

ОЦЕНЕННЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ФАЙЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ В МАТЕРИАЛАХ, ОБЛУЧАЕМЫХ НЕЙТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 150 МэВ

**А.Ю. Конобеев, Ю.А. Коровин, Г.Б. Пильнов, А.Ю. Станковский,
А.А. Андрианов**

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



Создана новая библиотека, которая включает в себя нейтронные файлы оцененных ядерных данных для исследования переноса частиц в материалах, облучаемых нейтронами – «Transport Evaluated Files, TREF». Файлы, входящие в библиотеку, включают также данные необходимые для расчета основных нейтронно-физических характеристик ядерно-физических установок. Файлы представлены для 242 нуклидов и природных соединений с $Z = 8 - 82$ в энергетическом диапазоне первичных нейтронов от 10^{-5} эВ до 150 МэВ. Ниже 20 МэВ данные взяты из международных библиотек ENDF/B-VI (Revision 8), JENDL-3.3 и JEFF-3.0. Оценка энергетических и угловых распределений выхода частиц для энергий выше 20 МэВ проводилась с использованием программы ALICE/ASH и анализа доступных экспериментальных данных. Файлы записаны в формате ENDF-6.

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в ядерных данных, в первую очередь, определяется целями, для которых они будут служить в дальнейшем. Развитие атомной энергетики и ее топливного цикла связано с разработкой инновационных реакторных установок [1]. Одним из типов таких инновационных установок являются ADS-системы (Accelerator-Driven System), управляемые внешним потоком высокоэнергетических заряженных частиц (в основном протонов), которые, попадая в «тяжелую» мишень, в результате реакций глубокого расщепления образуют множество вторичных частиц и легких ядер, в том числе значительное количество нейтронов, необходимых для управления работой подкритического реактора. Использование ADS-систем в будущем имеет широкое применение и предполагает в том числе трансмутацию радиоактивных отходов (РАО), включая минорные актиниды, сжигание плутония с целью его нераспространения, производство нейтронов для промышленного использования, а также различные другие пути использования [2].

Создание установок с энергетическим спектром частиц, значительно перекрывающим реакторный диапазон (до 20 МэВ), включая ADS-установки, требует расчета их

© А.Ю. Конобеев, Ю.А. Коровин, Г.Б. Пильнов, А.Ю. Станковский, А.А. Андрианов, 2004

физических характеристик. Для расчета интегральных характеристик, таких как эффективный коэффициент размножения, эффекты реактивности, в большинстве случаев оказывается достаточным ядерных данных в области энергий до 20 МэВ. Но для моделирования переноса нейтронов и протонов и расчетов выхода частиц, накопления продуктов глубокого расщепления, энерговыделений, радиационных повреждений материалов и многих других подобных задач, в которых приходится рассматривать отдельные элементы установок, необходимы достоверные оцененные ядерные данные в более широком энергетическом диапазоне – от нескольких килоэлектронвольт до нескольких гигаэлектронвольт.

ПОТРЕБНОСТИ В ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ

В настоящее время ADS-системы рассматриваются, в основном, как установки для трансмутации минорных актинидов и долгоживущих продуктов деления. И несмотря на то, что до сих пор не решен вопрос об эффективности использования ADS-установок для задач трансмутации в сравнении с геологическими захоронениями, в последнее время начали появляться библиотеки и отдельные файлы оцененных ядерных данных в диапазоне до 150 МэВ для расчета таких систем.

На сегодняшний день существуют следующие основные международные проекты по созданию библиотек оцененных ядерных данных для расчета реакторных установок:

- ENDF/B (Evaluated Nuclear Reaction Cross Section Libraries, США).
- JENDL (Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Япония).
- JEFF (Western European Joint Evaluated Fission and Fusion File, Европейский Союз).
- BROND (Библиотека рекомендованных оцененных данных, Россия).
- CENDL (Chinese Evaluated Nuclear Data Library, Китай).

Кроме этого, в различных странах проводятся работы по оценке ядерных данных, но, как правило, создаваемые файлы и библиотеки включены в перечисленные выше проекты.

