

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОННЫХ ГРУППОВЫХ КОНСТАНТ ДЛЯ МАТЕРИАЛОВ – СМЕСЕЙ ИЗОТОПОВ В СИСТЕМЕ БНАБ

А.А. Перегудов, В.Н. Кощев, Г.Н. Мантуров

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Представлена методика получения нейтронных групповых констант для материалов – смесей изотопов с помощью программы CONSYST, являющейся составной частью системы констант БНАБ, где в качестве исходных данных используются групповые константы стабильных изотопов. Полученные групповые нейтронные константы сравнивались с результатами вычислений с помощью программ NJOY и CALENDF. Работоспособность методики продемонстрирована в расчетах критичности ряда бенчмарк-моделей быстрых критических сборок из международного справочника по критической безопасности ICSBEP Handbook.

Ключевые слова: библиотека оцененных ядерных данных РОСФОНД, коды NJOY, CALENDF, CONSYST, система групповых констант БНАБ, расчеты критичности бенчмарк-моделей быстрых физических сборок.

Key words: library of evaluated nuclear data RUSFOND, ABBN group constants, codes NJOY, CALENDF, CONSYST, criticality calculation of benchmark models of fast physical assemblies.

ВВЕДЕНИЕ

В современных библиотеках оцененных ядерных данных, таких как ENDF/B-VII, JENDL-4.0, JEFF-3.1.1, РОСФОНД [1] оцененные нейтронные данные приводятся, как правило, отдельно для стабильных изотопов (и радиоактивных нуклидов), а для элементов смеси они отсутствуют. Например, нейтронные данные представлены для отдельных стабильных изотопов Fe-54, Fe-56, Fe-57 и Fe-58, а для природного железа данные отсутствуют. Такая ситуация понятна и обусловлена тем, что оценка нейтронных данных для отдельных стабильных изотопов, как правило, может быть выполнена более корректно, чем для естественной смеси.

Однако в практике использования нейтронных констант в расчетах ядерных реакторов, где в расчетах задаются плотности материалов – природных элементов или их смесей (например, железо, хром, никель, стали различных марок), нет необходимости задания концентраций по отдельным изотопам. Более того, эта информация является избыточной, желательно сократить число нуклидов, входящих в состав среды, что позволяет существенно уменьшить время, затрачиваемое на подготовку констант, упростить расчетные задания и улучшить контроль за правильностью задания ядерных концентраций.

© А.А. Перегудов, В.Н. Кощев, Г.Н. Мантуров, 2011

Задача подготовки нейтронных констант для природных элементов и их смесей, входящих в состав среды нуклидов (изотопов), важна для монте-карловских расчетов, где ведется слежение за историей нейтрона при его столкновении с каждым ядром. Под нуклидом понимается материал, для которого в исходной библиотеке содержатся нейтронные данные, т.е. нуклидом может быть как изотоп, так и элемент или смесь элементов. Одним из решающих факторов снижения статистической погрешности расчетных результатов является использование нейтронных данных для природных многоизотопных элементов, а также конструкционных сталей, применяющихся для расчета быстрых реакторов.

Цель работы состояла в следующем:

- разработать расчетную методику, позволяющую генерировать нейтронные групповые константы для природных смесей на основе файлов оцененных данных для стабильных изотопов;
- верифицировать методику получения факторов резонансной самоэкранировки сечений для естественной смеси на основе оцененных нейтронных данных стабильных изотопов с использованием отечественной программы CONSYST [2] путем сравнения с аналогичными данными, полученными с помощью методик, реализованных в зарубежных кодах NJOY [3] и CALENDF [4];
- провести верификационные (валидационные) расчеты критических сборок с использованием двух наборов констант, полученных для естественных смесей и отдельных стабильных изотопов, и сравнить результаты.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ ГРУППОВЫХ КОНСТАНТ

При переработке оцененных нейтронных данных с помощью программы NJOY для раздельных стабильных изотопов на первом этапе рассчитывались групповые константы, характеризующие непосредственно свойства нуклида, такие как среднее групповые сечения, спектр рассеяния нейтронов, спектр нейтронов деления.

