

ОДНОГРУППОВЫЕ СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ И МЛАДШИХ АКТИНИДОВ В СПЕКТРАХ БЫСТРОГО РЕАКТОРА, ОХЛАЖДАЕМОГО СВИНЦОМ-208 И СВИНЦОМ- ВИСМУТОМ

Г.Л. Хорасанов, А.И. Блохин

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



На основе 28-групповой системы БНАБ рассчитаны одногрупповые сечения деления изотопов плутония и младших актиноидов (Pu-237 , Am-241 , -243 и Cm-246) в спектрах нейтронов быстрого реактора РБЕЦ-М со свинцово-висмутовым теплоносителем и теплоносителем из свинца-208. Показано, что средняя энергия нейтронов активной зоны реактора возрастает на 6.4%, а бокового экрана на 6.1% при замене свинцово-висмутового теплоносителя на теплоноситель из свинца-208. В результате ужесточения спектра нейтронов одногрупповые сечения деления плутония-240 возрастают на 6%, а америция-241 на 10%.

Ключевые слова: быстрый реактор, теплоноситель из свинца-208, одногрупповые сечения деления, плутоний, младшие актиноиды.

Key words: fast reactor, coolant from lead-208, one-group fission cross sections, plutonium, minor actinides.

ВВЕДЕНИЕ

В 1999-м и в последующие годы авторы статьи предложили тяжелый жидкометаллический теплоноситель с новыми потребительскими свойствами для ядерно-энергетических установок с промежуточным и быстрым спектром нейтронов [1]. Этот теплоноситель базируется на свинце, обогащенном свинцом-208, который характеризуется низким поглощением нейтронов и слабым их замедлением. Эти уникальные свойства свинца-208 позволяют рассчитывать на минимизацию начальной загрузки ядерным топливом быстрого критического реактора [2], а также на ужесточение нейтронного спектра активной зоны (АЗ) и бокового экрана (БЭ) быстрого реактора (БР). В реакторе со свинцом-208 выигрыш в коэффициенте размножения нейтронов $K_{эфф}$ составляет около 2–3%, а ужесточение нейтронных спектров может достигать 5–6% по сравнению с использованием других тяжелых жидкометаллических теплоносителей, таких как природный свинец или эвтектика свинца и висмута.

В статье приводятся результаты расчетов одnogрупповых сечений деления ряда изотопов плутония, нептуния, америция и кюрия, усредненных по рассчитанным нейтронным спектрам быстрого реактора РБЕЦ-М с тепловой мощностью 900 МВт и разными теплоносителями (Pb-208 и Pb-Bi). Проект реактора РБЕЦ-М был разработан в 2000 г. в Курчатовском институте и в дальнейшем получил развитие в рамках международного сотрудничества [3]. Штатным теплоносителем этого реактора является эвтектика свинца-висмута, а предложение по замене свинцово-висмутового теплоносителя на теплоноситель из высокообогащенного свинца-208 сделано авторами настоящей статьи.

МЕТОД РАСЧЕТА

Решалась задача нахождения спектров нейтронов в АЗ и БЭ реактора РБЕЦ-М и по полученным спектрам рассчитывались средние энергии нейтронов и одnogрупповые сечения деления изотопов плутония и америция-241 в спектре АЗ реактора и долгоживущих изотопов младших актинидов (МА) в спектре БЭ реактора.

Спектры нейтронов рассчитывались по программе MCNP/4C [4] с использованием исходных данных авторов проекта РБЕЦ-М. При замене штатного теплоносителя 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%. Поправки на разные температуры теплоносителей на данном этапе расчетов не вносились.