Библиотеки представляют собой набор файлов оцененных ядерных данных, описанных в установленном формате. Наиболее универсальным и используемым форматом на сегодняшний день является формат ENDF-6.

Представленные выше библиотеки включают в себя различные файлы оцененных ядерных данных в энергетическом диапазоне до 20 МэВ. Библиотеки ENDF/B-VI (выпуск 8) и JENDL/HE содержат нейтронные и протонные файлы до 150 МэВ и 3 ГэВ соответственно.

К сожалению, существующие библиотеки не в полном объеме удовлетворяют современным потребностям в оцененных ядерных данных для расчета и создания установок, работающих на основе высокоэнергетических частиц, включая ADS-установки. Библиотека ENDF/B-VI включает в себя нейтронные и протонные файлы оцененных ядерных данных для 329 нуклидов, и только для 57 из этих нуклидов проведены оценки до 30 МэВ или 150 МэВ. А в библиотеке JENDL/HE представлены файлы только для 66 нуклидов.

Для расчета ADS-систем необходим более широкий спектр ядерных данных. В этой связи актуальной задачей является продолжение работ, связанных с расширением существующих нейтронных и протонных файлов оцененных ядерных данных до 150 МэВ.

СТРУКТУРА БИБЛИОТЕКИ «TREF»

В качестве попытки решения проблемы недостатка ядерных данных для расчета инновационных систем, авторами была создана библиотека нейтронных данных, со-

держащая оцененные данные для широкого диапазона стабильных нуклидов с $Z = 8 - 82$ и $A = 17 - 204$ в энергетическом диапазоне $0 - 150$ МэВ. В файлы, входящие в библиотеку, включена информация для 242 нуклидов и природных соединений 68 химических элементов.

Нейтронные файлы библиотеки «TREF» включают в себя данные о полных сечениях реакций, сечениях упругого и неупругого рассеяния, сечениях образования нуклонов и составных частиц, сечениях радиационного захвата, угловых и энергетических распределениях вторичных нейтронов, протонов, дейтронов, тритонов, ^3He , α -частиц и гамма-квантов.

Полученные авторами ядерные данные в области энергий первичных нейтронов выше 20 МэВ были согласованы с оцененными данными из библиотек ENDF/B-VI (версия 8), JENDL-3.3 и JEFF-3.0. Информация о библиотеках – источниках ядерных данных в энергетическом диапазоне до 20 МэВ, вошедших в файлы библиотеки «TREF», представлена в табл. 1.

Таблица 1

Список вошедших в библиотеку «TREF» нуклидов, для которых данные при энергиях нейтронов ниже 20 МэВ взяты из международных библиотек оцененных ядерных данных

| Библиотека | Нуклиды |
|-----------------------|--|
| JENDL-3.3 | ^{70}Ge , $^{130,132}\text{Ba}$, ^{138}La , $^{162,164,168,170}\text{Er}$, $^{196,198,199,200,201,202,204}\text{Hg}$, ^{204}Pb |
| JEFF-3.0 | $^{36,38,40}\text{Ar}$, $^{\text{nat}}\text{Zn}$, $^{\text{nat}}\text{Os}$, $^{\text{nat}}\text{Pt}$, $^{\text{nat}}\text{Ti}$ |
| ENDF/B-VI (Release 8) | Остальные 219 нуклидов и природных соединений. |

МЕТОДЫ РАСЧЕТА СЕЧЕНИЙ

Полные сечения реакций и сечения упругого и неупругого рассеяния

Полные сечения реакций, дифференциальные сечения упругого и неупругого рассеяния, угловые распределения вторичных нейтронов при энергиях первичных нейтронов выше 20 МэВ были рассчитаны по оптической модели с использованием программы ECIS [3]. Для большинства нуклидов расчеты проводились с использованием оптического потенциала из работы [4]. Пример расчета полных сечений взаимодействий нейтронов с ядрами ^{55}Mn и ^{127}I , проведенного с применением различных оптических потенциалов из работ [4-9] представлен на рис. 1; видно, что сечения, рассчитанные с использованием потенциала [4], лучше согласуются с результатами экспериментальных работ [10-12].