На втором этапе определялись групповые константы, которые зависят от свойств не только данного нуклида, но и нуклидов, входящих в среду. Речь идет о получении заблокированных резонансных сечений Бондаренко [5], которые зависят как от резонансных свойств самого нуклида, так и от параметра σ_0 – «сечения разбавления», характеризующего среду, в которой находится нуклид.

В системе констант БНАБ заблокированные сечения рассчитываются для стандартного набора сечений разбавления нуклида в среде в интервале от 0.01 до 1E7 барн (26 значений). При необходимости заблокированное сечение определяется путем интерполяции между соседними значениями сечения разбавления.

На первом этапе переработки оцененных нейтронных данных были получены наборы групповых констант для всех стабильных изотопов, составляющих природную смесь.

Методика получения групповых констант, обладающих свойством аддитивности

Групповые данные, обладающие свойством аддитивности, – парциальные сечения, матрицы упругого и неупругого рассеяний и т.п. – сворачивались в групповые константы для естественной смеси по следующим формулам:

- сечения взаимодействия – $r = \text{total, elastic, inelastic, fission и capture}$

$$\sigma_{r, \text{element}}^g = \sum_i \sigma_{r, i}^g * a_i,$$

где a_i – концентрация каждого стабильного изотопа в приготовляемой смеси;

- множественность нейтронов R (определялась с весом сечения неупругого рассеяния)

$$R_{element}^g = \sum_i R_i^g \sigma_{in,i}^g a_i / \sigma_{in,element}^g ;$$

- среднее число нейтронов деления ν (определялось с весом сечения деления)

$$\nu_{element}^g = \sum_i \sigma_{f,i}^g * \nu_i^g * a_i / \sigma_{f,element}^g ;$$

- средний косинус угла рассеяния нейтронов m (определялся с весом сечения упругого рассеяния)

$$\mu_{element}^g = \sum_i \sigma_{e,i}^g * \mu_{e,i}^g * a_i / \sigma_{e,i}^g ;$$

- средний логарифмический декремент энергии ξ

$$\xi_{element}^g = \xi_0 \frac{1 - \mu_{element}^g}{1 - \mu_{element}^0},$$

где $\xi_0 = 2 / (A + 2/3)$, $\mu_0 = 2 / 3A$, $A = \sum_i A_i a_i$ – среднее по всем изотопам отношение массы ядра к массе нейтрона.

Методика получения групповых констант, не обладающих свойством аддитивности

На втором этапе выполнялась свертка данных, которые свойством аддитивности не обладают. К таковым относятся данные о резонансной самоэкранировке сечений – факторы самоэкранировки (или f -факторы Бондаренко), поскольку они определяются через моменты сечений [5].

Свертка этих данных проводилась следующим образом.

С помощью программы CONSYST готовились групповые константы для природной смеси стабильных изотопов с использованием специального материала в системе БНАБ – «дельта-рассеивателя» («D-SC») для 26-ти значений сечения разбавления. «Дельта-рассеиватель» – это непоглощающий нуклид, у которого полное сечение взаимодействия равно сечению упругого рассеяния – 1 барн. Концентрации стабильных изотопов задавались согласно их содержанию в природной смеси. Концентрации материала «дельта-рассеиватель» (26 значений, от 0.001 до 1E7 барн) соответствовали стандартному набору сечений разбавлений нуклида в среде, принятому в системе БНАБ [6]. В результате в выходном файле программы CONSYST для 26-ти материалов были подготовлены блокированные сечения для соответствующего сечения разбавления природной смеси изотопов в среде:

$$\sigma_r^g(\sigma_0) = \sum_i c_i \sigma_{r,i}^g(\sigma_{x,i}),$$

где $\sigma_r^g(\sigma_0)$ – блокированное сечение реакции типа γ для природной смеси при сечении разбавления σ_0 ; c_i – концентрация i -го изотопа в природной смеси; $\sigma_{r,i}^g(\sigma_{x,i})$ – блокированное сечение реакции типа γ для i -го изотопа в природной смеси при сечении разбавления $\sigma_{x,i}$; $\sigma_{x,i} = \sigma_0 + \left[\sum_{k \neq i} c_k \sigma_{tot,k}^g \right] / \sigma_i$ – сечение разбавления i -го изотопа в природной смеси.

