

параллельных турбомашин в режимах пуска, остановки, на частичных нагрузках и др.) и большей стоимости.

Заключение. Проект ГТ-МГР — результат создания энергоустановок, объединяющих блок преобразования энергии с газотурбинным циклом Брайтона и высокотемпературный ядерный реактор. Возможность достижения к.п.д. более 45% позволяет им конкурировать с другими типами реакторов и станциями на органическом топливе.

На основе вариантных проработок сделан вывод, что интегральный проект блока преобразования энергии с вертикальной турбомашинной наиболее предпочтителен. Вертикальная компоновка, исключая прогиб вала от гравитационных сил, позволяет иметь меньшие зазоры между лопатками и статором и большую эффективность. Интегральная конфигурация уменьшает границу первого контура и зону действия высокой температуры. Этот вариант также обеспечивает минимальные потери давления и байпасные перетечки гелия. Наконец, этот проект имеет самые низкие капитальные затраты.

Тем не менее применение турбокомпрессора с генератором повышенной частоты и частотного преобразователя снижает эффективность производства электроэнергии примерно на 1,5%. Поэтому представляется целесообразным при сохранении преимуществ современного проекта тщательно проанализировать возмож-

ность повышения эффективности газотурбинного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Golovko V.F., Dmitrieva I.V., Kodochigov N.G. e.a. Features of adapting gas turbine cycle and heat exchangers for HTGRs. — In: Proc. of a Technical Committee Meeting Held in Palo Alto 14—16 November 2000. IAEA-TECDOC-1238, 2001, p. 63—74.
2. Golovko V.F., Kiryushin A.I., Kodochigov N.G., Kuzavkov N.G. State of HTGR development in Russia. Design and development of gas cooled reactors with closed cycle gas turbines. — In: Proc. of a Technical Committee Meeting. China, Beijing, Oct. 30—Nov. 2, 1995, p. 31—46.
3. Labar M., Shenoy A., Simon W., Campbell E. The gas-turbine modular helium reactor. — Nucl. News, 2003, v. 46, № 11, p. 28—37.
4. Power Conversion Unit Development Plan. General Atomics Report, San Diego, California, 2004.
5. Kiryushin A.I., Kodochigov N.G., Kuzavkov N.G. e.a. Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine. — Nucl. Engng Design, 1997, v. 173, p. 119—129.
6. Yan X., Takizuka T., Takada S. e.a. Cost and performance design approach for GTHT-300 power conversion system. — Ibid., 2003, v. 226, p. 351—373.
7. Jie W., Zhiyong H., Shutang Z., Suyuan Y. Design Features of gas turbine power conversion system for HTR-10GT. — In: Proc. of Conf. on High-Temperature Gas-Cooled Reactors HTR-2004. China, Beijing, Sep. 22—24, 2004, Paper D05, p. 1—12.
8. Kostin V.I., Kodochigov N.G., Vasyaev A.V., Golovko V.F. Power conversion unit with direct gas-turbine cycle for electric power generation as a part of GH-MHR reactor plant. — Ibid., Paper D21, p. 1—12.

УДК 621.039.546

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОЙ ЗОНЫ ГТ-МГР

Кодочигов Н.Г., Сухарев Ю.П., Марова Е.В. (ОКБМ им. И.И. Африкантова), Бояринов В.Ф., Брызгалов В.И., Глушков Е.С., Гомин Е.А., Гуревич М.И., Давиденко В.Д., Компаниец Г.В., Крутов А.М., Невиница В.А., Фомиченко П.А., Цибульский В.Ф., Юдкевич М.С. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В. (ИБРАЭ)

Специфика разрабатываемого в настоящее время высокотемпературного газоохлаждаемого реактора ГТ-МГР состоит в использовании кольцевой активной зоны с плутониевым топливом на основе микрочастиц и эрбиевым выгорающим поглотителем и возможности достижения выгорания топлива до 70% тяж. ат. Это определяет нейтронно-физические особенности

ГТ-МГР [1], которые, в свою очередь, в значительной степени влияют на работоспособность активной зоны и реактора в целом. В связи с этим особое значение приобретает оценка неопределенности расчета основных нейтронно-физических характеристик ГТ-МГР с плутониевым топливом [1, 2]. В настоящей статье рассматриваются факторы, обуславливающие не-

определенности расчета нейтронно-физических характеристик, и некоторые результаты верификации расчетных моделей и методик.