По полученным нейтронным спектрам находились усредненные по спектрам одnogрупповые сечения деления выбранных изотопов, при этом нейтронные спектры и групповые сечения деления изотопов были представлены в формате 28-ми групповой системы БНАБ [5]. В дальнейшем предполагается провести аналогичные расчеты с использованием библиотеки файлов оцененных сечений деления из библиотеки ENDF/B-VII.0 и провести сравнение с представленными в статье результатами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты выполненных расчетов приведены в табл.1, в которой представлены средние энергии нейтронов и одnogрупповые сечения деления основных топливных изотопов РБЕЦ-М: Pu-238, -239, -240, -241, -242 и Am-241. В качестве топлива 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 таблице 2 при-

Таблица 1

Энергии нейтронов и одnogрупповые сечения деления Pu-238, -239, -240, -241, -242 и Am-241, усредненные по нейтронному спектру первой (А1) подзоны АЗ РБЕЦ-М, охлаждаемой свинцом-208 либо эвтектикой свинца и висмута (в барнах)

Реактор и теплоноситель	Энергия нейтронов, МэВ	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Am-241
РБЕЦ-М, Pb-208	0,4246	1,1223	1,7091	0,4101	2,3079	1,6371	0,2981
РБЕЦ-М, Pb-Bi	0,3992	1,0997	1,7030	0,3871	2,3122	1,6387	0,2716
Относит. изменение, %	+6,3627	+2,0551	+0,3582	+5,9416	-0,1860	-0,0010	+9,7570

Таблица 2

Состав плутония и младших актиноидов, загружаемых в реактор РБЕЦ-М, в ядерных %

Np-237	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241	Pu-242	Am-241
0,10	1,19	63,05	21,50	4,07	4,12	5,87

веден состав энергетического плутония вместе с продуктами его распада, который смешивается с ~86% обедненного урана для получения загружаемого в АЗ топлива.

Из таблицы 1 следует, что замена штатного свинцово-висмутового теплоносителя на теплоноситель из свинца-208 приводит к увеличению усредненной по спектру энергии нейтронов на 6,4%. При этом наиболее сильно меняются одногрупповые сечения деления Pu-240 на 5,94% и Am-241 на 9,76%, которые, практически, не делятся при энергиях нейтронов ниже 0,1 МэВ. С учетом веса этих изотопов в составе топлива и величины их одногрупповых сечений деления, делительные свойства плутоний-америциевого топлива в спектрах АЗ с теплоносителем из свинца-208 и свинца-висмута практически совпадают.

В таблице 3 приведены результаты расчетов средней энергии нейтронов и одногрупповых сечений делений долгоживущих изотопов МА, помещенных в небольшом количестве в боковой экран РБЕЦ-М.

Таблица 3

Энергии нейтронов и одногрупповые сечения деления Np-237, Am-241, -243 и Cm-246, усредненные по нейтронному спектру бокового экрана реактора РБЕЦ-М, охлаждаемого свинцом-208 либо эвтектикой свинца и висмута (в барнах)

Реактор и теплоноситель	Энергия нейтронов, МэВ	Np-237	Am-241	Am-243	Cm-246
РБЕЦ-М, Pb-208	0,2662	0,2201	0,1306	0,2411	0,1931
РБЕЦ-М, Pb-Bi	0,2509	0,2039	0,1181	0,2310	0,1775
Относительное изменение, %	+6,0980	+7,9451	+10,5843	+4,723	+8,7887

Как видно из табл. 3, средняя энергия нейтронов в боковом экране реактора РБЕЦ-М возрастает на 6,1% при замене свинцово-висмутового теплоносителя на теплоноситель из свинца-208. В предположении, что нейтронные спектры слабо меняются при внесении в БЭ малых количеств МА, рассчитаны одногрупповые сечения деления долгоживущих слабо делящихся изотопов Np-237, Am-241, -243 и Cm-246. Они возрастают от 4,7% (Am-243) до 10,6% (Am-241) в случае использования теплоносителя из свинца-208 вместо свинцово-висмутового.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- На основе программы MCNP/4C рассчитаны нейтронные спектры активной зоны и бокового экрана быстрого реактора РБЕЦ-М, охлаждаемого теплоносителем из свинца-208. Исходные данные для расчета, практически, не изменены по сравнению с исходными данными для реактора, охлаждаемого его штатным свинцово-висмутовым теплоносителем, за исключением процентного содержания энер-

гетического плутония, которое было снижено со штатной величины 13,7 до 13,0% для выполнения условий критичности $K_{эфф} = 1,01$.

