

НЕКОТОРЫЕ МАКРОХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНЫХ ЗОН БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Г.Л. Хорасанов, А.И. Блохин

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



Для российских реакторов средней мощности БН-600, БРЕСТ-300 и РБЕЦ-340 (РБЕЦ-М) на основе рассчитанных по MCNP5 нейтронных спектров определены такие параметры активных зон, как средняя энергия нейтронов, одногрупповые сечения радиационного захвата нейтронов ураном-238 и сечения деления америция-241. Для реактора РБЕЦ-340 эти параметры рассчитаны как для случая применения штатного свинцово-висмутового теплоносителя, так и для варианта с мало поглощающим и слабо замедляющим нейтроны теплоносителем на основе изотопа свинца-208, рассмотренного по инициативе авторов статьи.

Ключевые слова: быстрые реакторы БН-600, БРЕСТ-300, РБЕЦ-340, средние энергии нейтронных спектров, теплоносители, теплоноситель из свинца-208, одногрупповые сечения деления и радиационного захвата, уран-238, америций-241.

Key words: BN-600, BREST-300, RBEC-340 fast reactors, average energy of neutron core reactor spectra, coolants, coolant from lead-208, one-group fission and radiative capture cross-sections, uranium-238, americium-241.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в литературе широко обсуждаются нейтронно-физические характеристики ряда легких и тяжелых металлов и сплавов: натрия, свинца-висмута, свинца и других, расплавы которых могут служить для съема тепла в энергонапряженных ядерно-энергетических установках (ЯЭУ), в том числе быстрых реакторах (БР) и ускорительно-управляемых системах (УУС) [1–4]. Одним из важных параметров, по которым можно сравнивать уже реализованные или предлагаемые реакторы, является величина средней энергии нейтронов, которая наряду с другими характеристиками активной зоны определяется также замедлением нейтронов в теплоносителе. Теплоноситель, приводящий к ужесточению нейтронного спектра, может в определенной степени влиять на величины одногрупповых сечений деления младших актинидов, добавляемых в малых количествах к основному топливу. Наконец, одногрупповые сечения захвата нейтронов ураном-238, которые характеризуют воспроизводство топлива, также в определенной степени определяются свойствами теплоносителя. В статье под одногрупповыми сечениями радиационного захвата нейтронов и деления, $\langle \sigma(n, \gamma) \rangle$ и $\langle \sigma(n, f) \rangle$, понимаются

© Г.Л. Хорасанов, А.И. Блохин, 2012

соответствующие микроскопические сечения захвата и деления, усредненные по нейтронному спектру. Величины этих одnogрупповых сечений могут быть использованы для характеристики реактора с точки зрения воспроизводства топлива и трансмутации радиотоксичных нуклидов.

В статье в качестве теплоносителей БР рассматриваются натрий ^{23}Na , свинец природного состава (52.3% ^{208}Pb , 22.6% ^{207}Pb , 23.6% ^{206}Pb , 1.5% ^{204}Pb), эвтектическая смесь природного свинца (45%) и висмута (55%) и свинец, обогащенный до 100% изотопом ^{208}Pb . Последний характеризуется малыми, в два-три раза меньшими по сравнению с природным свинцом и свинцом-висмутом, величинами микроскопического сечения захвата в спектре быстрых нейтронов, $E_n > 50$ кэВ, а при промежуточных энергиях нейтронов, $E_n < 50$ кэВ, разница в величинах микроскопических сечений составляет несколько порядков. Это дает основания отнести свинец-208 к теплоносителю с малым поглощением нейтронов, т.е. с новыми потребительскими свойствами для перспективных БР и УУС.

МЕТОД РАСЧЕТА

Решалась задача нахождения спектров нейтронов в АЗ реакторов БН-600 [5], БРЕСТ-300 [6] и РБЕЦ-340 [7] и по полученным спектрам рассчитывались средние энергии нейтронов и одnogрупповые сечения радиационного захвата нейтронов ураном-238 и деления америция-241 в нейтронном спектре АЗ реакторов.