В дальнейшем было принято $\sigma_{x,i} = \sigma_0$, что справедливо для больших значений сечения разбавления.

Далее при постобработке выходного файла результатов формировались таблицы БНАБ для факторов резонансной самоэкранировки сечений приготовленной природной смеси. При этом использовались приближения, характерные для методики подготовки констант с помощью программы CONSYST. Обычно считалось, что резонансное взаимодействие на отдельном рассматриваемом стабильном изо-

топе происходит независимо от резонансных свойств остальных изотопов, однако при подготовке смеси этот эффект частично учитывается. Данная методика не совсем корректна в случае, когда резонансные уровни, принадлежащие разным изотопам, перекрываются или близки друг к другу.

Аналогичная методика получения блокированных сечений для природных смесей-материалов используется в коде CALENDF. Блокированные сечения здесь получаются с использованием подгрупповых параметров, которые, как и факторы резонансной самоэкранировки, характеризуют резонансные свойства сечений нуклида. В этой методике считается, что резонансное взаимодействие на отдельном рассматриваемом стабильном изотопе происходит независимо от резонансных свойств остальных изотопов. Однако получение моментов сечений, с помощью которых и определяются факторы резонансной самоэкранировки, в данной методике происходит более корректным способом. Методика также хорошо работает в области неразрешенных резонансов.

Наиболее точным способом получения блокированных сечений в области разрешенных резонансов является следующий метод.

При помощи кода NJOY подготавливаются непрерывные энергетические зависимости сечений взаимодействия для отдельных изотопов. В этом случае детально восстанавливаются все уровни резонансного взаимодействия нейтрона с веществом. Далее энергетические зависимости суммируются с весом их концентраций в природной смеси. В результате для приготовленной таким образом энергетической зависимости сечений природной смеси будут характерны все резонансные особенности составляющих изотопов. При помощи кода NJOY энергетические зависимости сечений сворачиваются в заданное число групп. Следует отметить, что в области неразрешенных резонансов эта методика не работает.

На рисунке 1 приводится схема переработки данных с помощью программных комплексов NJOY, CONSYST и CALENDF.

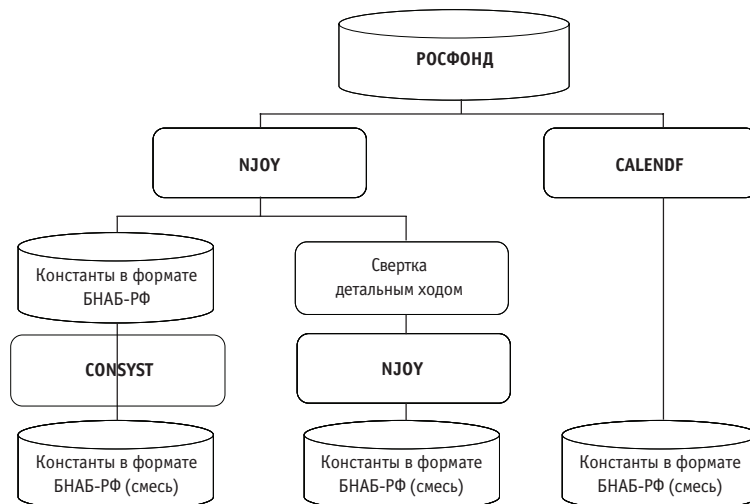


Рис. 1. Схема переработки данных с помощью программных комплексов NJOY, CONSYST и CALENDF

СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение наборов основных групповых констант. В результате проведенного сравнения констант, обладающих свойством аддитивности, оказалось, что различия в сечениях, полученных тремя разными методиками, составляют порядка 0.01%, т.е. пренебрежимо малы.