Нейтронно-физические особенности реактора. К числу особенностей ГТ-МГР, важных для анализа его нейтронно-физических характеристик, относятся:

использование топлива в виде частиц с многослойным покрытием, которые диспергированы в цилиндрических топливных компактах, установленных в гексагональные топливные блоки, что обеспечивает в ГТ-МГР по сравнению с реакторами другого типа дополнительные эффективные барьеры на пути выхода радионуклидов в окружающую среду (рис. 1). Такая структура ТВС приводит к двойной гетерогенности размещения топлива в активной зоне, что необходимо учитывать при определении нейтронно-физических характеристик реактора;

использование плутониевого топлива без воспроизводящих материалов, таких, как ^{238}U и ^{232}Th , что приводит к глубокому выгоранию топлива и необходимости введения оксида эрбия как выгорающего поглотителя для обеспечения отрицательного температурного коэффициента реактивности и компенсации запаса реактивности на выгорание;

применение кольцевой активной зоны для обеспечения ее работоспособности в аварийных ситуациях, в том числе при нарушении циркуляции гелиевого теплоносителя, что приводит к

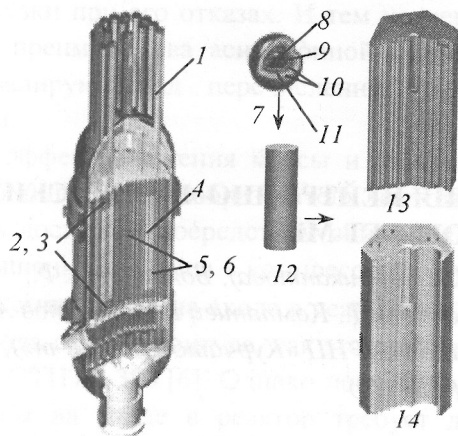


Рис. 1. ГТ-МГР и его топливная композиция: 1 — стойка стержней СУЗ; 2, 3 — верхний и нижний торцевые отражатели из графитовых блоков соответственно; 4 — кольцевая активная зона из призматических блоков; 5, 6 — внутренний и наружный отражатели из графитовых блоков соответственно; 7 — топливная частица, 8 — топливный керн; 9 — пористый углерод; 10 — пирокарбид; 11 — карбид кремния; 12 — топливный компакт; 13 — ТВС типа I; 14 — ТВС типа II

существенной неравномерности радиального энергораспределения;

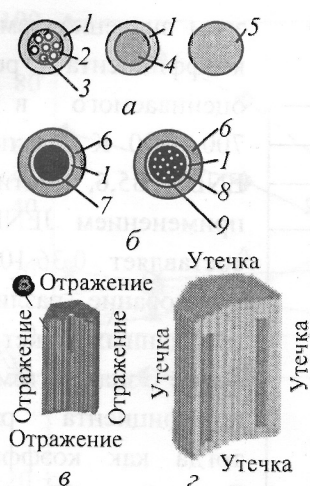
расположение регулирующих поглощающих стержней преимущественно вне активной зоны в боковом отражателе, что связано с необходимостью их надежного охлаждения, но затрудняет обеспечение баланса реактивности на всех этапах работы реактора;

большая высота активной зоны по сравнению с ее диаметром ($H/D \cong 1,5$), что может приводить к заметным неравномерностям осевого энергораспределения.

Нейтронно-физические особенности реактора ГТ-МГР оказывают существенное влияние на основные параметры реакторной установки и определяют необходимость проведения расчетно-экспериментальных исследований в подтверждение характеристик реактора и в целях верификации расчетных программ.

Расчетные модели и программы. Для проведения нейтронно-физических исследований ГТ-МГР, направленных на уточнение проектных характеристик реактора и верификацию расчетных программ, была разработана структурированная многоуровневая тестовая модель. Она предполагает исследование моделей ячеек топливного компакта, выгорающего поглотителя, ячейки ТВС, двумерной и трехмерной моделей реактора и направлена на выявление проблем, которые возникают при моделировании, и выработку предложений по их решению. Рассматривали расчетные модели, наиболее полно отражающие конструктивные и физические особенности активной зоны ГТ-МГР и ее компонентов (рис. 2). Расчеты проводили с использованием программ и приближений, представленных в табл. 1.