- На основании полученных нейтронных спектров рассчитаны средние энергии нейтронов в активной зоне и боковом экране реактора. Замена штатного свинцово-висмутового теплоносителя на теплоноситель из свинца-208 приводит к ужесточению нейтронных спектров в активной зоне – на 6,4%, в боковом экране – на 6,1%.

- Рассчитаны однокрупные сечения деления изотопов плутония и америция в спектре активной зоны реактора. Замена свинцово-висмутового теплоносителя на свинец-208 приводит к увеличению усредненных по спектру сечений деления слабо делящихся изотопов: Pu-240 на 5,9% и Am-241 на 9,8%.

- Рассчитаны однокрупные сечения деления долгоживущих слабо делящихся изотопов: Np-237, Am-241, -243 и Cm-246 в исходных спектрах бокового экрана. Они возрастают на 5–10% в случае использования теплоносителя из свинца-208 вместо свинцово-висмутового.

В целом, полученные в статье результаты в совокупности с другими, ранее опубликованными работами авторов по проблеме теплоносителя из свинца-208, можно резюмировать следующим образом.

Расплав свинца, обогащенного до 99,0% стабильным изотопом свинца-208, может рассматриваться как теплоноситель с новыми потребительскими свойствами для ядерно-энергетических установок (ЯЭУ). Он может иметь некоторые преимущества перед другими, ныне применяемыми или предлагаемыми теплоносителями: натрием, природным свинцом, эвтектикой свинца-висмута, ртутью и другими легкими и тяжелыми металлами.

Основное преимущество свинца-208 заключается в его способности мало поглощать нейтроны. На примере быстрого реактора РБЕЦ-М в работе [6] было показано, что однокрупные, усредненные по нейтронным спектрам подзон АЗ реактора, сечения радиационного захвата нейтронов теплоносителем могут быть снижены в четыре-семь раз при замене его штатного свинцово-висмутового теплоносителя на свинец-208.

Другим преимуществом свинца-208 является высокий порог потерь энергии при неупругих столкновениях нейтронов с ядром, $E_{порог} = 2,61$ МэВ, что позволяет на несколько процентов ужесточить спектр нейтронов в активной и периферийных зонах свинцовых быстрых реакторов.

Малое поглощение и слабое замедление нейтронов в таком теплоносителе позволяют получить выигрыш в эффективном коэффициенте размножения нейтронов $K_{эфф}$ критического реактора или подкритического blankets и тем самым минимизировать начальную загрузку реакторов ядерным топливом, сэкономят энергетический плутоний.

Ключевым вопросом возможности реализации указанных преимуществ свинца-208 в ЯЭУ является его цена на мировом рынке, которая ныне достаточно высока. Однако высокое содержание свинца-208 в природной смеси изотопов свинца (около 52%) и успехи техники разделения изотопов свинца, в том числе центробежного и лазерного фотохимического способов, позволяют полагать, что в недалеком будущем свинец-208 с обогащением до 99,0% можно будет получать в больших количествах, измеряемых сотнями тонн, по экономически приемлемой цене – \$200/кг [7, 8].

Литература

1. *Khorasanov G.L., Ivanov A.P., Blokhin A.I. and Shimkevich A.L.* Lead and tin targets for reducing polonium waste. In: 3rd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications. June 7-11, 1999, Praha, Czech Republic, Published by ICARIS Ltd., p.46, Paper Tu-0-E8
2. *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 (ISSN 0029-5493).
3. *Алексеев П.Н., Васильев А.В., Микитюк К.О., Субботин С.А., Фомиченко П.А., Щепетина Т.Д.* Оптимизация концептуальных решений для свинцово-висмутового быстрого реактора РБЕЦ-М //Атомная энергия. – 2004. – Т. 97. – Вып. 2. – С. 115-125; <http://www.iaea.org/NuclearPower/SMR/crpi25001/html/>.
4. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. LA-13709-M, J.F. Briesmeister, Ed., Los Alamos National Laboratory, 2000.
5. *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 (ISSN 0207-3668).
6. *Хорасанов Г.Л., Блохин А.И.* Теплоноситель с малым поглощением нейтронов для быстрых реакторов и ускорительно-управляемых систем//Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. – 2010. – Вып. 1 (ISSN 0207-3668).
7. ISTC #2573 project: «Investigation of Processes of High – Performance Laser Separation of Lead Isotopes by Selective Photoreactions for Development of Environmentally Clean Perspective Power Reactor Facilities». Project Manager A. M. Yudin (Saint-Petersburg, Efremov Institute, NIIIEFA), Project Submanagers G.L. Khorasanov (Obninsk, Leypunsky Institute, IPPE) and P.A. Bokhan (Novosibirsk, Institute for Semiconductor Physics, ISP), 2004-2005.
8. *Бортнянский А.Л., Демидов В.Л., Мотовилов С.А., Подтыкан Ф.П., Савченко Ю.И., Усанов В.А., Юдин А.М., Яценко Б.П.* Экспериментальный лазерный комплекс для разделения изотопов свинца посредством селективных фотохимических реакций//В Сборнике докладов X Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» (3-7 октября 2005 г., г. Звенигород, Россия). – М.: ЦНИИАтоминформ, 2005. – С. 76-82 (ISBN 5-85389-122-7).