Сравнение наборов блокированных сечений. Сравнение различных методик получения фактора резонансной самоэкранировки сечений приводится на рис. 2–4 для смесей железа, хрома и никеля соответственно. На этих рисунках показан результат сравнения рассчитанных факторов самоэкранировки сечения захвата при сечении разбавления $\sigma_0=100$ барн. В качестве реперных результатов использовались факторы самоэкранировки сечения, полученные по NJOY.

В верхней части рисунка приводится энергетическая зависимость 299-группового сечения захвата на рассматриваемом элементе; в нижней части – отношение факторов самоэкранировки, полученных по методикам CALENDF и CONSYST, к факторам самоэкранировки, полученным по NJOY.

Из приведенного на рис. 2–4 сравнения видно, что различия в вычислении блокированных сечений захвата, например, на железе, при помощи программ CALENDF и CONSYST составляют ~ 1% для сечения разбавления 100 барн.

Результаты изучения возможной причины большого различия в полученных факторах резонансной самоэкранировки сечения захвата на железе при разбавлении 10 барн представлены на рис. 5.

В верхней части рис. 5 приводятся детальные энергетические зависимости сечения захвата для стабильных изотопов железа Fe-54, Fe-56 и Fe-57 (изотоп Fe-58 не рассматривался, его вклад ~ 0.2%). В нижней части рисунка представлена мультигрупповая энергетическая зависимость отношения факторов самоэкранировки, полученных по методикам CALENDF и CONSYST, к факторам самоэкранировки, полученным по NJOY.

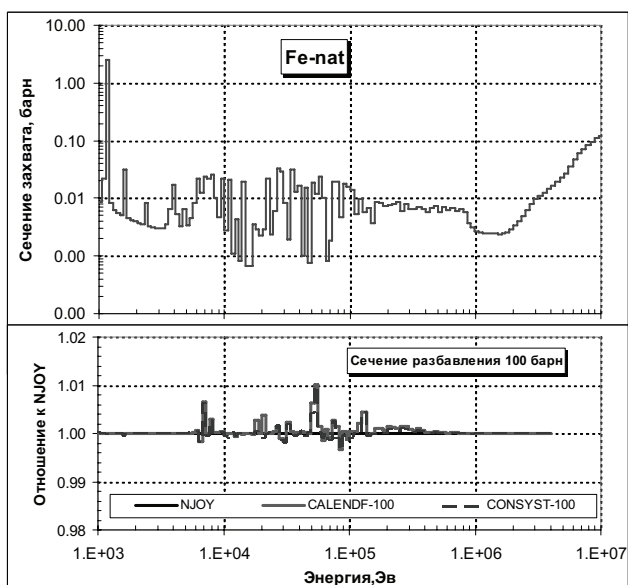


Рис. 2. Сравнение факторов резонансной самоэкранировки сечения захвата на железе при разбавлении 100 барн

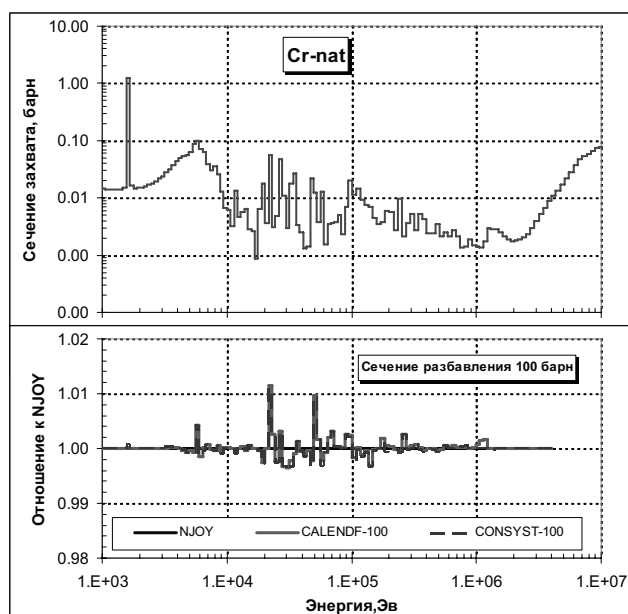


Рис. 3. Сравнение факторов резонансной самоэкранировки сечения захвата на хrome при разбавлении 100 барн

