

© А.Л. ЛИТНЕВСКИЙ<sup>1</sup>, И.И. ГОНЧАР<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Омский государственный технический университет

<sup>2</sup> Омский государственный университет путей сообщения  
a\_lit@list.ru, vigichar@hotmail.com

УДК 539.173(04)

**ВЛИЯНИЕ УЧЕТА СТОХАСТИЧНОСТИ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ,  
УНОСИМЫХ ЭМИТИРУЕМЫМИ ЧАСТИЦАМИ,  
НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕЛЕНИЯ  
ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ ЯДЕР**

**THE IMPACT OF THE STOCHASTIC CHARACTER  
OF THE ANGULAR MOMENTA CARRIED BY THE LIGHT  
EMITTED PARTICLES ON THE MODELING RESULTS  
OF HIGHLY-EXCITED NUCLEAR FISSION**

*Проведено комбинированное моделирование процесса деления возбужденных ядер с учетом стохастичности угловых моментов, уносимых эмитируемыми частицами. Для сравнения проведены расчеты с использованием стандартных фиксированных значений уносимых моментов. Показано, в каких случаях учет стохастичности необходим, а в каких можно сократить время моделирования, используя фиксированные значения уносимых моментов.*

*The combined modeling of the excited nuclear fission process is performed taking into account the stochastic nature of the angular momenta carried by the emitted particles. The standard fixed values of the angular momenta are used as well for the comparison. The study shows where the stochastic character is important to be taken into account, and where it is possible to reduce the simulation time by using the fixed values of the momenta carried.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Деление ядер, угловой момент, испускание частиц.  
**KEY WORDS.** Nuclear fission, angular momentum, particle evaporation.

При любом моделировании процесса деления высоковозбужденных ядер, претендующем на воспроизведение экспериментальных данных, необходимо учитывать эмиссию ядрами легких частиц. Испускание частиц приводит к уменьшению массового и зарядового (при эмиссии заряженных частиц) чисел делящегося ядра, а также к снижению его энергии возбуждения. Кроме того, эмиссия частиц сопровождается изменением углового момента ядра.

Учет эмиссии частиц в моделях деления может производиться несколькими способами. В работах [1; 2] полагается, что частицы испускаются непрерывно (частями) на каждом шаге моделирования. Ширины эмиссии рассчитываются с использованием подхода Хаузера-Фешбаха [3]. Другой, более реалистичный, способ учета эмиссии частиц — дискретное испускание.

В большинстве известных нам программ, реализующих комбинированные модели деления ядер (см., например, [4-10]), угловые моменты, уносимые частицами,  $\Delta L_v$ , фиксированы на протяжении всего процесса моделирования, т. е. используется приближение Вайскопфа-Эвинга. Однако существуют модели, например [11; 12], в которых при использовании дискретной эмиссии частиц учтена стохастичность угловых моментов, уносимых частицами. В КДСМ1 [7] эти моменты фиксированы и задаются пользователем во входных данных программы. Следуя указаниям работы [13], их значения обычно полагают равными  $\Delta L_n = \Delta L_p = \Delta L_\gamma = 1$  для нейтронов, протонов и гамма-квантов и  $\Delta L_\alpha = \Delta L_d = 2$  для альфа-частиц и дейтронов соответственно. Такой набор значений мы будем называть стандартным. В представляемой работе будет рассмотрено усовершенствование КДСМ1, которое сделано для учета случайного характера уносимых частицами угловых моментов. С помощью усовершенствованной программы мы постараемся ответить на вопрос о том, до какой степени правомерно использовать стандартные фиксированные значения моментов, исследовав вклад учета стохастичности в результаты расчета наблюдаемых. В литературе нам не удалось обнаружить каких-либо сравнений результатов, полученных с учетом стохастичности уносимых моментов и без него.

На подготовительном этапе работы было установлено, что изменение углового момента, уносимого частицами, существенно влияет на результаты моделирования деления ядер [14]. Принимая также во внимание, что при учете стохастического характера уносимых моментов их средние значения будут дробными (т. е. отличными от стандартных целых), можно утверждать, что обозначенная задача является актуальной.

Для решения поставленной задачи была разработана программа, рассчитывающая ширину распада составного ядра с испусканием частиц каждого вида по каналам с разными угловыми моментами остаточного ядра в приближении Хаузера-Фешбаха. Обработка результатов работы этой программы позволяет получить распределения испускаемых возбужденными ядрами частиц по уносимым ими угловым моментам. Расчет распределений и анализ факторов, оказывающих влияние на их вид, представлен в работе [15].

