

# ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ТЕПЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ ЯДЕР НА РАСЧЕТ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ В РЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ\*

**В.В. Колесов, В.Ф. Украинцев**

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



Целью предлагаемой работы является исследование влияния теплового движения ядер и резонансного поведения сечения упругого рассеяния нейтронов на индикатрису рассеяния для ряда практически важных в реакторных приложениях нуклидов, в частности, для  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{167}\text{Er}$  при различных температурах.

Наличие значительного изменения вида индикатрисы упругого рассеяния при проведении расчетов по более точной модели для большого числа практически важных нуклидов в резонансной области энергий приводит к необходимости проведения дальнейших исследований. В частности, планируется оценить величину наблюдаемого эффекта при расчете групповых констант для ячеек с различным отношением топлива к замедлителю.

При решении задачи замедления нейтронов в резонансной области энергий обычно используется простейшая модель замедления, не учитывающая при упругом рассеянии ни собственного движения ядер, ни молекулярных и химических связей в замедлителе, т.е. рассеивающее ядро считается неподвижным и свободным.

Исходя из предположения о сферически-симметричном упругом рассеянии в системе центра инерции, индикатриса рассеяния в этом случае обычно представляется в виде [1]:

$$\sigma_s(E')f_s(E' \rightarrow E) = \begin{cases} \frac{\sigma_s(E')}{(1-\alpha)E'}, & \alpha E' \leq E \leq E' \\ 0, & E > E', E < \alpha E', \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha = (A-1)^2/(A+1)^2$ .

В области энергий ниже нескольких электронвольт (область термализации), используется более точное выражение, получаемое из так называемой модели одноатомного газа:

© В.В. Колесов, В.Ф. Украинцев, 2006

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 05-08-65467-а

$$\sigma_s(v') f_s(v' \rightarrow v) = \frac{1}{v'} \int_{-1}^1 v_r \sigma_s(v_r) g(\vec{v}' \rightarrow \vec{v}) 2\pi P(V) d\mu dV, \quad (2)$$

где  $\vec{v}'$ ,  $\vec{v}$  – начальная и конечная скорости нейтрона в лабораторной системе координат;  $V$  – начальная скорость ядра перед столкновением в лабораторной системе координат;  $v_r$  – относительная скорость нейтрона и ядра перед столкновением

$$v_r^2 = v'^2 + V^2 - 2v'V\mu; \mu = \cos(\vec{v}' \cdot \vec{V}); g(\vec{v}' \rightarrow \vec{v}) = \begin{cases} \frac{2v}{v_{\max}^2 - v_{\min}^2}, & v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ 0, & v \leq v_{\min}, v \geq v_{\max} \end{cases},$$

где  $v_{\min} = \left| V_c - \frac{A}{A+1} v_r \right|$ ,  $v_{\max} = \left| V_c + \frac{A}{A+1} v_r \right|$ ,  $V_c$  – скорость центра масс;  $P(V)$  – распределение Максвелла,  $\int_0^{2\pi} P(V) d\mu d\varphi = 2\pi P(V) d\mu dV$ , где  $\varphi$  – азимутальный угол между векторами  $\vec{v}'$  и  $\vec{V}$ .

При этом обычно  $\sigma_s$  полагается постоянной величиной, не зависящей от энергии, что приводит к хорошо известному выражению для индикатрисы упругого рассеяния в модели одноатомного газа в виде комбинации функций ошибок или *erf*-функций. Именно такой подход используется для области термализации, тогда как при энергиях выше термализации обычно используется формула (1).

Однако при исследованиях рассеяния для  $^{238}\text{U}$  [2, 4, 5] выяснилось, что даже при энергиях в несколько десятков эВ, если энергия налетающего нейтрона близка к энергии резонанса при расчетах индикатрисы упругого рассеяния все же необходимо пользоваться формулой (2) вместо формулы (1). Предположение о независимости от энергии сечения упругого рассеяния в резонансной области энергий не является справедливым и, как показано в работах [2–5], это приводит к значительным погрешностям в расчетах индикатрисы упругого рассеяния.

Интеграл в выражении для индикатрисы рассеяния (2) может быть упрощен [1], однако для зависящего от энергии сечения упругого рассеяния он может быть рассчитан только численно.

Целью предлагаемой работы является исследование влияния резонансного поведения сечения упругого рассеяния на индикатрису рассеяния для ряда практически важных в реакторных приложениях нуклидов, в частности, для  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{167}\text{Er}$  при различных температурах. Проведение такого исследования для  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{167}\text{Er}$  весьма важно, т.к. в настоящее время эти нуклиды активно используются в реакторах типа ВВЭР и РБМК для снижения запаса реактивности топлива и увеличения глубины выгорания.