Спектры нейтронов рассчитывались по программе MCNP5 [8] с использованием исходных данных рассматриваемых реакторов. При замене штатного свинцово-висмутового теплоносителя реактора РБЕЦ-340 на теплоноситель из свинца-208 все исходные данные, кроме топливной загрузки, оставались неизменными. Для выхода на критический режим, $k_{эфф} = 1.01$, обогащение плутонием в уран-плутониевом нитридном топливе было уменьшено со штатных 13,7 до 13,0% [9, 10]. Поправки на разные температуры теплоносителей на данном этапе расчетов не вносились.

По полученным нейтронным спектрам находились усредненные по спектрам одnogрупповые сечения захвата и деления для выбранного изотопа. Микроскопические сечения захвата нейтронов и деления, заимствованные из оцененных файлов библиотеки ENDF/B-VII.0, представлены в формате 28-групповой системы БНАБ [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средняя энергия нейтронов активной зоны

Результаты выполненных расчетов приведены в табл. 1, в которой представлены средние энергии нейтронов и одnogрупповые сечения захвата нейтронов ураном-238 и деления америция-241. В качестве топлива реакторов БРЕСТ-300 и РБЕЦ-340 рассматривается смесь моонитридов обедненного урана и энергетического плутония, полученного в результате регенерации топлива, выгруженного в реакторах ВВЭР и выдержанного после этого в течение ~20-ти лет. В реакторе БН-600 используется оксидное урановое топливо высокого обогащения. Активная зона всех рассматриваемых реакторов является трехзонной и состоит из зон малого (ЗМО), среднего (ЗСО) и большого (ЗБО) обогащения. Приведенные в табл. 1 величины энергии нейтронов усреднены по указанным трем зонам.

Из таблицы следует, что наибольшей средней энергией обладают нейтроны реактора БН-600 (0.4698 МэВ), наименьшей – нейтроны реактора БРЕСТ-300 (0.4137 МэВ). В реакторе РБЕЦ-340 замена свинцово-висмутового теплоносителя на свинцовый со 100%-ным обогащением по свинцу-208 приводит к увеличению

Таблица 1

Энергии нейтронов, одnogрупповые сечения захвата нейтронов ураном-238 и деления америция-241, усредненные по нейтронному спектру подзон ЗМО, ЗСО и ЗБО активных зон реакторов

Реактор	Теплоноситель	Средняя энергия нейтронов в АЗ, МэВ	Одnogрупповые сечения захвата нейтронов ядром U-238, барн	Предполагаемый КВА	Одnogрупповые сечения деления ядра Am-241, барн
БН-600	Na-23	0.4698	0.2965	0.96	0.2937
БРЕСТ-300	Pb-nat	0.4137	0.3089	1.00	0.2708
РБЕЦ-340	Pb-Bi	0.4169	0.1886	0.61	0.2745
РБЕЦ-340	Pb-208	0.4362	0.1874	0.61	0.2935

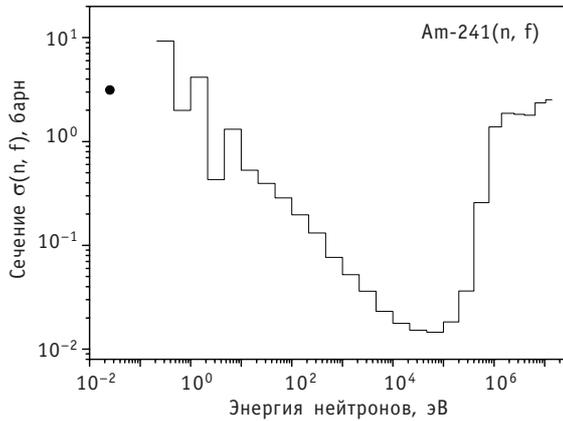


Рис. 1. Оцененные данные из библиотеки ENDF/B-VII.0 по микроскопическим сечениям деления америция-241, представленные в 28-групповом энергетическом разбиении БНАБ-93