На следующем этапе работы была модифицирована программа, реализующая КДСМ1. В результате, ее структура позволила проводить расчеты с использованием распределения частиц по уносимым ими моментам. С этой целью во входные параметры программы добавлен ключ, отвечающий за использование распределения, а в саму программу — процедура, содержащая расчет распределений и метод Монте-Карло. Это позволяет на основании рассчитанных вероятностей каждого из допустимых значений случайным образом определить угловой момент, который унесет очередная испущенная частица. Процедура эта вызывается из основной программы непосредственно перед оператором, изменяющим угловой момент ядра. Таким образом, распределение испускаемых

частиц по уносимым ими угловым моментам вычисляется для текущих параметров ядра и эмитируемой частицы заданного типа.

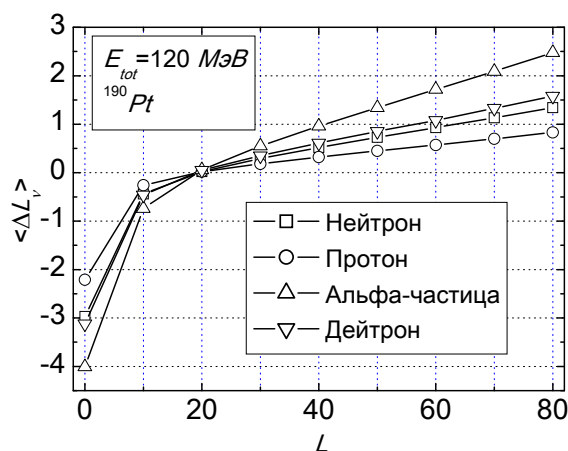


Рис. 1. Зависимости среднего момента, уносимого частицами, от начального углового момента ядра

Описанные изменения модели дали нам возможность оценить влияние учета стохастичности углового момента, уносимого частицами, на результаты моделирования. Расчеты, результаты которых мы будем обсуждать ниже, проведены для ядра  ${}^{190}\text{Pt}$  с начальной энергией возбуждения  $E_{tot0} = 150 \text{ МэВ}$ .

Для анализа зависимостей, полученных в результате моделирования, нам потребуется рис. 1, на котором представлены зависимости средних значений угловых моментов, уносимых частицами, от начального углового момента ядра.

Рассмотрим теперь результаты моделирования. В рамках данной работы мы будем рассматривать три наблюдаемых величины: вероятность деления ядра,  $P_f$ , среднюю множественность предразрывных нейтронов (СМПН),  $\langle n_{pre} \rangle$ , среднее время деления ядер (СВД),  $\langle t_f \rangle$ . На каждой из панелей рис. 2 изображены по три зависимости указанной наблюдаемой величины от начального углового момента ядра, полученные при использовании разных наборов угловых моментов, уносимых частицами. Квадратные символы обозначают расчет, проведенный без уноса углового момента; круглые — расчет со стандартным набором значений моментов, уносимых частицами; треугольные — результаты, полученные с использованием распределений всех (за исключением гамма-квантов) частиц по уносимым ими угловым моментам. Здесь следует отметить лишь то, что кривая, полученная с распределением испускаемых частиц по уносимым угловым моментам, располагается в соответствии со средними значениями этих моментов при каждом значении  $L_0$  (рис. 1). Так, на всех рисунках при  $L_0 < 20$  эта кривая располагается выше, чем зависимость с  $\Delta L_v = 0$ . Они пересекаются приблизительно при значении  $L_0 = 20$ , соответствующем нулевому среднему значению  $\Delta L_v$ . При  $L_0 > 20$  кривая, полученная с распределением, находится между стандартной зависимостью и кривой, полученной без уноса углового момента.

