

Исследование влияния агломератов с высоким содержанием Pu в МОХ–топливе на нейтронно–физические характеристики элементарной ячейки ядерного реактора

Е. П. Аверченкова^{1,*}, К. А. Силичева^{1,†}, Р. А. Внуков^{1,‡}, В. В. Колесов¹, Е. А. Иванов²
¹ИИАТЭ НИЯУ МИФИ. Россия, 249039, Калужская область, г. Обнинск», тер. Студгородок, д. 1
²Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). Fontenay aux Roses, France, 92260
(Поступила в редакцию 17.05.2022; подписана в печать 19.06.2022)

Рассмотрен вопрос, возможна ли в реакторах типа PWR и БН-800 полная загрузка активной зоны МОХ–топливом без уточнения дисперсной структуры. В работе смоделированы две элементарные ячейки реакторов БН-800 и PWR. Топливные ячейки реакторов рассмотрены в аксиальном и радиальном разбиении. Радиус плутониевых агломератов 30 мкм и 50 мкм, объемное содержание в моделях 7%, 10%, 22%. Для определения влияния смоделированы элементарные ячейки без уточнения дисперсной структуры МОХ–топлива (гомогенные). Отслеживались следующие характеристики: отношение энерговыделений в агломератах к топливной матрице, Доплер–эффект, коэффициент размножения нейтронов. Анализ данных показал, что при увеличении объемной доли плутониевых агломератов в эффективной ячейке увеличивается отношение энерговыделений. При увеличении радиуса плутониевых агломератов отношение не изменяется. Аксиальная зависимость отношения энерговыделения отсутствует.

PACS: 28.90.+i

УДК: 539.17

Ключевые слова: плутониевые агломераты, элементарная ячейка, МОХ–топливо, энерговыделение, коэффициент размножения, PWR, БН-800, выгорание.

ВВЕДЕНИЕ

Смешанное оксидное топливо, которое принято называть МОХ–топливом, содержит несколько оксидов делящихся материалов. Это плутоний, смешанный с природным, переработанным или обедненным ураном. Такое топливо способно достигать глубоких выгораний, а так же в его пользу свидетельствует наличие технологической промышленной базы для переработки [1]. На сегодняшний день МОХ–топливо используется в американских реакторах типа PWR [2], в японских реакторах типа LWR [3], в российских реакторах типа БН [4], в перспективе в реакторах ВВЭР–СКД [5].

Известно о неоднородности дисперсной структуры МОХ–топлива: среди измельченной в пыль плутониевой составляющей находятся относительно крупные агломерации, в которых содержание обогащенного плутония достигает 27%. В нейтронно–физических расчетах выгорания реакторов данную особенность на текущий момент принято не принимать во внимание.

Как показывает практика эксплуатации, в случае неполной загрузки реактора МОХ–топливом эффект от неравномерного энерговыделения в твэлах не столь критичен, но для потенциально возможных топливных компаний с полной загрузкой необходимы дополнительные исследования.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Для разных видов реакторов оценка локального энерговыделения в плутониевых пятнах и вне их при дополнительном рассмотрении нахождения пятна в разных местах внутри топливной ячейки показывает, можно ли использовать расчеты без уточнения неоднородной дисперсной структуры МОХ–топлива. Существенная дифференциация локальных энерговыделений даст основание привлечь внимание к вопросу о термомеханической безопасности МОХ–топлива.

1.1. Плутониевые агломераты в урановой матрице

МОХ–топливо состоит из двух компонентов — измельченных в пыль оксидов плутония и урана. Плутониевая составляющая не может целиком быть раздроблена до однородных гранул; попадают относительно крупные частицы, достигающие размера от 20 до 200 мкм в диаметре. Данные частицы, попадая в урановую матрицу, становятся агломератами с высоким содержанием плутония. В простейшем случае их рассматривают в качестве идеальной сферы, содержащей в себе более высокое содержание изотопов плутония. То есть обогащение по делящимся изотопам в агломератах может значительно превышать среднее обогащение в матрице топлива. Существует несколько исследований, посвященных влиянию агломератов с высоким содержанием плутония на локальное энерговыделение.