Использование потенциалов [4] дает хорошее согласие с экспериментальными данными для большинства ядер с $Z > 12$. Для описания поведения сечений в области более легких ядер (^{17}O , ^{19}F , ^{23}Na , $^{\text{nat}}\text{Mg}$) в энергетическом диапазоне:

- 20–50 МэВ использовались функции, определяемые потенциалами [6] и [4],
- 50–150 МэВ – [6], [4],

а также экспериментальные данные из библиотеки EXFOR. Сечения упругого рассеяния нейтронов на ядрах $^{\text{nat}}\text{Mg}$ и ^{19}F , полученные с использованием различных потенциалов [4-6] в области 20-150 МэВ, приведены на рис. 2. Результаты расчета для ^{19}F полного сечения реакций и сечения упругого рассеяния налетающих нейтронов, полученных с использованием различных ядерных оптических потенциалов и результатов их согласования, представлены на рис. 3.

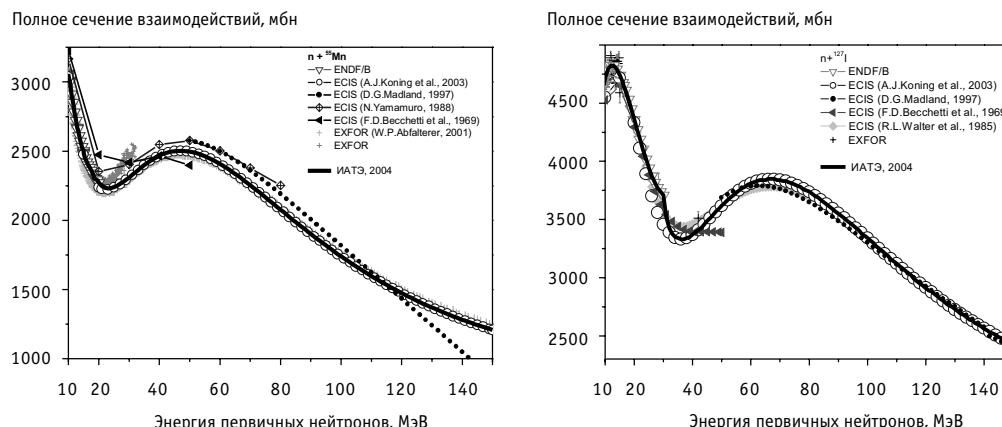


Рис. 1. Полные сечения взаимодействий нейтронов с ядрами ^{55}Mn и ^{127}I (расчеты выполнены с использованием программы ECIS [3] на основе различных оптических потенциалов [4-9]; экспериментальные данные взяты из работ [10-12])

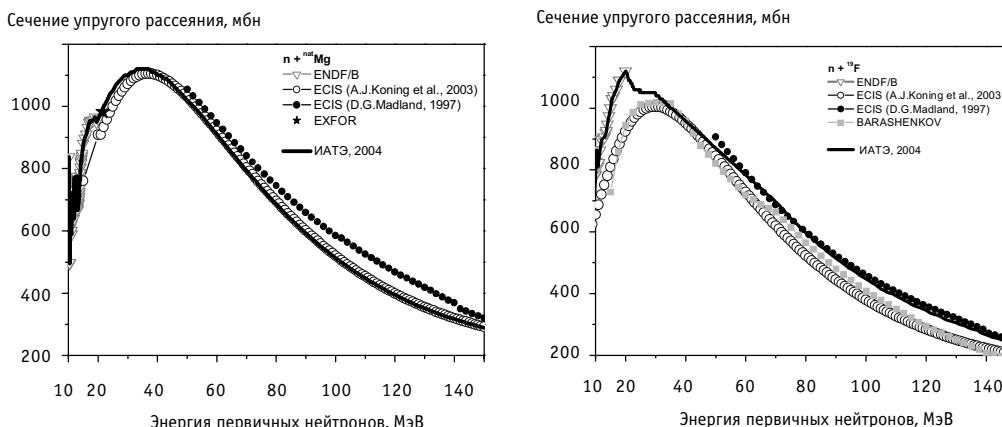


Рис. 2. Сечение упругого рассеяния нейтронов на ядрах ^{24}Mg и ^{19}F (параметры оптических потенциалов взяты из работ [4, 5], экспериментальные данные – из работы [13])