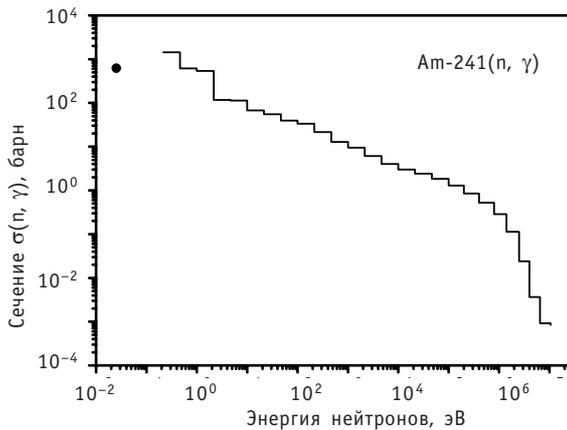


Рис. 2. Оцененные данные из библиотеки ENDF/B-VII.0 по микроскопическим сечениям радиационного захвата нейтрона америцием-241, представленные в 28-групповом энергетическом разбиении БНАБ-93

энергии нейтронов на 4.6%, до величины 0.4362 МэВ, усредненной по ЗМО, ЗСО и ЗБО.

Одnogрупповые сечения деления ядра Am-241

На рисунке 1 представлены в БНАБ-формате разбиения по энергетическим группам микроскопические сечения деления долгоживущего радиотоксичного изотопа Am-241. Сечения заимствованы из библиотеки ENDF/B-VII.0.

Видно, что сечения деления америция-241 растут при энергиях нейтронов выше 0.1 МэВ и достигают величины примерно двух барн при энергии нейтронов $E_n \geq 1$ МэВ. Такие же величины сечений деления могут достигаться при низких энергиях нейтронов, однако в этих областях энергий чрезвычайно велики сечения захвата нейтронов (рис. 2), т.е. только жесткий спектр нейтронов эффективен для выжигания америция-241 [13].

В таблице 1 приведены одnogрупповые сечения деления америция-241 в исход-

ных нейтронных спектрах рассматриваемых реакторов. Видно, что они растут с возрастанием средней энергии нейтронов. В реакторе РБЕЦ-340 при увеличении энергии нейтронов на 4.6% сечение деления Am-241 возрастает в среднем по АЗ на 6.9%.

Одногрупповые сечения захвата нейтронов ядром U-238

На рисунке 3 приведены микроскопические сечения захвата нейтронов ураном-238, который приводит в конечном счете к наработке плутония-239. Видно, что сечения растут с уменьшением энергии нейтронов, достигая максимума при энергиях нейтронов порядка 10 эВ. Спектры рассматриваемых быстрых реакторов содержат значительную долю нейтронов промежуточной энергии, до 20–25% нейтронов с энергией <50 кэВ [12]. Эта часть нейтронного спектра ответственна за относительно высокие

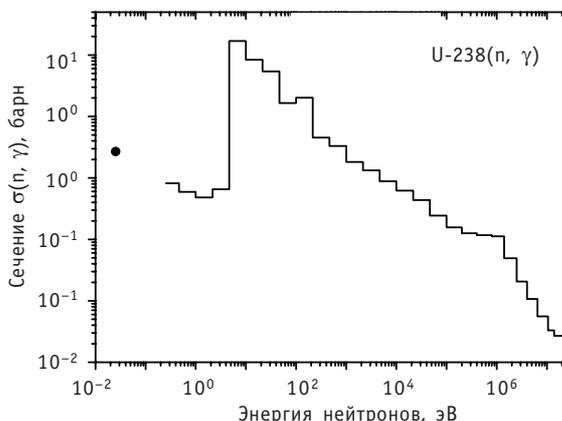


Рис. 3. Оцененные данные из библиотеки ENDF/B-VII.0 по микроскопическим сечениям радиационного захвата нейтрона изотопом уран-238 в диапазоне энергий нейтронов $10^{-2} - 2 \cdot 10^7$ эВ, представленные в 28-групповом энергетическом разбиении БНАБ-93

одногрупповые сечения захвата нейтронов ураном-238, которые для рассматриваемых реакторов составляют 0.2–0.3 барн (табл. 1). Наибольшая величина сечения, $\langle \sigma \rangle = 0.3089$ барн, получена для нейтронного спектра АЗ реактора БРЕСТ-300. Как известно, коэффициент воспроизводства топлива в активной зоне этого реактора $K_{\text{ВА}} \sim 1$. Поскольку $K_{\text{ВА}}$ пропорционален одногрупповым сечениям захвата нейтронов ураном-238, в таблице приводятся предполагаемые $K_{\text{ВА}}$ для остальных рассматриваемых реакторов.