В результате проведенных расчетных оценок было обнаружено значительное отличие индикатрис рассеяния, рассчитанных по точной формуле (2) от аналогичных расчетов по формуле (1) для всех перечисленных выше нуклидов.

Для примера на рис.1–5 приводятся графики зависимости индикатрисы рассеяния  $f_s(E' \rightarrow E)$ , как функции энергии  $E$  для некоторых  $E'$  для  $^{240}\text{Pu}$  при различных температурах, а также для  $^{167}\text{Er}$  при  $T = 1042$  К, рассчитанные по формулам (1) и (2). Как видно из графиков, при энергиях, близких к пику резонанса, доля нейтронов, увеличивающих энергию при рассеянии может быть даже больше доли замедленных нейтронов (на графике площадь правой по отношению к энергии  $E'$  части под кривой распределения больше площади левой части). Этот эффект, как видно из графиков 1–2 для  $^{240}\text{Pu}$ , увеличивается с ростом температуры. При малых температурах пове-

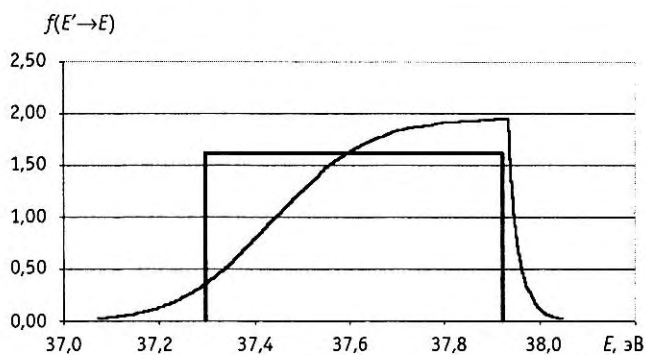


Рис. 1. Индикатриса рассеяния  $f_s(E' \rightarrow E)$   $^{240}\text{Pu}$  при  $T = 210$  К, как функция  $E$ , для  $E' = 37.9344$  эВ

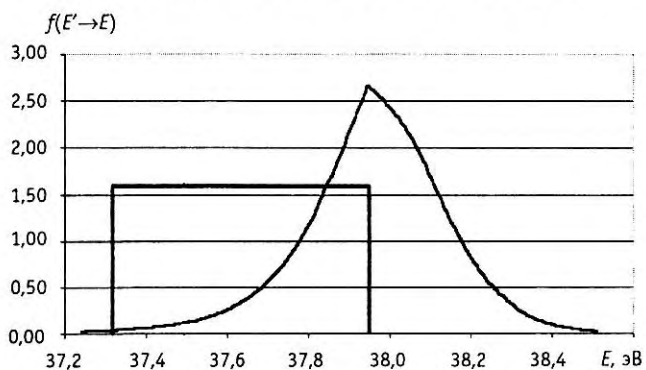


Рис. 2. Индикатриса рассеяния  $f_s(E' \rightarrow E)$   $^{240}\text{Pu}$  при  $T = 1200$  К, как функция  $E$ , для  $E' = 37.9344$  эВ

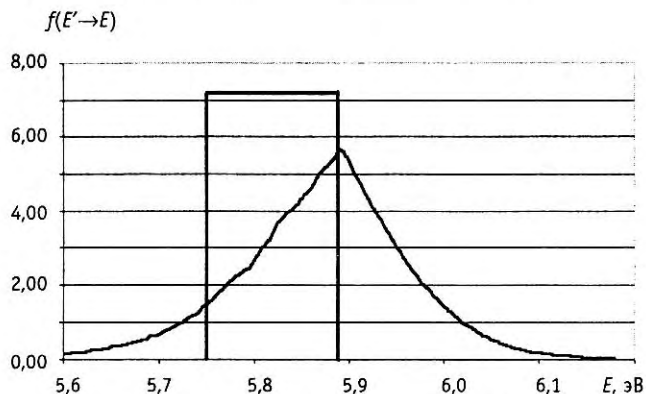


Рис. 3. Индикатриса рассеяния  $f_s(E' \rightarrow E)$   $^{167}\text{Er}$  при  $T = 1042$  К, как функция  $E$ , для  $E' = 5.89$  эВ