Анализ результатов расчетных исследований. Расчеты, проведенные с использованием моделей ячеек топливного компакта, показали, что в случае детального описания размещения топливных частиц с покрытием неопределенность расчета коэффициента размножения ячейки минимальна и составляет $\sim 0,5\%$, различия в оценке скоростей реакции на ядра основных изотопов плутония не превышают $0,4\%$. Сравнение проводили со средним значением каждого функционала, приведенного в табл. 1. Максимальное различие коэффициента размножения ячейки топливного компакта составляет $1,5\%$, скоростей реакции ^{239}Pu , ^{240}Pu — не более $1,5$ и



Р и с. 2. Расчетные модели для поведения тестовых исследований ГТ-МГР с кольцевой активной зоной: а, б, в — ячейки топливного компакта, компакта выгорающего поглотителя, ТВС типа I соответственно; 1, 2 — графит топливного блока и топливного компакта соответственно; 3 — топливные керны и их покрытия; 4 — гомогенизированная смесь графита топливного компакта и топливных ядер с покрытиями; 5 — гомогенизированная смесь графита топливного блока, графита топливного компакта и топливных ядер с покрытиями; 6 — гомогенизированная смесь топлива, графита топливного компакта и графита топливного блока, приходящегося на один компакт выгорающего поглотителя; 7 — гомогенизированная смесь графита компакта выгорающего поглотителя и ядер оксида эрбия; 8 — ядра оксида эрбия; 9 — графит компакта выгорающего поглотителя

6% соответственно, что получено при гомогенизации топливной композиции в пределах топливного компакта при наличии выделенного внешнего слоя графита. Показательно возрастание различия в результатах расчетной скорости реакции поглощения на графите при переходе к

гомогенным ячейкам (до 8%). Наблюдаемая тенденция определяется учетом блокировки отдельных изотопов, выделением слоя графита и, таким образом, напрямую связана с учетом двойной гетерогенности размещения топлива и рассеяния на графите.

Расчеты ячеек топливного компакта и выгорающего поглотителя подтвердили необходимость гетерогенного описания топливной композиции при использовании программы WIMS-D4 и позволили отработать методические подходы к моделированию ячейки топливного блока посредством гетерогенного размещения в модели топливных частиц в виде кластера цилиндрических стерженьков.

Сравнение, результаты которого представлены в табл. 2, проводили с полученными по программе MCU, реализующей расчет методом Монте-Карло. Модель 1 предусматривает гетерогенное задание топливных частиц, модель 2 — их гомогенизацию в пределах топливного компакта. Показано, что при проведении расчетов по программе WIMSD4 гетерогенное задание топливной композиции по сравнению с гомогенным для ячейки топливного блока позволяет снизить различия коэффициента размножения с 5 до 1%, концентрации ^{239}Pu — с 45 до 1%, ^{240}Pu — с 45 до 19%, ^{241}Pu — с 22 до 5%, ^{167}Er — с 28 до 17%.

Особое внимание к изменению изотопного состава при расчете выгорания определяется его существенным влиянием, в частности, на температурный коэффициент реактивности [3, 4]. Полагается, что температурный коэффициент реактивности для ГТ-МГР с плутониевым топливом отрицателен во всех режимах нормальной эксплуатации на номинальной мощности и при авариях в течение всего времени облучения. Однако имеется область температуры, характерная для режимов пуска в конце частичной кампании реактора, когда температурный коэффициент реактивности может быть близок к нулю (с учетом расчетных неопределенностей). В спектре нейтронов, характерном для ГТ-МГР, влияние на температурный коэффициент реактивности могут оказывать не только основные изотопы плутония

Таблица 1. Расчетные программы, библиотеки и методы

MCU	MONTEBURNS 2.0— MCNP 5—ORIGEN 2.1	UNK	WIMSD4
Метод расчета			
Монте-Карло	Монте-Карло	Вероятность первого столкновения	Вероятность первого столкновения, S_8
Библиотека ядерных данных			
Собственная библиотека на основе ENDF B6	ENDF B6, частично ENDF B5, JENDL 3.3	ENDF B6	UKNDL, ENDF B6, FOND 2.2. WLUP (MAGATЭ)
Энергетическая структура			
Непрерывная	Непрерывная	89 групп (до 7000 в области резонансов)	69 групп

Таблица 2. Коэффициент размножения ячейки ТВС и изотопный состав топливного керна, отн. ед.

Функционал	MCU	Относительное отклонение			
		MCNP 5	UNK	WIMSD4	
	Модель 1	Модель 1	Модель 1	Модель 1	Модель 2
Начало кампании (0 эф. сут)					
$K_{\text{беск}}$	1,139	-0,0012	-0,0079	-0,0026	-0,0077
Конец кампании (840 эф. сут)					
$K_{\text{беск}}$	1,035	-0,0268	-0,0271	-0,0076	0,0511
$\rho_{167\text{Er}}$	0,006	0,0167	-0,5000	-0,1667	0,2833
$\rho_{239\text{Pu}}$	0,033	-0,1879	-0,6364	-0,0121	0,4515
$\rho_{240\text{Pu}}$	0,079	-0,0962	-0,4304	-0,1899	-0,4544
$\rho_{241\text{Pu}}$	0,080	-0,0563	-0,2375	0,0512	0,2175
$\rho_{242\text{Pu}}$	0,062	-0,0339	0,1129	-0,1129	-0,1129

Таблица 3. Зависимость температурных коэффициентов реактивности от выгорания, полученная по программе MCNP 5

Выгорание топлива, МВт·сут/кг	Выгорание ^{239}Pu , %		Коэффициент реактивности, 10^{-5} 1/К	
	Библиотека JENDL 3.3	Библиотека ENDF B5,6	Библиотека JENDL 3.3	Библиотека ENDF B5,6
560	86	—	От -1,26 до -0,71	—
590	88	—	От -0,24 до +0,08	—
605	90	89	От +0,85 до +1,17	От -0,03 до +0,02
620	—	90	—	От +0,38 до +0,68

($^{239}, ^{240}, ^{241}\text{Pu}$) и эрбия (^{167}Er), но и актиноиды (^{241}Am , ^{244}Cm) с заметными резонансами в области изменения спектра нейтронов.

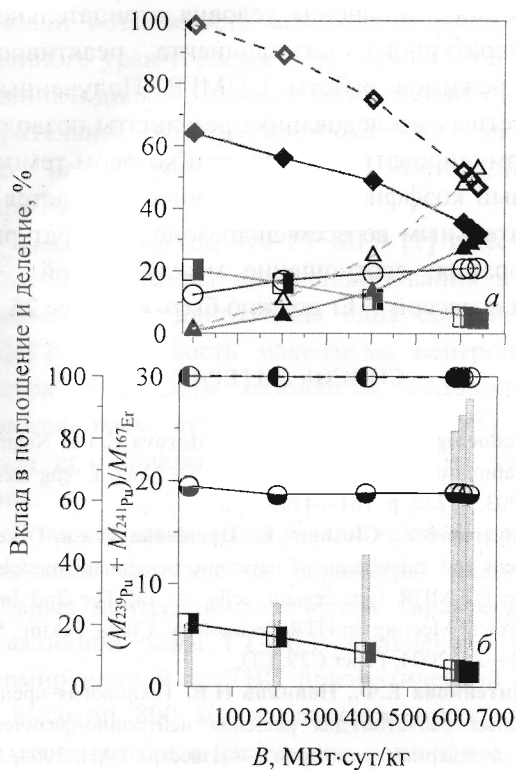
Как показал анализ изотопного состава топлива, который получен при расчете выгорания топливных ячеек с помощью программного комплекса MONTEBURNS 2.0—MCNP 5—ORIGEN 2.1 с библиотеками ядерных данных, сформированными на основе файлов оцененных ядерных данных JENDL 3.3 и ENDF B5,6, отличие концентрации основных изотопов (^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{167}Er) при большом выгорании может достигать 10% даже при единых расчетных моделях.

Влияние ядерных данных на расчетные температурные коэффициенты реактивности оценивали на модели расчета топливного блока. Для оценки коэффициента реактивности использовали концентрацию всех входящих в расчет выгорания изотопов, полученную при расчете выгорания с помощью ENDF B5,6. При

этом значение температурного коэффициента реактивности, оцениваемого в диапазоне 700—900 К с использованием ENDF B5,6, почти нулевое, с применением JENDL 3.3 оно составляет $0,36 \cdot 10^{-5}$ 1/К. Использование различных ядерных данных может приводить к смене знака температурного коэффициента реактивности, тогда как коэффициент размножения системы в целом рассчитывается с погрешностью менее 0,3% $\Delta k/k$ (1,1261 для ENDF B5,6 и 1,1234 для JENDL 3.3). В табл. 3 приведен диапазон коэффициентов реактивности, определяемый статистической погрешностью.

Изменение знака температурного коэффициента реактивности при выгорании исходного ^{239}Pu до 90% (~605 МВт·сут/кг) может быть объяснено изменением соотношения изотопов плутония и эрбия (рис. 3). Изотопы $^{239}, ^{240}, ^{241}\text{Pu}$ и ^{167}Er определяют соотношение делений и поглощений в реакторной системе с топливом на основе чистого плутония. К моменту выгорания ~605 МВт·сут/кг доля делений на ядрах ^{241}Pu начинает превышать долю делений на ядрах ^{239}Pu (см. рис. 3, а), тогда как суммарная доля делений на ядрах ^{239}Pu и ^{241}Pu остается постоянной (см. рис. 3, б). При этом доля поглощений на ядрах ^{167}Er продолжает снижаться, доля поглощений на ядрах ^{240}Pu остается постоянной. Таким образом, при соотношении суммарной массы ^{239}Pu , ^{241}Pu к массе ^{167}Er , равном ~25 (см. рис. 3, б), температурный коэффициент реактивности становится положительным.

Следовательно, использование JENDL 3.3 является более консервативным приближением в отношении выполнения условия отрицательности температурного коэффициента реактивности.



Р и с. 3. Зависимость доли поглощения ^{239}Pu ($\diamond$), ^{240}Pu ($\circ$), ^{241}Pu (Δ), ^{167}Er ($\blacksquare$), деления ^{239}Pu ($\blacklozenge$), ^{241}Pu ($\blacktriangle$) (а) и соотношения суммарного поглощения ($\bullet$) и деления ($\ominus$) ^{239}Pu и ^{241}Pu к поглощению ^{167}Er ($\blacksquare$) и их массы (штриховка) (б) от глубины выгорания

Расчетно-экспериментальные исследования на критическом стенде «Астра». Отработанные на стадии модельных расчетов подходы к нейтронно-физическому моделированию топливного блока и отражателя были верифицированы в рамках расчетно-экспериментальных исследований с использованием результатов критических экспериментов на стенде «Астра» (РНЦ «Курчатовский ин-т») с кольцевой активной зоной. Рассматривали три типа критических конфигураций сборки: конфигурация 1 без поглотителей, конфигурация 2 с одним поглотителем во внутреннем отражателе, конфигурация 3 с двумя поглотителями во внутреннем отражателе. В ходе расчетного анализа экспериментов [5] были проанализированы методики подготовки по программе WIMSD4 макроскопических констант физических зон расчетной модели для различных элементов компоновки критической сборки. В частности, для всех материалов, имеющих полость в аксиальном направлении, с помощью программы WIMSD4 было подготовлено по два набора групповых коэффициентов диффузии: 1) стандартным образом, т.е. путем

усреднения по зонам эквивалентной ячейки транспортного сечения нейтронов и объемов зон; 2) с учетом анизотропии утечки нейтронов в аксиальном направлении. Различие между радиальными (поперечными) и аксиальными (продольными) коэффициентами диффузии учитывали с помощью программы JAR-HTGR при решении многогруппового конечно-разностного уравнения диффузии нейтронов. Расчеты по JAR-HTGR проводили в 13 группах с использованием расчетной сетки с 36 расчетными точками на стандартный графитовый блок сборки «Астра», который имеет размеры 25×25 см.

Расчет полномасштабных моделей критических сборок с учетом аксиальной анизотропии утечки нейтронов (опция Ariadne программы WIMSD4) приводит к меньшим в среднем на 1% отклонениям коэффициентов размножения от экспериментальных по сравнению с рассчитанными стандартным образом (табл. 4).

Таблица 4. Эффективный коэффициент размножения в конфигурациях 1—3

Тип расчета	Конфигурация		
	1	2	3
Без учета анизотропии коэффициентов диффузии	1,01440	1,00917	1,01969
С учетом анизотропии коэффициентов диффузии	0,99662	0,99524	1,01089

При анализе результатов обращает на себя внимание тенденция к росту отклонения рассчитанных значений пространственных распределений скорости реакции деления ^{235}U от экспериментальных с увеличением количества борных поглотителей, введенных во внутренний отражатель (табл. 5). При этом очевидно, что подходы в моделировании органов СУЗ влияют

Таблица 5. Среднеквадратичное отклонение рассчитанных значений скоростей реакций от экспериментальных в конфигурациях 1—3, %

Тип расчета	Конфигурация/число поглотителей в отражателе		
	1/0	2/1	3/2
Без учета анизотропии коэффициентов диффузии	4,86	5,85	7,29
С учетом анизотропии коэффициентов диффузии	4,39	5,67	7,25

на точность расчета распределений скорости реакций деления сильнее, чем учет аксиальной анизотропии утечки нейтронов в каналах с аксиальными отверстиями (т.е. влияние прострелов нейтронов).

Заключение. Поэтапные тестовые исследования позволили определить степень влияния гетерогенности размещения топливных частиц, использования различных ядерных данных, учета анизотропии коэффициентов диффузии при полномасштабных расчетах на точность определения коэффициента размножения ячейки топливного блока и реактора, изотопного состава топливной композиции, скоростей ядерных реакций, неравномерности энерговыделения. В результате исследований были разработаны и верифицированы расчетные модели активной зоны и ее компонентов для прецизионных и проектных программ нейтронно-физического расчета MCU, MCNP 5/MONTEBUNS, UNK, WIMSD4, JAR-HTGR, была модифицирована библиотека нейтронных констант программы WIMSD4, используемой при проведении проектных нейтронно-физических расчетов ГТ-МГР.

Анализ результатов расчетов температурного коэффициента реактивности с использованием библиотек ядерных данных, которые сформированы на базе файлов оцененных данных JENDL 3.3 и ENDF B5,6, позволяет сделать вывод о том, что использование JEND L3.3 является более консервативным приближением в от-

ношении выполнения условия отрицательности температурного коэффициента реактивности для режимов работы ГТ-МГР. Полученные в расчетных исследованиях результаты позволили сформулировать условие, при котором температурный коэффициент реактивности остается отрицательным во всем диапазоне температуры и выгорания: соотношение между массой ^{239}Pu , ^{241}Pu и массой ^{167}Er должно быть не более 25.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kodochigov N., Sukharev Yu., Marova E. e.a. Neutronic features of the GT-MHR reactor. — Nucl. Engng Design, 2003, v. 222, p. 161—171.
2. Boyarinov V., Glushkov E., Davidenko V. e.a. Development and calculation of neutronic benchmark models for the GT-MHR type reactor cells. — In: The 2nd Intern. Topical Meeting on HTR Technology. China, Peking, Sept. 22—24, 2004, Paper C29, CD.
3. Митенкова Е.Ф., Новиков Н.В. Технология прецизионных расчетов для решения нейтронно-физических задач ядерных реакторов. — Известия РАН, 2004, № 2, с. 72—86.
4. Kodochigov N., Sukharev Yu., Marova E. e.a. Features of calculation of temperature reactivity coefficient in the GT-MHR reactor. — In: 3rd Intern. Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology. Johannesburg, South Africa, 1—4 Oct., 2006, Paper C00000173, CD.
5. Boyarinov V.F., Glushkov E.S., Fomichenko P.A. e.a. Computational analysis of experimental results on spatial distributions of fission reaction rates in the annular core of a modular HTGR, obtained at the ASTRA critical facility. — In: Intern. Conf. on Advances in Nuclear Analysis and Simulation. Canada, 10—14 Sept., 2006, Paper D044, CD.

УДК 621.039.546

ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГТ-МГР С РАЗНЫМ ТОПЛИВОМ

Кодочигов Н.Г., Сухарев Ю.И., Марова Е.В., Усынина С.Г.

Одним из аспектов, определяющих привлекательность использования ГТ-МГР в энергетике, является адаптация его активной зоны к разному топливу. В микрочастицах с многослойным защитным покрытием можно использовать любой делящийся материал как с воспроизводящими изотопами (^{238}U или ^{232}Th), так и без них. При этом концентрацию делящегося материала по отношению к графитовому замедлителю, соотношение делящихся и воспроизводящих

изотопов, степень гетерогенности активной зоны ГТ-МГР можно варьировать в широких пределах изменением обогащения топлива, размера топливных частиц, занятого ими объема в топливных элементах без изменения конструкции и компоновки реактора и органов компенсации реактивности, что затруднено в реакторах других типов. Созданные и эксплуатировавшиеся в Германии, США и Великобритании опытные реакторы и АЭС с ВТГР