Поскольку микроскопические сечения захвата нейтронов растут с уменьшением энергии нейтронов, то на периферии АЗ, в частности, боковых экранах, одногрупповые сечения захвата и, соответственно, коэффициент воспроизводства топлива $K_{\text{В}}$ могут существенно возрасти. Расчеты показывают, что средняя энергия нейтронов в боковом экране свинцово-висмутового реактора РБЕЦ-340 падает до величины $E_{\text{ср}} = 0.2509$ МэВ, при которой величина одногруппового сечения захвата урана-238 возрастет до величины $\langle \sigma(n, \gamma) \rangle = 0.5567$ барн. При использовании свинца-208 в качестве теплоносителя этого реактора величина средней энергии нейтронов бокового экрана возрастает до величины $E_{\text{ср}} = 0.2662$ МэВ, тем не менее, одногрупповое сечение захвата нейтронов ураном-238 растет до величины $\langle \sigma(n, \gamma) \rangle = 0.5771$ барн, что связано с небольшим ростом доли нейтронов низкой энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассчитаны некоторые макрохарактеристики активных зон быстрых реакторов средней мощности БР-600, БРЕСТ-300 и РБЕЦ-340 на основе расчетных по MCNP5 нейтронных спектров. Получены величины средней энергии нейтронов в активных зонах, одногрупповые сечения захвата нейтронов ураном-238 и деления америция-241.

2. Выявлены преимущества использования теплоносителя на основе высокообогащенного свинца-208 в реакторе РБЕЦ-340, что позволяет отнести свинец-

208 к перспективному материалу, который может быть использован в качестве теплоносителя в реакторах на быстрых нейтронах следующего поколения.

3. Вопросы экономической приемлемости теплоносителя на основе обогащенного свинца-208 требуют специального исследования, однако высокий процент содержания этого изотопа в природном свинце (52,3%) и успехи лазерных и центрифужных методов обогащения стабильных изотопов свинца открывают реальные возможности получения такого материала в количествах, измеряемых сотнями тонн.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ №08-08-92201-ГФЕН_а) и Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Литература

1. Митенков Ф.М. Перспективы развития быстрых реакторов – размножителей // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – Вып. 6. – С. 423-432.
2. Орлов В.В. Быстрые реакторы как основа крупномасштабной ядерной энергетики (По поводу статьи Ф.М. Митенкова «Перспективы развития быстрых реакторов-размножителей») // Атомная энергия. – 2003. – Т. 94. – Вып. 3. – С. 240-249.
3. Багдасаров Ю.Е., Кузнецов И.А., Камаев А.А. Сравнения натрия и тяжелого теплоносителя как охлаждающей среды для быстрого реактора / Сборник докладов конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». Т. 2. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – С. 482-495.
4. Шмелев А.Н., Куликов Г.Г., Глебов В.Б. и др. Безопасность быстрого реактора-выжигателя долгоживущих актиноидов, извлеченных из радиоактивных отходов // Атомная энергия. – 1992. – Т. 73. – Вып. 6. – С. 450-454.
5. Васильев Б.А., Кузавков Н.Г., Мишин О.В. и др. Опыт и перспективы модернизации активной зоны реактора БН-600 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №1. – С. 158-168.
6. Orlov V.V., Filin A.I., Tsikunov V.S., et al Tasks and Requirements for BREST-OD-300 Pilot and Demonstration Reactor Design / Proc. of the Conf. «Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology». V. 2. – Obninsk: SSC RF IPPE, 1999. – P. 411-418.
7. Алексеев П.Н., Васильев А.В., Микитюк К.О., Субботин С.А., Фомиченко П.А., Щепетина Т.Д. Оптимизация концептуальных решений для свинцово-висмутowego быстрого реактора РБЕЦ-М // Атомная энергия. – 2004. – Т. 97. – Вып. 2. – С. 115-125. <http://www.iaea.org/NuclearPower/SMR/crpi25001/html/>.
8. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-03-1987 (April, 2003).
9. Khorasanov G.L., Korobeynikov V.V., Ivanov A.P., Blokhin A.I. Minimization of an initial fast reactor uranium-plutonium load by using enriched lead-208 as a coolant // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – V. 239. – № 9. – P. 1703-1707.
10. Хорасанов Г.Л., Блохин А.И., Вальтер А.А. Новый теплоноситель из расплава свинца, обогащенного изотопом свинца-208, и возможность его получения из торий-содержащих руд и минералов для нужд атомной энергетики / Препринт ФЭИ-3204, 2011. – 24 с.
11. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1. Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. – 1996. – Вып. 1. – С. 59-98.
12. Хорасанов Г.Л., Блохин А.И. Макроскопические сечения радиационного захвата нейтронов теплоносителем, ураном-238 и технецием-99 в активной зоне подкритического реактора, охлаждаемого природным и обогащенным свинцом // Перспективные материалы, 2010. – Специальный выпуск №8. – С. 361-365.
13. Хорасанов Г.Л., Блохин А.И. Однoгрупповые сечения деления плутония и младших актиноидов в спектрах быстрого реактора, охлаждаемого свинцом-208 и свинцом-висмутом // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №4.