1.2. Гомогенная и гетерогенная структуры

Поскольку обогащение плутониевых агломератов может сильно превышать обогащение в топливе, следует

* epaverchenkova@mail.ru

† silichevaka@oiate.ru

‡ vnukovra@oiate.ru

Таблица 1. Параметризация содержания Pu в агломератах и матрице

Тип реактора	Среднее содержание Pu, %	Диаметр агломератов, мкм	Объемная доля Pu, %	Содержание обогащенного Pu в агломератах, %	Содержание Pu в матрице U-Pu, %
PWR	5	30	7	27	3.33
PWR	5	50	7	27	3.33
PWR	7	30	10	27	4.76
PWR	7	50	10	27	4.76
БН-800	18.2	30	7	27	17.54
БН-800	18.2	50	7	27	17.54
БН-800	18.2	30	10	27	16.
БН-800	18.2	50	10	27	16.67

различать такого рода гетерогенность от идеализированной гомогенной структуры, в которой не учитывается неоднородность частиц.

Согласно источнику [2] гомогенное распределение плутониевых частиц в топливе важно по четырем причинам: оно придает МОХ-топливу устойчивость к спровоцированным увеличением реактивности авариям; минимизирует пиковые значения мощности в результате неравномерного распределения плутония; обеспечивает растворимость в азотной кислоте; минимизирует выброс газа деления и внутреннее давление стержня.

Гетерогенная модель индивидуально рассматривает плутониевые агломераты и индивидуально уран-плутониевую матрицу. Неоднородность МОХ-топлива характеризуется размерами, обогащением и численной плотностью агломератов [7]. Сравнение двух структур покажет, справедливо ли пренебрегать неоднородностью плутониевой составляющей при расчетах безопасности.

1.3. Типы реакторов

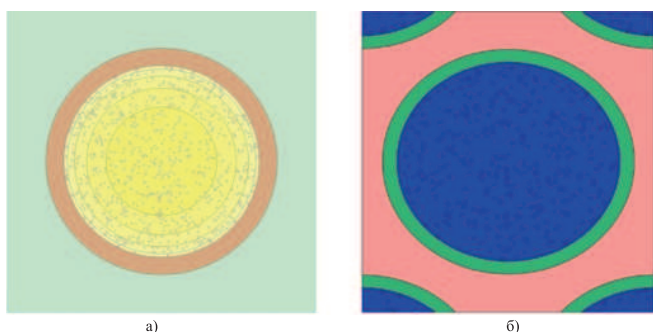


Рис. 1. Элементарная ячейка реактора а — PWR, б — БН-800

На тему влияния высокого обогащения в неоднородной структуре МОХ-топлива на расчет топливной решетки прежде было проведено два исследования. Пер-

вое [2] посвящено проблеме выгорания плутониевых агломератов в МОХ-топливе, загружаемого в японские реакторы с легкой водой. Исследование проводилось японскими учеными, а результаты были опубликованы в 1997 г. Второе [6] посвящено моделированию влияния плутониевых агломератов в решетке реактора LWR на нейтронно-физические характеристики зоны.

Настоящее исследование протекает в контексте двух элементарных ячеек: PWR и БН-800 (рис. 1). Причина — перспектива рассмотрения полной загрузки МОХ-топлива для реакторов данных типов.

Метод расчета

Расчет производился в программном комплексе Serpent [8], осуществляющем нейтронно-физические расчеты методом Монте-Карло и позволяющем использовать непрерывный энергетический спектр нейтронов в своих библиотеках.

1.4. Параметры и характеристики

Изменяемые параметры плутониевых агломератов были выбраны с учетом данных [2] (табл. 1).