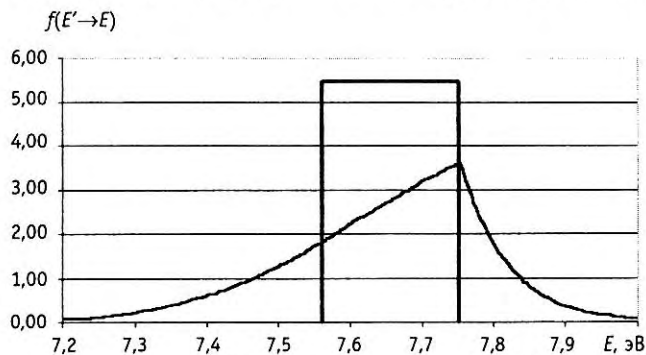


Рис. 4. Индикатриса рассеяния  $f_s(E' \rightarrow E)$   $^{167}\text{Er}$  при  $T = 1042$  К, как функция  $E$ , для  $E' = 7.755$  эВ

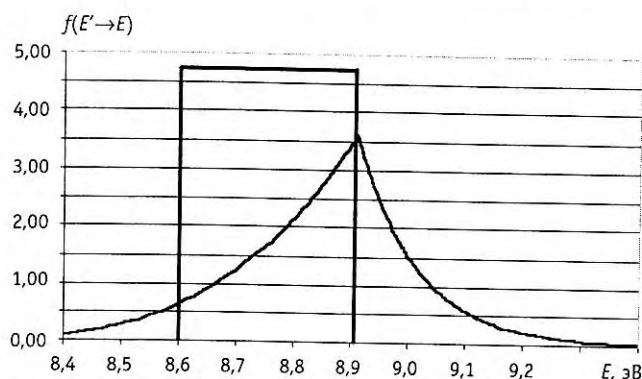


Рис. 5. Индикатриса рассеяния  $f_s(E' \rightarrow E)$   $^{167}\text{Er}$  при  $T = 1042$  К, как функция  $E$ , для  $E' = 8.91$  эВ

дение индикатрисы упругого рассеяния приближается к виду, задаваемому формулой (1) – так называемой ступеньке замедления.

Графики индикатрисы рассеяния для трех близлежащих резонансов  $^{167}\text{Er}$ : при  $E_{\text{рез}} = 5.98$  эВ,  $E_{\text{рез}} = 7.95$  эВ и  $E_{\text{рез}} = 9.37$  эВ приведены на рис. 3–5. Для первого резонанса, где наблюдается наибольший эффект, максимальное значение  $\sigma_s$  составляет 3760 барн, для второго, где эффект минимальный – 8.45 барн и для третьего – 392 барн. Отношение нейтронной ширины к полной ширине резонанса составляет соответственно 20, 0.2 и 9%. Аналогичные результаты получены для  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{235}\text{U}$ . Таким образом, можно сделать вывод, что влияние резонансного поведения сечения упругого рассеяния нейтронов на вид индикатрисы, рассчитываемой по формуле (2), тем сильнее, чем больше доля процессов рассеяния по отношению к доле других процессов (т.е. чем выше отношение нейтронной ширины к полной ширине  $\Gamma_n / \Gamma$ ).

Были также рассчитаны среднегрупповые сечения для модельной двухзонной ячейки при  $T = 1042$  К ( $R_{\text{топл}} = 0.4098$  см,  $R_{\text{замедл}} = 0.61781$  см), состоящей в первом случае из  $^{238}\text{UO}_2$  (концентрации ядер составляют:  $^{238}\text{U} - 0.02205 \cdot 10^{24}$  ядер/см<sup>3</sup>,  $\text{O}_2 - 0.441 \cdot 10^{24}$  ядер/см<sup>3</sup>), а во втором случае из  $^{240}\text{PuO}_2$  (концентрации ядер составляют:  $\text{Pu}^{240} - 0.02205 \cdot 10^{24}$  ядер/см<sup>3</sup>,  $\text{O}_2 - 0.441 \cdot 10^{24}$  ядер/см<sup>3</sup>). В обоих случаях замедлителем являлась вода.

Расчеты для стандартной индикатрисы упругого рассеяния (1) и точного случая (2) для топливного изотопа проводились с помощью решения уравнения замедления нейтронов от единичного источника методом вероятности первых столкновений и сравнивались с аналогичными расчетами по программе MCNP. Были получены средние значения для полного сечения, сечения поглощения и сечения упругого рассеяния в интервале от 36.3 до 37.0 эВ для варианта с  $^{238}\text{U}$  (окрестность резонанса при 36.68 эВ) и в интервале от 37.8 до 38.6 эВ для варианта с  $^{240}\text{Pu}$  (окрестность резонанса при 38.32 эВ).

Результаты, полученные по формуле (1) и коду MCNP для обоих вариантов совпадают в пределах 0.6%. В то же время эти результаты заметно отличаются от сечений, рассчитанных по точной формуле (различия ~ 4.5% для варианта с  $^{240}\text{PuO}_2$  и ~ 6.5% для  $^{238}\text{UO}_2$ ).