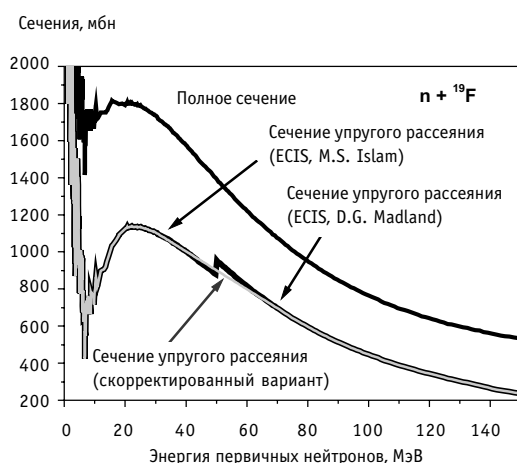


Рис. 3. Полное сечение взаимодействий и сечение упругого рассеяния нейтронов на ядре ^{19}F . Скачок в районе 50 МэВ, вызванный использованием различных потенциалов [5, 6], сглаживался методом линейной интерполяции

Спектры испускаемых частиц

Оценка дважды дифференциальных сечений выхода частиц (n , p , d , t , ^3He , α) и γ -квантов проводилась с использованием программы ALICE/ASH [14] и анализа доступных экспериментальных данных.

Программа ALICE/ASH представляет собой модифицированную версию программы ALICE [15-19]. Основные изменения затронули алгоритмы описания испускания составных частиц (d , t , ^3He , α), быстрых γ -квантов и вычисления плотностей ядерных уровней.

Для вычисления предравновесных спектров выхода нуклонов (n , p) ис-

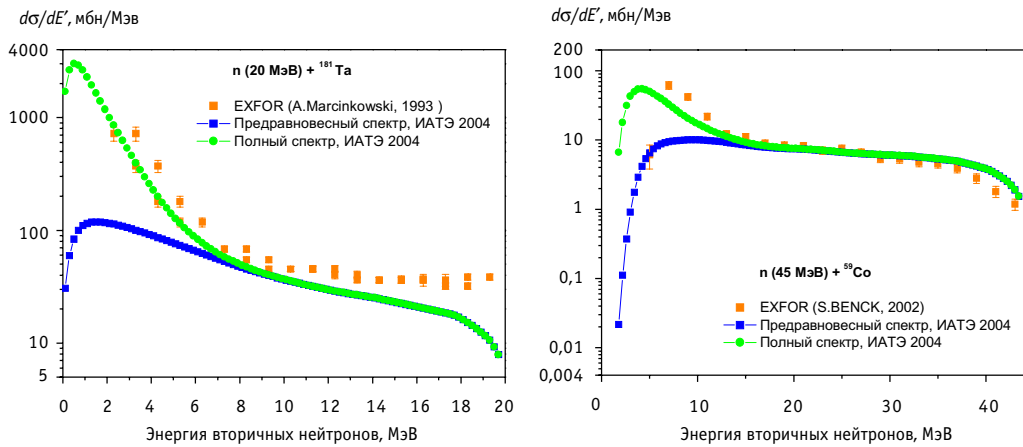


Рис. 4. Энергетические распределения выхода вторичных нейтронов и протонов при взаимодействии нейтронов с ядрами ^{181}Ta и ^{59}Co (расчеты выполнены с использованием программы ALICE/ASH [14]; экспериментальные данные взяты из работ [23, 24])

пользовалась гибридная экситонная модель, зависящая от геометрии [15]. Плотности экситонных состояний вычислялись с использованием формулы Эриксона-Струтинского [20-21]. Плотность экситонных состояний с тремя экситонами рассчитывалась с учетом конечной глубины потенциальной ямы [22].