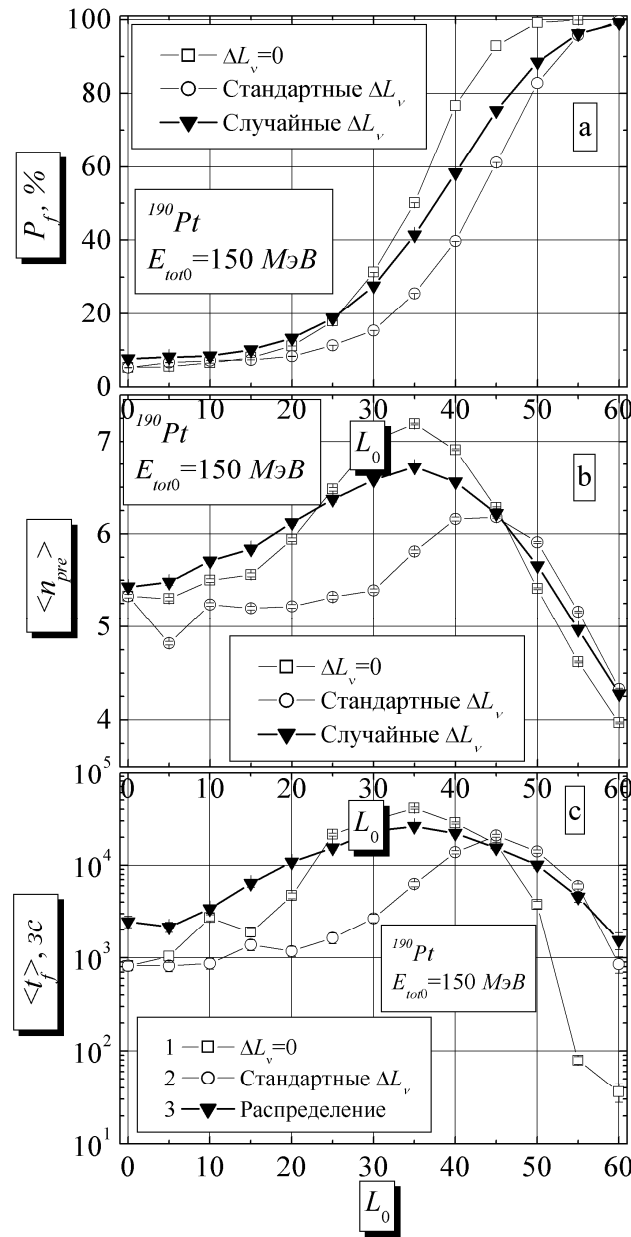


Рис. 2. Зависимости вероятности деления ядер (а), СМПН (b) и СВД (с) от начального углового момента

Теперь посмотрим, как усовершенствование КДСМ1 повлияет на согласие результатов моделирования с экспериментальными данными на примере деления ядра, образованного в реакции  $^{19}\text{F} + ^{181}\text{Ta} \rightarrow ^{200}\text{Pb}$ .

При моделировании в КДСМ1 можно использовать различные наборы параметров. Мы выбрали параметр плотности уровней Теке-Святецкого [16]. При

вычислении фрикционного параметра использовалась модель односторонней диссипации. На рис. 3 и 4 темные точки обозначают экспериментальные данные, а светлые — результаты, полученные путем моделирования. Треугольники, направленные вверх, соответствуют расчетам с учетом стохастичности  $\Delta L_v$ , а перевернутые — стандартным расчетам.

Из рис. 3 видно, результаты расчета вероятности деления при учете случайного характера  $\Delta L_v$  несколько лучше, чем стандартные расчеты, согласуются с экспериментальными данными. Вклад учета стохастичности в вероятность деления составляет 2-5%.

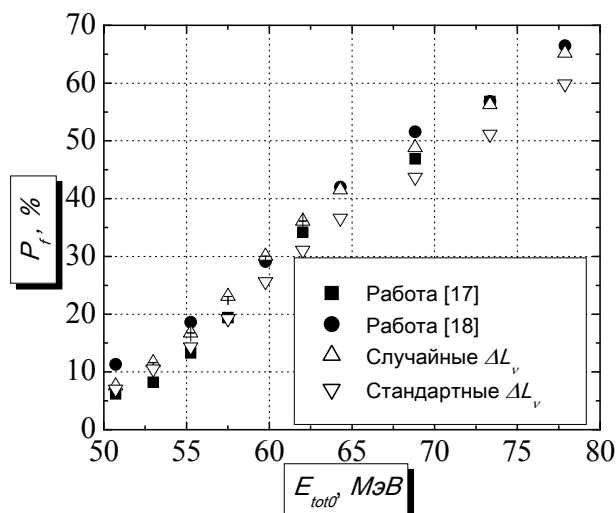


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для вероятности деления ядер

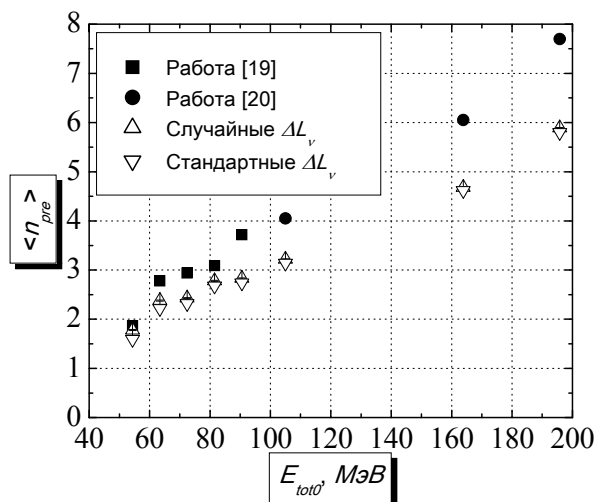


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для средней множественности предразрывных нейтронов

