергии возбуждения остаточных составных систем и увеличением эффективного начального числа частиц и дырок для предравновесной эмиссии последующих частиц. Общий вид спектров для не первых нуклонов на рис. 3 во многом напоминает вид спектров, полученных по статистической модели ядерных реакций, что естественно с учетом того факта и часто предравновесная эмиссия происходит из состояний, близких к равновесным.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложена новая экситонная модель предравновесного распада (модель МСР), позволяющая рассчитывать спектры многочастичной эмиссии в процессе установления статистического равновесия. Проведено тестирование предложенного метода с помощью сравнения с результатами расчетов по классической экситонной модели для одной предравновесной частицы – нейтрона и/или протона. Качественно выполнено тестирование спектров многочастичной предравновесной эмиссии, полученных по модели МСР.

Выражаю благодарность за сотрудничество в написании статьи О.Т. Грудзевичу и С.Г. Явщицу.

## **Литература**

1. *Yavshits S.G. e.a.*// In Proc. of Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Tech. – Tsucuba, Japan, 2001. – P. 104-107.
2. *Griffin T.T.*// Phys. Rev. Letters. – 1966. – V.17. – P. 478.
3. *Blann M.*// Phys. Rev. – 1996. – C54(3). – P. 1341.
4. *Fu C.Y.*// Nucl. Sci. Eng. – 1984. – 86. – P. 344.

Поступила в редакцию 15.02.2006

**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 <sup>27</sup>Al up to <sup>209</sup>Bi 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.