Результаты расчета спектров выхода нуклонов для реакций (n, p) и (n, n') , выполненные с использованием программы ALICE/ASH, представлены на рис. 4.

Выход α -частиц рассчитывался в рамках коалесцентной модели с учетом подхвата частиц [25], объединенной с гибридной экситонной моделью [26,27]. Для расчета спектров выходов дейтронов, тритонов и ^3He использовалась модель [28]. Вклад прямого канала в спектр выхода дейтронов оценивался с использованием феноменологического подхода [29]. В качестве примера на рис. 5 представлены экспериментальные данные и результаты расчета спектра выхода α -частиц и дейтронов при взаимодействии нейтронов с энергией 45 МэВ с ядром ^{59}Co .

Для расчета энергетических распределений предравновесных γ -квантов использовался подход, изложенный в [31, 32].

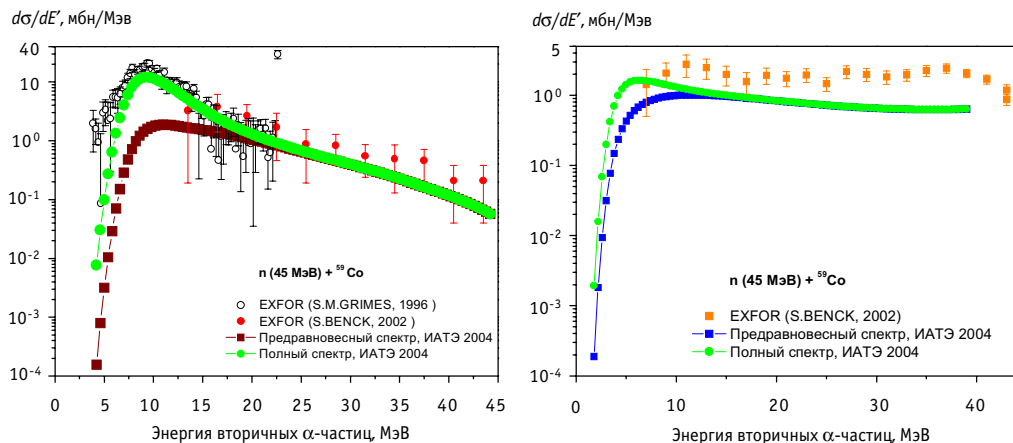


Рис. 5. Энергетические распределения выхода составных частиц при взаимодействии нейтронов с ядрами ^{59}Co (расчеты выполнены с использованием программы ALICE/ASH [14]; экспериментальные данные взяты из работ [24, 30])

Вычисление равновесных спектров частиц и γ -квантов проводилось с помощью модели Вайскопфа. Учитывалась конкуренция частиц и γ -квантов [33]. Плотность ядерных уровней для средних и тяжелых ядер рассчитывались на основе обобщенной сверткекучей модели [34].

ФОРМАТ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ

Файлы библиотеки «TREF» записаны в формате ENDF-6 с использованием стандартных секций. Информация о содержании файлов представлена в секциях MF = 1/MT = 451. Полные сечения, сечения упругого и неупругого рассеяния, сечения реакций представлены в файле MF = 3, угловые распределения – в секциях MF = 4/MT = 2, множественность нейтронов и энергетические спектры выхода частиц – в секциях MF = 6/MT = 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами создана библиотека оцененных ядерных данных «TREF», содержащая нейтронные данные для 242 нуклидов с $Z = 8 - 82$ в энергетическом диапазоне до 150 МэВ. Представленная библиотека может рассматриваться как дополнение к существующей современной библиотеке LA-150 [35]. В настоящее время ведутся работы по расширению набора нуклидов «TREF», для включения в библиотеку данных о реакциях под действием протонов.

Созданная библиотека позволяет осуществлять решение задач, связанных с переносом частиц, энерговыделением и защитой инновационных ядерных установок от ионизирующих излучений.