Рисунок 4 свидетельствует о том, что при относительно небольших  $E_{tot0}$  СМПН воспроизводится неплохо, но с увеличением энергии возбуждения согласие с экспериментом ухудшается: множественность нейтронов оказывается недооцененной. Характер теоретической и экспериментальной зависимостей схож. Следует отметить, что использование распределений эмитируемых частиц по уносимым моментам практически никак не повлияло на согласие результатов моделирования с экспериментальными данными по СМПН.

Анализируя рис. 3 и 4, можно сделать вывод о том, что на воспроизведение экспериментальных данных добавление распределения частиц по уносимым ими угловым моментам кардинальным образом не повлияло. Однако некоторое положительное влияние учета стохастичности есть.

В заключение можно констатировать, что на фоне погрешностей комбинированного моделирования, которые достаточно широко обсуждаются в литературе, использование стандартного приближения Вайскопфа-Эвинга является вполне приемлемым и может позволить сократить время моделирования приблизительно в два раза. В случае преодоления основных проблем комбинированного моделирования использование подхода Хаузера-Фешбаха будет обоснованным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wada, T., Abe, Y. One-Body Dissipation in Agreement with Precission Neutrons and Fragment Kinetic Energies // Physical Review Letters. 1993. Vol. 70. P. 3538.
2. Tillack, G.-R. et al. Light particle emission in the Langevin dynamics of heavy-ion induced fission // Physics Letters. 1992. Vol. B296. P. 296.
3. Hauser, W., Feshbach, H. The Inelastic Scattering of Neutrons // Physical Review. 1952. Vol. 87. P. 366.
4. Donadille, L. et al. Fission dynamics for capture reactions in  $^{58,64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$  systems: New results in terms of thermal energy and neutron multiplicity correlated distributions // Nuclear Physics. 1999. Vol. A656. P. 259.
5. Ryabov, E.G. et al. Application of a temperature-dependent liquid-drop model to dynamical Langevin calculations of fission-fragment distributions of excited nuclei // Physical Review. 2008. Vol. C78. P. 044614.
6. Ryabov, E.G., Karpov, A.V., Adeev, G.D. Influence of angular momentum on fission fragment mass distribution: Interpretation within Langevin dynamics // Nuclear Physics. 2006. Vol. A765. P. 39.
7. Гончар И.И. и др. Теоретическое исследование зависимости среднего времени деления возбужденных атомных ядер от углового момента // Ядерная физика. 2004. Т. 67. С. 2101.
8. Гончар И.И. и др. Многомерная динамическо-статистическая модель деления возбужденных ядер // Ядерная физика. 2000. Т. 63. С. 1778.
9. Адеев Г.Д. и др. Многомерный стохастический подход к динамике деления возбужденных ядер // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2005. Т. 36. С. 731.
10. Ye, W. Significant role of fissility in evaporation residue cross sections as a probe of presaddle nuclear dissipation // Physical Review. 2010. Vol. C81. P. 011603.
11. Èslamizadeh, M.H. et al. A Dynamical-Statistical Model of Nuclear Fission of Heavy Elements // Moscow University Physics Bulletin. 2008. Vol. 63. P. 24.
12. Еременко Д.О. и др. Динамико-статистический подход к описанию реакции вынужденного деления тяжелых ядер // Ядерная физика. 2009. Т. 72. С. 1707.

13. Hinde, D.J. et al. Fission and Evaporation Competition // Nuclear Physics. 1982. Vol. A382. P. 128.
14. Литневский А.Л. Зависимость результатов моделирования деления возбужденных ядер от значений угловых моментов, уносимых эмитируемыми частицами // Омский научный вестник. 2014. № 3(133). С. 32.
15. Литневский А.Л. Процесс деления возбужденных ядер: распределение эмитируемых легких частиц по уносимым ими угловым моментам // Омский научный вестник. 2014. № 3(133). С. 35.
16. Töke, J., Swiatecki, W.J. Surface-Layer Corrections to the Level-Density Formula for a Diffuse Fermi Gas // Nuclear Physics. 1981. Vol. A372. P. 141.
17. Charity, R.J. et al. Heavy ion induced fusion-fission systematics and the effect of the compound nuclear spin distribution on fission-barrier determination // Nuclear Physics. 1986. Vol. A457. P. 441.
18. Andersen, J.U. et al. Lifetime measurements for heavy-ion-induced fission by the crystal-blocking technique // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1980. Vol. 40.
19. Newton, J.O. et al. Measurement and statistical model analysis of pre-fission neutron multiplicities // Nuclear Physics. 1988. Vol. A483. P. 126.
20. Hinde, D.J. et al. Systematics of fusion-fission time scale // Physical Review. 1989. Vol. C39. P. 2268.