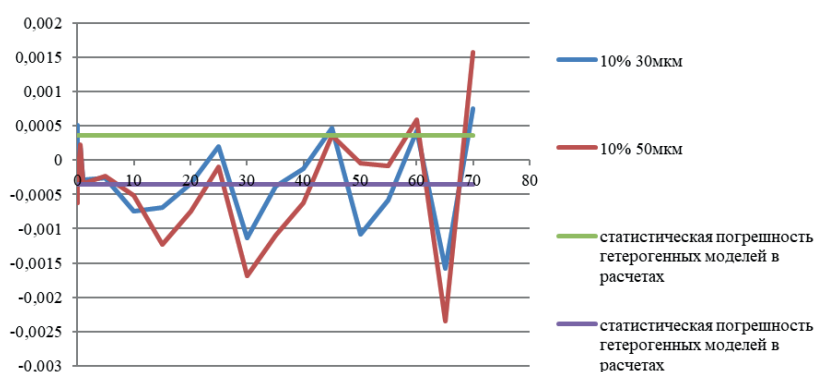
Для разных видов реакторов производилась оценка локального энерговыделения в плутониевых пятнах и вне их при дополнительном рассмотрении нахождения пятна в разных местах внутри топливной ячейки, оценивалось влияния Доплер-эффекта в элементарной ячейке — твэле.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было рассмотрено 2 модели элементарной ячейки для PWR и БН-800 (рис.1, а, б); в твэлах находились таблетки с МОХ-топливом с содержанием плутония в плутониевых агломератах 27%. Ячейку PWR было

Таблица 2. Отношение энерговыделения в плутониевых агломератах к энерговыделению в матрице для элементарной ячейки PWR

№ Зоны	Доля агломератов 7%		Доля агломератов 10%		Доля агломератов 22%
	30 мкм	50 мкм	30 мкм	50 мкм	30 мкм
1	1.514	1.511	1.541	1.541	2.318
2	1.522	1.516	1.55	1.546	2.346
3	1.526	1.522	1.554	1.552	2.361
4	1.529	1.525	1.561	1.556	2.386
5	1.534	1.527	1.565	1.559	2.404

Рис. 2. Отличие K_{inf} между гомогенной и гетерогенной моделями

решено разбить радиально на 5 зон, для отслеживания исследуемых параметров. Топливная ячейка реактора БН-800 разбивалась аксиально на 3 части. Параллельно рассматривались модели без разбиения.

Для реактора типа PWR разница превышает статистическую погрешность в нулевой момент времени. Последующие флуктуации (рис. 2) предположительно связаны с недостаточной статистикой нейтронных историй для модели с учетом плутониевых агломератов (заданное количество в 10^8 недостаточно для отслеживания выгорания материалов топлива в модели элементарной ячейки). Гомогенной моделью в рисунке называется элементарная ячейка без плутониевых агломератов, гетерогенной моделью — ячейка с плутониевыми агломератами.

Таблица 3. Отношение энерговыделения в плутониевых агломератах к энерговыделению в матрице для элементарной ячейки БН-800

№ Зоны	Доля агломератов 7%		Доля агломератов 10%	
	30 мкм	50 мкм	30 мкм	50 мкм
1	1.108	1.108	1.167	1.167
2	1.108	1.108	1.166	1.166
3	1.108	1.108	1.166	1.167

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено влияние моделирования плутониевых агломератов на нейтронно-физические характеристики элементарных ячеек реакторов типа PWRи БН-800. Значения коэффициента размножения в реакторе типа БН-800 имеют отличия ниже статистической погрешности, что объясняется незначительным отличием в содержании плутония в матрице и в агломератах. При более высоком различии в содержании плутония между агломератами и матрицей значения коэффициентов размножения между моделями с агломератами и без имеют разницу в начале кампании выше статистической погрешности. С выгоранием топлива значения имеют флуктуации, превышающие значения статистической погрешности, что предположительно связано с недостаточной статистикой. Для расчетов выгорания в будущем необходимо сделать поправку [9].

Отношения энерговыделений в моделях с агломератами показали необходимость учета температурных градиентов между агломератами и топливной матрицей для реакторов типа PWR, где содержание плутония в агломератах и матрице составляет 567% и более. Для реактора типа БН-800 различие содержаний плутония составляет до 62%, что незначительно сказывается на разнице энерговыделений в агломератах и матрице. В дальнейшем планируется исследование (оценка) влияния моделирования агломератов в топливе на Доплер-эффект [10].