Наличие значительного изменения вида индикатрисы упругого рассеяния при проведении расчетов по более точной модели для большого числа практически важных нуклидов в резонансной области энергий, а также обнаруженное при проведении предварительных расчетов различие в среднегрупповых сечениях приводит к необходимости проведения дальнейших исследований. В частности, планируется оценить величину наблюдаемого эффекта при расчете групповых констант для ячеек с различным отношением топлива к замедлителю.

**Литература**

1. *Blackshaw G.L., Murray R.L.* Scattering Functions for Low-Energy Neutron Collisions in a Maxwellian Monatomic Gas//Nucl. Sci. Engng. – 1967. – V.27. – P. 520-532.
2. *Курченко А.Ю., Лалетин Н.И.* Расчет индикатрисы рассеяния нейтронов на движущихся ядрах монокристаллического газа в резонансной области энергий// Атомная энергия. – 1991. – Т. 70 – Вып. 3. – С. 368-372.
3. *Ouisloumen M., Sanchez R.* A Model for Neutron Scattering Off Heavy Isotopes That Accounts for Thermal Agitation Effects//Nucl. Sci. Engng. – 1991. – V.107. – P. 189-200.
4. *Bouland O., Kolesov V., Rowlands J.L.* The Effect of Approximations in the Energy Distributions of Scattered Neutrons on Thermal Reactor Doppler Effects//Int. Conf. on Nucl. Data for Science and Technology (Gatlinburg, USA). – 1994. – P. 1006-1008.
5. *Bouland O., Kolesov V.* Effect of Approximations in the Treatment of Secondary Distributions of Scattered Neutrons on Resonance Absorption and Doppler Effects//Note technique SPRC/LEPh/932093.1/fp, CEA, Cadarache, 1993.

Поступила в редакцию 5.12.2005

The construction of the acoustic devices, computer programs, laboratory and testing unit experiments are described.

#### УДК 621.039.58

*Neutron Freccasting to Provide for Seismic Safety of NPP \ Yu.A. Rogozhin, I.P. Shestopalov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 8 titles.*

As it is known, various natural factors, in particular earthquakes, can render influence on NPP work. The data on seismic energy, allocated from the earthquake sources on all globe for the period with 1680 on 2004 in comparison to cycles of solar activity, are analyzed. The 11-year's cycles of seismic activity on the Earth are revealed. The cyclic changes of seismic activity with duration in three solar cycles and century cycles are marked out also. A correlation between solar and seismic activity mainly negative, but the correlation between them can be positive under influence of powerful solar proton events. The strongest earthquakes occur in the beginning of the century cycle. In the ninetieth years of the last century there has come a new century cycle, in which beginning, during several tens years, the strong seismic activity will be marked. It is shown, that the seismic activity is accompanied by burst of neutrons, that directly can influence on NPP work. A new approach to forecasting of earthquakes develops by means of neutron monitoring, that at the end promises to raise seismic safety of NPP.

#### УДК 623.454.862: 628.4.047

*Multi-Criteria Analysis for Evaluating the Radiological and Ecological Safety Measures in Radioactive Waste Management \ T.G. Sazykina, I.I. Kryshev; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 7 pages, 2 illustrations, 3 tables. – References, 6 titles.*

A methodological approach is presented for multi-criteria evaluating the effectiveness of radiological and ecological safety measures in radioactive waste management. The approach is based on multi-criterial analysis with consideration of radiological, ecological, social, economical consequences of various safety measures. The practical application of the multi-criteria approach is demonstrated by the example of decision-making on the most effective actions for rehabilitation a water body contaminated with radionuclides.

#### УДК 621.039.512

*Temperature Effects Influence on Secondary Energy Distributions of Scattered Neutrons in the Resonance Region \ V.V. Kolesov, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.*

It is customary to neglect the effect of thermal motion (Doppler effect) and resonance behavior of the elastic scattering on the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region. As has been shown early, instead of usual step-function for the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region it needs to use more exact expression.

At this work we have researched the nuclei thermal motion and resonance behavior of the neutron elastic scattering influence on the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region for a number of important nuclei, as  $^{238}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{155}\text{Gd}$  and  $^{167}\text{Er}$ .

#### УДК 621.039.516.2

*The Assessment of Voce Coefficient for WWR-c Reactor \ O.Y. Kochnov, N.I. Ribkin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 4 illustrations. – References, titles.*

The air volume influence in WWR-c reactor core on the total reactivity was analyzed in this article. The experimental dates of voce coefficient depending on the air volume position inside reactor core was done.