## REFERENCES

1. Wada, T., Abe, Y. One-body dissipation in agreement with pre-scission neutrons and fragment kinetic energies // Physical Review Letters. 1993. Vol. 70. P. 3538.
2. Tillack, G.-R. et al. Light particle emission in the Langevin dynamics of heavy-ion induced fission // Physics Letters. 1992. Vol. B296. P. 296.
3. Hauser, W., Feshbach, H. The Inelastic Scattering of Neutrons // Physical Review. 1952. Vol. 87. P. 366.
4. Donadille, L. et al. Fission dynamics for capture reactions in  $^{58,64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$  systems: New results in terms of thermal energy and neutron multiplicity correlated distributions // Nuclear Physics. 1999. Vol. A656. P. 259.
5. Ryabov, E.G. et al. Application of a temperature-dependent liquid-drop model to dynamical Langevin calculations of fission-fragment distributions of excited nuclei // Physical Review. 2008. Vol. C78. P. 044614.
6. Ryabov, E.G., Karpov, A.V., Adeev, G.D. Influence of angular momentum on fission fragment mass distribution: Interpretation within Langevin dynamics // Nuclear Physics. 2006. Vol. A765. P. 39.
7. Gonchar, I.I. et al. Theoretical studies into excited nuclear fission time dependence on angular momentum // Nuclear Physics. 2004. Vol. 67. P. 2101. (in Russian).
8. Gonchar, I.I. et al. Multi-dimensional dynamical and statistical model of excited nuclear fission // Nuclear Physics. 2000. Vol. 63. P. 1778. (in Russian).
9. Adeev, G.D. et al. Multi-dimensional stochastic approach to excited nuclear fission dynamics // Elementary particles and nuclear physics. 2005. Vol. 36. P. 731. (in Russian).
10. Ye, W. Significant role of fissility in evaporation residue cross sections as a probe of presaddle nuclear dissipation // Physical Review. 2010. Vol. C81. P. 011603.
11. Èslamizadeh, M.H. et al. A Dynamical-Statistical Model of Nuclear Fission of Heavy Elements // Moscow University Physics Bulletin. 2008. Vol. 63. P. 24.
12. Yeremenko, D.O. et al. A dynamical and statistical approach to describe heavy nuclear induced fission reaction // Nuclear Physics. 2009. Vol. 72. P. 1707. (in Russian).
13. Hinde, D.J. et al. Fission and Evaporation Competition // Nuclear Physics. 1982. Vol. A382. P. 128.

14. Litnevsky, A.L. Excited nuclear fission modeling results dependent on the values of angular momenta carried by emitted light particles // Omsk. 2014. № 3(133). P. 32. (in Russian).

15. Litnevsky, A.L. The process of excited nuclear fission: emitted light particles distribution along angular momenta carried by them // Omsk. 2014. № 3(133). P. 35. (in Russian).

16. Töke, J., Swiatecki, W.J. Surface-Layer Corrections to the Level-Density Formula for a Diffuse Fermi Gas // Nuclear Physics. 1981. Vol. A372. P. 141.

17. Charity, R.J. et al. Heavy ion induced fusion-fission systematics and the effect of the compound nuclear spin distribution on fission-barrier determination // Nuclear Physics. 1986. Vol. A457. P. 441.

18. Andersen, J.U. et al. Lifetime measurements for heavy-ion-induced fission by the crystal-blocking technique // Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 1980. Vol. 40.

19. Newton, J.O. et al. Measurement and statistical model analysis of pre-fission neutron multiplicities // Nuclear Physics. 1988. Vol. A483. P. 126.

20. Hinde, D.J. et al. Systematics of fusion-fission time scale // Physical Review. 1989. Vol. C39. P. 2268.

#### **Авторы публикации**

**Литневский Андрей Леонидович** — доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Омского государственного технического университета, кандидат физико-математических наук

**Гончар Игорь Иванович** — профессор кафедры физики и химии Омского государственного университета путей сообщения, доктор физико-математических наук

#### **Authors of the publication**

**Andrey L. Litnevsky** — Cand. Phys. and Math. Sci., Associate Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Omsk State Technical University

**Igor I. Gonchar** — Dr. Phys. and Math. Sci., Professor, Physics and Chemistry Department, Omsk State Transport University