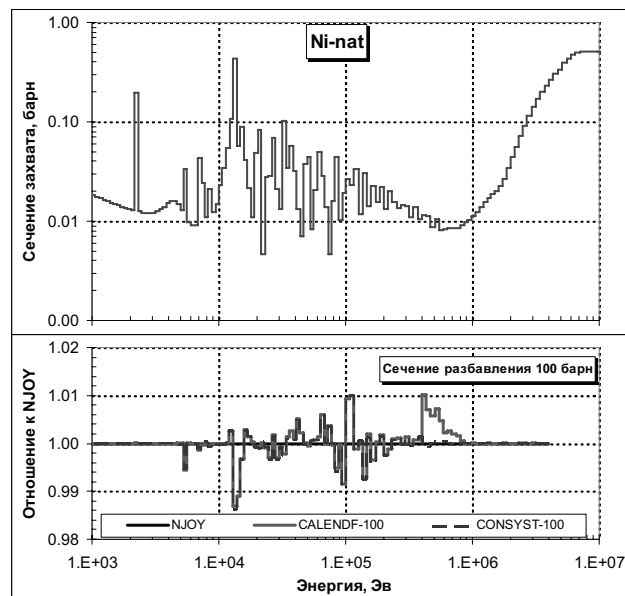


Рис. 4. Сравнение факторов резонансной самоэкранировки сечения захвата на железе при разбавлении 100 барн

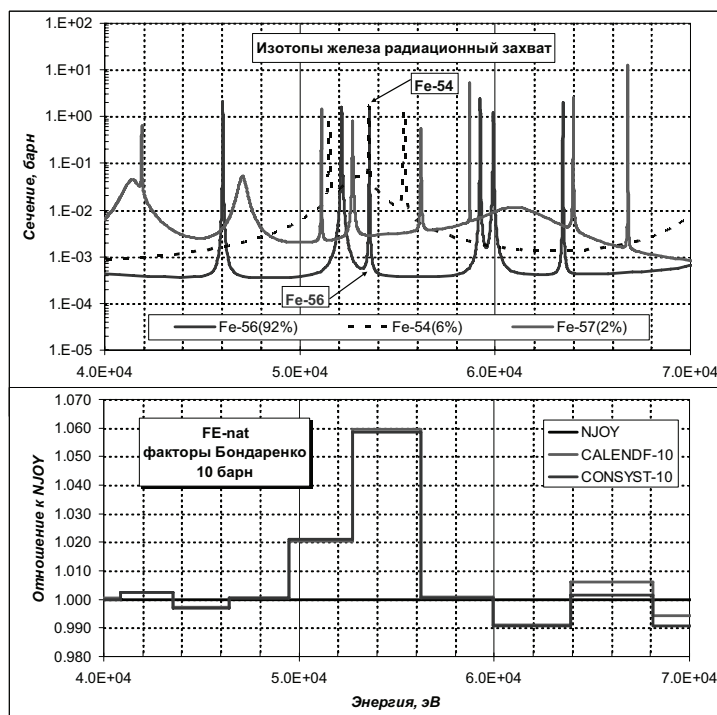


Рис. 5. Изучение причины расхождения факторов резонансной самоэкранировки на железе при разбавлении 10 барн

Из приведенного на рис. 5 сравнения видно, что максимальное различие в вычислении факторов самоэкранировки сечений захвата на железе наблюдается в области энергий, где происходит наложение резонансов Fe-54 ($E = 53.54$ кэВ) и Fe-56 ($E = 53.56$ кэВ), которое в методиках CALENDF и CONSYST описывается с заметной погрешностью.