- [1] Тошинский Г.И. Беседы о ядерной энергетике. Физика реакторов и технологии модельных быстрых реакторов с теплоносителем свинец–висмут: для начинающих и не только. М.: РГ–Пресс, 2021.
- [2] Kameyama T., Sasahara A., Matsumura T. // Journal of nuclear science and technology. **34**, N 6. P. 551. (June 1997).
- [3] Supko E. 13–Nuclear fuel fabrication. Uranium for Nuclear Power. 2016. P. 353.
- [4] Kuznetsov A.E., Vasilev B.A., Farakshin M.R., Belov S.B., Sheryakov V.S. The BN-800 Core with MOX Fuel. International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA, 2018.
- [5] Glebov A.P., Baranaev Yu.D., Klushin A.V. Use reactors based on fast–neutron resonance spectrum, supercritical pressure for nuclear power plants small power. Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki Seriya: Yaderno–Reaktornye Konstanty. 2017. (2). P. 86.
- [6] Kawashima K., Yamamoto T., Namekawa M. // Journal of nuclear science and technology. 2007. **44**, N 10. P. 1259.
- [7] Status and advances in MOX fuel technology. Technical reports series № 415. IAEA, Vienna, May 2003.
- [8] Leppänen J. Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. User manual. 2015.
- [9] Leppänen J., Isotalo A. Burnup calculation methodology in the Serpent 2 Monte Carlo code. In proc. PHYSOR 2012. Knoxville, TN. Apr. 15–20, 2012.
- [10] Mosteller R.D., Holly J.T., Mott L.A. Benchmark Calculations for the Doppler Coefficient of Reactivity in Mixed-Oxide Fuel. Proc. Int. Topi Mtg. Advances in Mathematics, Computations, and Reactor Physics. Pittsburgh, USA, 1991.

Research of the influence of agglomerates with a high Pu content in MOX fuel on the neutron-physical characteristics of a nuclear reactor pin

E. P. Averbchenkova^{1,a}, K. A. Silicheva^{1,b}, R. A. Vnukov^{1,c}, V. V. Kolesov¹, E. A. Ivanov²

¹Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering. Obninsk, Russia

²Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN). France, 92260

E-mail: ^aepaverchenkova@mail.ru, ^bsilichevaka@oiate.ru, ^cvnukovra@oiate.ru

The main topic of the research is to find out is it possible to load fully PWR's and BN-800's cores without consideration of disperse structure of MOX-fuel. Two types of lattice were considered for PWR and BN-800: homogeneous and heterogeneous. At first, the calculation was for pins. Each fuel pin was divided axially or radially into zones. Different number of plutonium agglomerates were simulated in each zone, the volume fraction was 7 for each model. The typical diameter of Pu-rich agglomerate was selected: 30 μm as an average value and 50 μm as a probable maximum. The focus of the study was on the following characteristics: energy distribution in plutonium agglomerates and in uranium matrix; Doppler effect; reproduction coefficient. In conclusion, the more volume fraction of Pu-rich agglomerates – the more energy release in pins, but agglomerates' diameters have no influence and also there is no dependence of axial partition.

PACS: 28.90.+i

Keywords: plutonium agglomerates, unit cell, MOX–fuel, energy release, multiplication factor, PWR, BN-800, burnup.

Received 17 May 2022.

Сведения об авторах

1. Аверченкова Елизавета Павловна — студент, 89156456542, epaverchenkova@mail.ru.
2. Силичева Ксения Алексеевна — студент, silichevaka@oiate.ru.
3. Внукон Руслан Адхамович — аспирант, vnukovra@oiate.ru.
4. Колесов Валерий Васильевич — доктор физ.-мат. наук, доцент, valeri-kolesov@yandex.ru.
5. Иванов Евгений — доктор физ.-мат. наук, профессор, evgeny.ivanov@irsn.fr.