Поступила в редакцию 19.09.2011

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.516.2.232

About the Xenon Oscillations Boundary in the Reactor with Nonhomogeneous Axial Load \A.M. Zagrebayev, V.A. Nasonova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.

The results of modeling for estimation the xenon oscillations boundary in the reactor with nonhomogeneous axial load are given.

УДК 621.039.526: 621.039.59

One-group Fission Cross Sections for Plutonium and Minor Actinides in Neutron Spectra of Fast Reactor Cooled with Lead-208 or Lead-Bismuth \G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 3 tables. – References, 8 titles.

One-group fission cross sections of isotopes of plutonium and minor actinides- Np-237, Am-241, 243 and Cm-246 – in neutron spectra of fast reactor RBEC-M cooled with Pb-Bi or Pb-208 are calculated on the basis of 28 group system ABBN. As a result of replacement of Pb-Bi coolant over Pb-208 coolant, the mean energy of neutrons increases on 6.4% and 6.1% in the core and lateral blanket, respectively. Under such neutron spectra hardening, the one-group fission cross section increases on 6% for Pu-240 and on 10% for Am-241.

УДК 621.039.526: 621.362

Space Nuclear Power System Based on SAFE Fast Reactor with Low-temperature Thermionic Converters \V.I. Yarygin, G.E. Lazarenko, M.K. Ovcharenko, A.P. Pyshko, D.G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 4 tables, 4 illustrations. – References, 18 titles.

The possibility of low-temperature thermionic converters (emitter temperature $T_e \leq 1700$ K) appliance for space nuclear power system (SNPS) based on fast SAFE (Safe Affordable Fission Engine) reactor with thermal power of 300 kW for long-term operation as a part of the lunar base have been discussed.

The results of systematic optimization for SNPS parts and equipment and the calculations for mass-dimensional characteristics are presented and also the life cycle of SNPS is specified.

УДК 621.039.534.3

Oxygen and Hydrogen Control Systems Used in Gas Circuits and NPP Containment Vessels \P.N. Martynov, M.E. Chernov, A.N. Storozhenko, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 3 tables, 6 illustrations. – References, 5 titles.

Increased reliability and safety of the operation of one-piece reactors and installations using Pb-Bi and Pb as coolant require the development and improvement of the systems able to diagnose the state of the coolant and detect at early stages the possibility of accident situations. The main controlled parameters are the oxygen activity in the coolant and the concentration of oxygen and hydrogen in the gas phase circuit. The most promising devices enabling control of these parameters are the solid electrolyte sensors made of ceramic oxide, which allow measurement to be taken in the continuous mode under conditions of high temperatures, pressures, velocities of the environment and thermal shocks.

УДК 621.039.534.6

The Combustible and Explosive Gases Control System Based on Solid-electrolyte Ceramic Sensors \P.N. Martynov, M.E. Chernov, A.N. Storozhenko, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, A.S. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 7 titles.

The most important task of ensuring the safe operation of production facilities related to the production, use, storage and processing of combustible gases and easily flammable liquids (oil and