ТЕСТИРОВАНИЕ СЕЧЕНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РАСЧЕТАХ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК КБР

В качестве объекта для тестирования полученных наборов констант природных смесей Fe, Cr, Ni, Mo были выбраны четыре модели критическихборок КБР-7, КБР-9, КБР10 и КБР-15 из международного справочника ICSBER [7], где изучалась величина k_{∞} и для которых характерна большая концентрация конструкционных материалов.

На первом этапе сравнения использовалась одна программа расчета критичности и разные наборы констант.

В качестве источника нейтронных данных была взята библиотека микроконстант БНАБ. Расчет проводился для двух вариантов наборов констант. В первом варианте использовались наборы сечений стабильных изотопов, составляющих природную смесь конструкционных материалов; во втором – приготовленные наборы констант для природной смеси этих материалов.

Макроконстанты для каждого варианта бенчмарк-модели критической сборки были подготовлены с помощью программы CONSYST.

Величина k_{∞} была вычислена с помощью программы ММККЕНО [8], в которой реализован метод Монте Карло. Расчетное число нейтронных историй составляло ~ 510 000.

Результаты расчета величины k_{∞} приведены в табл. 1.

На втором этапе для сравнения были взяты результаты расчетов, полученные с помощью «реперной» программы MCNP5 [9], в которой используются наиболее детальные нейтронные данные из библиотеки РОСФОНД (табл. 2).

Таблица 1

Результаты расчета величины k_{∞} для гомогенныхборок КБР в 299-групповом приближении с использованием сечений для природной смеси и по изотопам

Сборка	Расчет k_{∞}		Отношение изотопы/смесь
	данные по изотопам	природная смесь	
КБР-7(Ni)	1.0363±0.0004	1.0364±0.0003	0.9999
КБР-9 (SS)	1.1081±0.0002	1.1081±0.0002	1.0000
КБР-10(Mo)	1.0507±0.0002	1.0510±0.0002	0.9997
КБР-15(Cr)	1.1605±0.0004	1.1609±0.0003	0.9997

Таблица 2

Сравнение результатов расчета k_{∞} , полученных по MCNP и ММККЕНО

Сборка	MCNP	Расчет k_{∞}	
		данные по изотопам	природная смесь
КБР-7(Ni)	1.0368	~0.05%	~0.04%
КБР-9 (SS)	1.1086	~0.05%	~0.05%
КБР-10(Mo)	1.0501	~0.06%	~0.09%
КБР-15(Cr)	1.1641	~0.36%	~0.32%

Из сравнения полученных данных видно, что для сборок KBR-7 (никель), KBR-9 (нержавеющая сталь), KBR-10 (молибден), KBR-15 (хром) расхождение в k_{∞} со значениями, посчитанными по программе MCNP, не превышает 0.5% и, таким образом, можно констатировать хорошее согласие расчетных результатов.

Таким образом, из результатов сравнения, приведенных в табл. 1 и 2, можно отметить, что

- сформированные наборы констант для естественной смеси протестированы в расчетах величины k_{∞} для четырех критических бенчмарк-моделей.
- расчеты по программе MMCKENO с использованием констант стабильных изотопов и констант для естественной смеси согласуются с точностью $\sim 0.05\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы разработана и апробирована методика получения групповых констант материалов – смесей изотопов с помощью программы CONSYST. В основе полученных наборов констант лежат оцененные нейтронные данные из библиотеки РОСФОНД. Методика проверена в сравнении с аналогичными данными, полученными с помощью других методик (NJOY и CALENDF). Показано, что по основным нейтронным сечениям методики согласуются друг с другом с точностью $\sim 0.01\%$. Наблюдаются небольшие различия в блокированных резонансных сечениях, величина которых зависит от энергии и сечения разбавления нуклида в среде.

Проведена верификация сформированных наборов констант естественной смеси для основных конструкционных материалов в расчетах величины k_{∞} для критических бенчмарк-моделей сборок КБР из международного справочника ISCBER. Показана согласованность результатов расчета k_{∞} по программам MMCKENO и MCNP5 для сборок КБР-7(Ni), КБР-09(SS), КБР-10(Mo), КБР-15(Cr) в пределах менее 0.5%.

Литература

1. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н., Манохин В.Н., Николаев М.Н., Проняев В.Г. РОСФОНД – российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. – 2007. – Вып. 1-2.
2. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения/Препринт ФЭИ-2828. – Обнинск, 2000.
3. MacFarlane R.E. et al. NJOY97.0 Code System for Producing Pointwise and Multigroup Neutron and Photon Sections from ENDF/B Data. RSIC Peripheral Shielding Routine Collection, PSR-368.
4. CALENDF-2005: User Manual, France 2006 CEA.
5. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Бондаренко И.И., Николаев М.Н. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. – М. Атомиздат, 1964.
6. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1: Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. – 1996. – Вып. 1. – С. 59.
7. «Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments», Handbook NEA/NSC/DOC(95)03, 2008.
8. Блыскавка А.А., Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программный комплекс CONSYST / MMCKENO для расчета ядерных реакторов методом Монте-Карло в многогрупповом приближении с индикатрисами рассеяния в P_N -приближении. – «Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов». Сборник трудов семинара «Нейтроника-99». Обнинск, 26-28 октября, 1999
9. Forrest B.B., Booth T.E., et al. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. Overview and Theory. V. I – LA-UR-03-1987, LANL, (2003).

Поступила в редакцию 2.02.2011

УДК 621.039.51

The Technique of Calculation of Neutron Group Constants for Materials – Mixtures of Isotopes in the ABBN-System \ A.A. Peregudov, V.N. Kosheev, G.N. Manturov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 9 titles.

The work presents a technique for calculation of neutron group constants for materials – mixtures of isotopes by using the code CONSYST, which is one of the main part of the ABBN constants system, and using neutron group constants for stable isotopes as input data. The calculated neutron group constants are compared with results of similar calculations using NJOY and CALENDF codes. This technique is tested through the criticality calculations of a series of benchmark models of fast critical assemblies from the ICSBEP Handbook.

УДК 621.039.578:629.7

The Search an Optimal Locations Scheme for Thermionic Fuel Elements in the Core of Space Thermionic Conversion Reactor \ P.A. Alekseev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 10 pages, 4 illustrations. – References, 12 titles.

In this paper, the problem of the search of an optimal locations scheme for thermionic fuel elements (TFE) in the core of advanced thermionic conversion reactor of TOPAZ type, which minimize fission power peaking in the radial direction of the core, is solved. The location scheme includes the radiuses of TFE location rings and the number of TFE in each ring.

By means of genetic algorithm (GA) method, the decision variables, which may satisfy the delivery constraints, are searched. The decision, obtained by GA, is researched and then, trade-off solution is chosen among them.

УДК 621.039.58

Representation of the Declarative Knowledge Acquired from NPP Emergency Procedures \ A.N. Anokhin, N.V. Pleshakova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 14 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 14 titles.

The paper concerns of the problem of knowledge representation for computerized procedure systems dedicated to support NPP main control room operators. The methodology for representation of the declarative knowledge about process equipment and technological mediums is proposed on the basis of semantic network theory. The process equipment has been hierarchically structured from the point of view of functional approach to control process. Possible operational states and modes of equipment have been studied. The intensional semantic networks which define knowledge base structure have been developed based on the finding from this analysis. The knowledge about particular equipment and technological mediums are represented as the extensional networks and the patterns which specify diagnostic symptoms.

УДК 519.23/.24/.25

Statistical Analysis of Failure Data of Nuclear Power Plant Equipment in Non-Homogeneous Failure Flow \ A.V. Antonov, K.A. Belova, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 6 tables, 7 illustrations. – References, 20 titles.

The technique of reliability coefficients assessment for nuclear power plant equipment is described. This technique allow to take into account possible non-homogeneity of failure flow. Specificity of incoming statistical failure data is pointed. The hypothesis test of incoming data nature is proposed. Application of normalizing flow function model for calculating of required reliability coefficients is described. Practical example of analysis of failure data for some elements of Bilibino nuclear power plant control and protection system is given.