Литература

1. Guidelines for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles/Phase-IA Report-Extended Version. – Vienna, May 2003.
2. Research and Development Needs for Current and Future Nuclear Energy Systems. // OECD/ NEA No. 4453. – 2003.
3. Raynal J. ECIS96 code, unpublished.
4. Koning A.J., Delaroche J.P. // Nucl. Phys. – A713. – 231. – 2003.
5. Madland D.G. Spec. Mtg. Nucleon-Nucleus Opt.Mod. to 200 MeV // OECD/NEA, Paris. – 1997.
6. Islam M.S., Finlay R.W., Petler J.S., Rapaport J., Alarcon R. // Phys.in Med. and Biol. – 33. – 315. – 1988.
7. Yamamuro N. / Int.Conf.on Nucl. Data for Science and Tech., Mito. – 1988. P.489.
8. Becchetti F.D., Greenlees Jr., Greenlees G.W. // Phys. Rev. 182. – 1190. – 1969.
9. Walter R.L., Guss P.P. / Rad. Effects 92, Santa Fe Conf. Proc. – 1079. – 1985.
10. Abfalterer W.P., Bateman F.B., Dietrich F.S., Finlay R.W., Haight R.C., Morgan G.L. Measurement of neutron total cross sections up to 560 MeV // Jour.of Physics, Part C (Solid State Physics). – V.63. – 044608. – 2001.
11. Cierjacks S., Forti P., Kopsch D., Kropp L., Nebe J., Unseld H. High resolution total neutron cross sections for NA, CL, K, V, MN and CO between 0.5 and 30 MeV / Report KFK-1000, (SUPP.2), – 1969.
12. Deconninck G., Gonze A., Macq P., Meulders J.P. Total cross-sections for 28.4 MeV neutrons // Journal de Physique. – 22. – 652. – 1961.
13. Olsson N., Trostell B., Ramstroem E., Holmqvist B. Microscopic and conventional optical model analysis of neutron elastic scattering at 21.6 MeV over a wide mass range. // Nuclear Physics, Section A. – 472. – 237. – 1987.
14. Konobeyev A.Yu., Korovin Yu.A., Pereslavytsev P.E. Code «ALICE/ASH» for Calculation of Excitation Functions, Energy and Angular Distributions of Emitted Particles in Nuclear Reactions. / Report INPE, Obninsk, February. – 1997.
15. Blann M. and Vonach H.K. // Phys. Rev. – C28, – 1475. – 1983.
16. Blann M. and Bisplinghoff J. Code ALICE/LIVERMORE 82 / Report Livermore Lawrence Laboratory,

UCID-19614. – 1982.

17. *Blann M.* Code ALICE/85/300. / Report of Livermore Lawrence Laboratory, UCID-20169. – 1984.

18. *Blann M.* ALICE 87 (Livermore) precompound nuclear model code / Report IAEA-NDS-93 REV.0, 1988.

19. *Blann M.* Code ALICE 92. – 1992.

20. *Strutinsky V.M.* / In: Proc. Int. Congr. Phys. Nucl. Appl.. – Paris, 1958. – P. 617.

21. *Ericson T.* // Adv. Phys. 9. – 425. – 1960.

22. *Betak E. and Dobes J.* // Z.Phys. A279, – 319. – 1976.

23. *Marcinkowski A. et al.* // Nucl. Phys. – A561. – 387. – 1993.

24. *Benck S. et al.* // J. Phys. – G28. – 2823. – 2002.

25. *Iwamoto A. and Harada K.* // Phys. Rev. – C26, – 1821. – 1982.

26. *Konobeyev A.Yu. and Korovin Yu.A.* // Kerntechnik 59. – 72. – 1994.

27. *Konobeyev A.Yu., Lunev V.P. and Shubin Yu.N.* // Acta Physica Slovaca 45. – 705. – 1995.

28. *Sato N., Iwamoto A. and Harada K.* // Phys. Rev. C28. – 1527. – 1982.

29. *Konobeyev A.Yu. and Korovin Yu.A.* // Kerntechnik 61. – 45. – 1996.

30. *Grimes S.M. et al.* // Nucl. Sci. Eng. 124, – 271. – 1996.

31. *Oblozinsky P.* // Phys. Lett., B215, – 597. – 1988.