Поступила в редакцию 8.02.2012

ABSTRACTS OF THE PAPERS**УДК 621.039.51**

Application of the Undetermined Lagrangian Coefficients Method in the Analysis on Consistency of Experiments on the Example of Systems with High Enriched Uranium from ICSBEP Handbook \ Yu. E. Golovko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 13 pages, 13 tables, 3 illustrations. – References, 12 titles.

There are results of application of undetermined Lagrangian coefficients method in the analysis of consistency of experiments from ICSBEP Handbook in the current paper. It has been obtained biases to initial conditions of experiments (dimensions and concentrations) and to cross-sections based on the fact that criticality conditions in the real experiments have been strictly reached. Taking into account of these biases allows removing observed contradictions between calculation and experiment data which was not possible to remove using traditional Generalized list square method. Calculations have been made for experiments performed in SSC RF IPPE.

УДК 621.039.526: 621.039.59

Some Macroscopic Characteristics of Fast Reactor Cores of Intermediate Capacity \ G. L. Khorasanov, A. I. Blokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 13 titles.

Mean neutron energies, one-group cross sections of neutron capture by uranium-238 and fission of americium-241 for the Russian reactors BN-600, BREST-300 and RBEC-340 (RBEC-M) are calculated using MCNP5 code. For RBEC-340 these characteristics are calculated for the reactor with its standard lead-bismuth coolant as well as for this reactor cooled with Pb-208, as it was proposed by the authors of the paper.

УДК 621.039.58

Nuclear Safety of Melt Localisator Device for NPP with WWER Reactor Model \ N. V. Artamonov, A. S. Sidorov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 tables, 9 illustrations. – References, 19 titles.

Calculations of nuclear safety of melt localisator device for different types of NPP are presented. Basing on results analysis, recommendations regarding choice of sacrifice material for perspective melt localisator devices are given.

УДК 621.039.53

The Technique of Ultrasonic Testing of Two-Component Metal-Reflex Reaction Setup VC-50 \ R. A. Globa, M. A. Trofimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 4 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

In JSC «NIIAR» operated research single-circuit reactor setup made the VK-50 boiling like. Feature of the setup made the VC-50 is that the reactor vessel consists of a two-component metal (the metal core thickness of 100 mm and a cladding corrosion thickness of 20 mm). During the ultrasound control the body was found several problems: control of deposition and to identify areas of fusion, control of the base metal, bred for the welding. In the developed technique provides a solution to these problems, which has found practical application

УДК 621.039.524.44:697.93

Simulation of Dynamics of Steam-Gas Front Distribution in Thermal Insulation of Power Plants Pipelines \ P. A. Dvornikov, S. N. Kovtun, A. A. Budarin, V. P. Polionov, N. N. Titarenko, N. G. Roshchin, A. L. Matveev, E. L. Matveev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica»