

УДК 621.039.548.343

ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ ВТГР НА ОСНОВЕ МИКРОСФЕР ИЗ ОКСИДА ПЛУТОНИЯ

*Черников А.С., Пермьяков Л.Н., Курбаков С.Д., Черкасов А.С. (НПО «Луч»),
Дегадьцев Ю.Г., Лышов Л.Л. (РНЦ «Курчатовский и-нт»),
Макаров В.М. (ГНЦ РФ — ВНИИНМ им. А.А. Бочвара)*

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы в течение более четверти века разрабатывались в промышленно развитых странах мира (Великобритании, США, Германии, России, Японии). В результате созданы и испытаны экспериментальные реакторы, отработана технология изготовления элементов активной зоны, в ФРГ построен и эксплуатировался энергетический реактор электрической мощностью 300 МВт.

Основой концепции таких реакторов является применение микротвэлов в виде сферических топливных частиц-кernels с защитным многослойным покрытием из пироуглерода и карбида кремния. Микротвэлы равномерно распределены в углеграфитовой матрице. Разработаны активные зоны двух типов: на основе шаровых твэлов — в ФРГ и России и призматических сборок — в США, Великобритании и Японии, в которых микротвэлы размещены в цилиндрических элементах. Такая концепция позволяет надежно удерживать топливо и продукты деления в объеме микротвэла даже при аварийной ситуации.

В России выполнен большой объем научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ, в том числе реакторных испытаний элементов активной зоны и после-реакторных исследований [1, 2]. Выпущены технические проекты, освоена технология опытно-промышленного производства твэлов. На этой основе некоторые институты и предприятия участвуют в работах по проекту модульного ВТГР (типа ГТ-МГР) с газовой турбиной (к.п.д. преобразования энергии до 50%), предназначенного для утилизации оружейного плутония [3]. При этом учитываются особенности конструкции топлива ВТГР, обеспечивающие возможность глубокого выгорания ^{239}Pu (до 90%) за один цикл и снижающие риск его несанкционированного использования. Отработавшие блоки с выгоревшим топливом могут быть захоронены в стабильных геологических формациях без дополнительной переработки.

Приведем требования к топливу ГТ-МГР и результаты исследований на стадии концептуального проекта.

Технические требования. В результате анализа разработок топлива для различных ВТГР, а также дополнительных расчетов напряженно-деформированного состояния микротвэлов сформулированы основные технические требования:

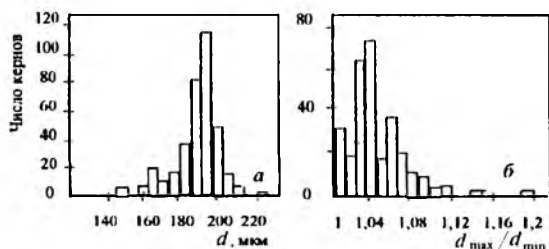
Керн:	
диаметр, мкм . . .	200 ± 25
состав ($x > 0,25$) . . .	PuO_{2-x}
плотность, г/см ³ . . .	≥ 10
несферичность зерна и микротвэла ($d_{\text{max}}/d_{\text{min}}$) . . .	$\leq 1,05$
Микротвэл:	
толщина покрытия, мкм	
$\text{PuC}_{6\text{yф}}$. . .	100 ± 15 ($\rho \sim 1$ г/см ³)
PuC_2 . . .	35 ± 8 (1,8 г/см ³)
SiC . . .	35 ± 8 (3,2 г/см ³)
PuC_3 . . .	40 ± 8 (1,8 г/см ³)
Стержневой элемент:	
диаметр, мм:	
максимальный . . .	12,72
средний . . .	12,5
минимальный . . .	12,37

длина, мм . . .	50±2
средняя загрузка оружейного плутония на один элемент, г . . .	0,24 ^{-0,1} _{+0,4}
отклонение содержания плутония в 50%-ном объеме элемента от среднего, % . . .	≤10
доля микротвзлов с поврежденными покрытиями при нормальной эксплуатации . . .	≤10 ⁻⁵
плотность матричного графита, г/см ³ . . .	1,3—1,7
Условия эксплуатации (проектные данные ОКБМ):	
среднее время пребывания твзлов в активной зоне (кампания), эф. сут . . .	840
глубина выгорания топлива, МВт·сут/кг Pu	
средняя . . .	640
максимальная . . .	1000
максимальная температура топлива (при средней температуре гелия на выходе 850 °С), °С:	
в нормальном режиме . . .	1230
с учетом перегрева . . .	1300
в аварийных условиях (в течение 100 ч) . . .	1600
теплоноситель первого контура . . .	Гелий высокой чистоты
температура гелия (вход/выход), °С . . .	490/850

Приготовление кернов. С использованием опыта предыдущих исследований по получению кернов из диоксида урана отработан процесс изготовления кернов из оксида плутония золь-гель-методом. При этом учитывали требования к ГТ-МГР — уменьшение диаметра кернов с 500 до 200 мкм и получение оксида плутония достехиометрического состава ($O/Pu = 1,67—1,75$). Это потребовало внесения дополнительных усовершенствований в применяемое оборудование и режимы процесса. Получены следующие характеристики кернов PuO_{2-x} : диаметр 200 ± 25 мкм, плотность $10,2—10,4$ г/см³, содержание примесей, 10^{-6} : Ca 80, Na 20, Fe 35, Ni 10, Cr 20. На рис. 1 показано типичное распределение размеров и коэффициента несферичности кернов в партии, на рис. 2 — микроструктура.

Изготовление микротвзлов. Режимы осаждения покрытий на керны отработаны на установке кипящего слоя. Нанесение покрытий на керны диаметром 200 мкм потребовало дополнительных исследований пиролиза углеводородов и метилтрихлорсилана. При этом потребовалось усовершенствовать конструкцию аппарата, включая доработку как системы дожигания водорода и остатков углеводородов, так и режимов процесса.

Исследования проводили с кернами из диоксида урана и имитаторами — микросферическими частицами из силиката циркония. По причине существенного разброса по диаметру (100—250 мкм) частицы из силиката циркония перед осаждением на них покрытий сепарировали потоком газа в кипящем слое. Исследованиями была определена область парамет-



Р и с. 1. Распределение кернов из диоксида урана по размеру (а) и форме (б)



Р и с. 2. Микроструктура кернов PuO_{2-x} ($\times 280$)

ров, обеспечивающих осаждение всех слоев покрытий PuC и SiC требуемой плотности с последующей оценкой интенсивности осаждения соответствующего слоя (рис. 3, 4).

В результате исследований разработана аппаратурно-технологическая схема и определены условия, обеспечивающие изготовление микротвзлов с кернами диаметром 200 мкм и четырехслойным покрытием PuC — SiC . Изготовлены и определены основные характеристики микротвзлов с кернами из диоксида урана, которые использовали на стадиях исследований и изготовления стержневых элементов.

Компактирование. В связи с тем что разработанная ранее технология была направлена на производство шаровых уран-графитовых твзлов, а в проекте ГТ-МГР предусмотрена конструкция цилиндрического элемента, были выполнены работы по конструированию, изготовлению и отработке оборудования для стержневых элементов. Изучено влияние качества исходных материалов на содержание примесей, исследованы характеристики основных операций, уточнены режимы процессов на последовательных этапах изготовления.

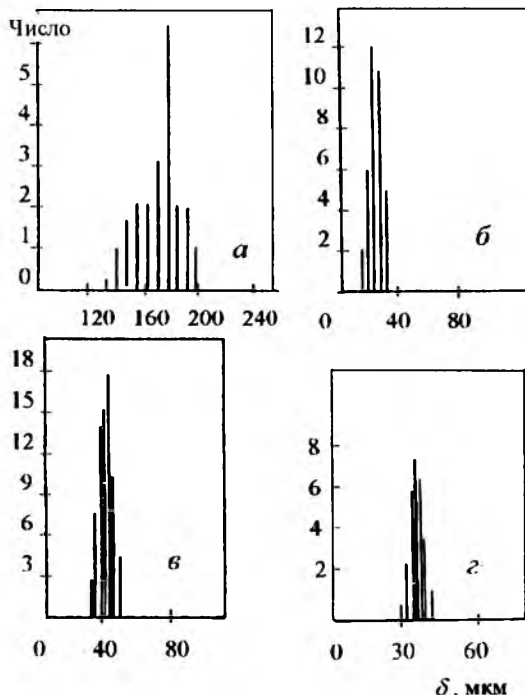
Приведем характеристики экспериментальных стержневых элементов (рис. 5):

Длина, мм . . .	Задано техническими требованиями	
Диаметр, мм . . .	50—50,2	$50 \pm 0,2$
Плотность матричного графита, г/см ³ . . .	13—13,1	$\sim 12,5$
Прочность матричного графита $\sigma_{сж}$, МПа . . .	$1,5 \pm 0,1$	1,3—1,7
Отклонение содержания топлива в 50%-ном объеме элемента, % . . .	72,7—89,3	—
	7,2—8,3	≤ 10

В экспериментах установлены режимы, обеспечивающие стабильную усадку компактных элементов в процессе их изготовления. Об этом свидетельствует незначительный разброс размеров. На этой основе скорректирован внутренний диаметр прессформы, что обеспечит надежное производство стержневых элементов нужного диаметра.

Сопоставление результатов, полученных в исследованиях и при изготовлении демонстрационных партий, подтверждает, что разработанные режимы позволяют производить стержневые элементы твзлов, соответствующие требованиям ГТ-МГР, и могут служить основой для дальнейших разработок на стадии подготовки опытно-промышленного производства.

Р и с. 5. Распределение микротвзлов в продольном срезе стержневого элемента



Р и с. 3. Распределение толщины покрытия $\text{PuC}_{\text{буф}}$ плотностью 0,95 г/см³ (а), PuC_1 , 1,9 г/см³ (б), SiC , 3,19 г/см³ (в), PuC_2 , 1,83 г/см³ (г)



Р и с. 4. Микроструктура микротвзла в экваториальном сечении ($\times 100$)



Таким образом, разработана аппаратурно-технологическая схема изготовления стержневых элементов твэлов ГТ-МГР, включая все их компоненты. Изготовлены экспериментальные партии кернов, микротвэлов и стержневых элементов, определены их основные характеристики. На стадии предреакторных исследований показано соответствие основных свойств техническим требованиям на топливо. Подготовлен переход к следующему этапу разработки топлива — выпуску опытных партий топлива на основе высокообогащенного урана и/или плутония для реакторных испытаний.

Авторы с благодарностью отмечают существенную роль в научно-технических контактах при выполнении работы со стороны Х. МакЕкерна, А. Шеноя — сотрудников фирмы Дженерал атомикс (США) и М. Лекомта, Ж. Ремо — фирмы Фраматом (Франция).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черников А.С., Пономарев-Степной Н.Н., Кошелев Ю.В. и др. Шаровые твэлы ВТГР и некоторые результаты их испытаний. — Атомно-водородная энергетика и технология, 1986, вып. 7, с. 185—194.
2. Черников А.С. Топливо и твэлы ВТГР. — Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 1, с. 32—38.
3. Егоров Н.Н., Ермаков Н.И., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Особенности топливного цикла ВТГР при утилизации оружейного плутония. Доклад на 5-й Межд. конф. по переработке, условиям обращения и хранения RECOD'98. 25—28 октября 1998 г., Франция.

Поступила в Редакцию 29.07.99

УДК 539.411

ДИАГРАММА УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ШАМОТА

*Хохлов Н.П., Абакумов А.И., Низовцева И.А., Огородников В.А.,
Цой А.П. (РФЯЦ — ВНИИЭФ), Акопов Ф.А., Минеев В.Н., Чернышов Г.П.
(НИЦ ТИВ ОИВТ РАН)*

Шамот является представителем класса огнеупоров, который наряду с высокими теплофизическими характеристиками обладает и демпфирующими свойствами, что делает его перспективным материалом при использовании в облицовках ловушек расплава активной зоны реактора.

Для анализа поведения пеноматериала при ударном нагружении важно знать диаграмму ударного сжатия (зависимость изменения деформации ϵ от приложенного давления p) и последующий характер разгрузки (диаграмму разгрузки). Последнее необходимо для оценки совершенной пеноматериалом работы после нагружения.

Отсутствие в литературе достоверных данных о диаграмме ударного сжатия пеноматериалов, особенно в области малого давления (от 0 до 100 МПа), стимулирует попытки их получения на основе экспериментальных данных [1—6]. Непосредственное получение экспериментальных значений давления и деформаций, например, методом составного стержня Гопкинсона [1] требует большого числа прямых измерений как для выявления реального хода зависимости $p(\epsilon)$, так и для набора статистических данных. Использование для построения диаграммы $p(\epsilon)$ косвенных результатов опытов [2] дает приближенный вид такой зависимости. Однако даже диаграммы ударного сжатия, полученные при прямых измерениях, например, для пенопласта ПС-1 носят порой противоречивый характер [3, 4].

Один из методов построения диаграмм сжатия и разгрузки, который основан на математической обработке экспериментальных данных, получаемых в опытах по обжатию образцов пеноматериала летящим ударником, предложен в работе [5]. Метод апробирован на разных по типу и плотности пеноматериалах (пенополистироле ПС-1, пенополиуретане ППУ-КФ, ППУ-ЗФ, сферопласте ЭДФ-4).