32. *Конобеев А.Ю., Коровин Ю.А., Переславцев П.Э.* // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – № 1.

33. *Blann M., Reffo G., Fabri F.* // Nucl. Instr. Meth. – A265. – 490. – 1988.

34. *Ignatyuk A.V., Istekov K.K. and Smirenkin G.N.* // Ядерная физика. – 1979. – № 29. – 875.

35. *Chadwick M.B., Young P.G., MacFarlane R.E., Moller P., Hale G.M., Little R.C., Koning A.J., Chiba S.* LA150 Documentation of Cross Sections, Heating, and Damage // Los Alamos National Laboratory report LA-UR-99-1222. – 1999.

Поступила в редакцию 24.11.2004

substrates differ in 3 – 4 times. The quantities of power of adhesion make 88 – 104 mJ/m², the quantities of cohesion lie in an interval from 64 up to 86 mJ/m². Ability to adsorb contaminations for all latex films is approximately identical. The prospects of application of this type of latexes are estimated as deactivating coats for NPP.

УДК 621.039.51

Transport Evaluated Files to Study Particle Transport in Materials Irradiated by Neutrons with Energies up to 150 MeV \ A.Yu. Konobeyev, Yu.A. Korovin, G.B. Pilnov, A.Yu. Stankovskiy, A.A. Andrianov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 35 titles.

A new evaluated neutron nuclear data library «Transport Evaluated Files, TREF» to study neutron transport in materials irradiated by neutrons have been elaborated. The files constituting the library contain nuclear data for neutronics calculations for 242 nuclides ranging with atomic number from 8 to 82 in the energy region of primary neutrons from 10⁻⁵ eV to 150 MeV. Below 20 MeV data are taken mainly from ENDF/B-VI (Revision 8) and for some nuclides – from JENDL-3.3 and JEFF-3.0 libraries. The evaluation of emitted particle energy and angular distributions at the energies above 20 MeV was performed with the help of the ALICE/ASH code and the analysis of available experimental data. The results of calculation were adjusted to the data from ENDF/B-VI, JENDL-3.3 or JEFF-3.0 at the neutron energy equal to 20 MeV. The files are written in ENDF-6 format.

УДК 621.039.54

The Method of Calculation of Radiation Conditions around the Shipping Casks with SNF \ V.A. Opalovsky, G.V. Tikhomirov, E.F. Kryuchkov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 10 titles.

The exploitation of nuclear reactors result in constitution of spent nuclear fuel (SNF). It is necessary to know radiation characteristics of SNF independently of the scenario of management with SNF. There are examination of radiation characteristics on the phases of storage and transportation in shipping casks presented in this article. The characteristic property of this article is the calculate of SNF characteristics by the combined using of SCALE and MCNP programs. The complex SCALE is using for calculations of radiation source. The MCNP program is using for calculations of transfer of radiation.

УДК 621.039.526: 621.039.546.8

Hydraulic Test Facility for Testing of Model Nuclear Reactor \ E.F. Avdeev, I.A. Chusov, A.Ya. Ustujanin, V.V. Maksimovskiy, D.S. Lazikyan, V.A. Levchenko, S.V. Borodastov, I.N. Leonov, V.A. Belugin, Yu.D. Levchenko, Yu.S. Yur'ev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 14 pages, 3 tables, 8 illustrations. – References, 8 titles.

Describing of the main design and hydraulic characteristics of the «MR» test facility created in the «Thermophysics» department is presented in this paper. Equipment, circulating loop of the coolant, hydraulic two-loop reactor model and measuring systems are also described. Scientific and education purposes of this test facility are presented.

УДК 621.039.542: 536.24

Heat Exchange to Lead Coolant in the Annual Gap at Controller Oxygen Content \ A.V. Beznosov, A.V. Semyonov, S.S. Pinaev, A.D. Efanov, Yu.I. Orlov, A.V. Zhukov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Shools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 7 illustratins. – Reference, 2 titles

Results of experimental investigations of a convective heat exchange are resulted in leads heat-transfer agent in an annular gap in conditions of regulating and the surveillance of oxygen content.