

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ЭФФЕКТА РЕАКТИВНОСТИ В КОМПАКТНЫХ ПЛУТОНИЕВЫХ СИСТЕМАХ

А. А. Вайвод, С. С. Бесов, А. А. Юдов, С. А. Андреев, А. В. Лукин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

Статья поступила в редакцию 04.07.2019, после доработки – 23.07.2019, принята к публикации – 04.10.2019

В работе исследовалось влияние изменения температуры плутониевых размножающих систем (РС) на их реактивность и критические параметры при проведении интегральных критических экспериментов во ВНИИТФ. Температурные коэффициенты реактивности (ТКР) РС  $\frac{\partial \rho}{\partial T}$  оценивались по зависимости коэффициента умножения  $Q$  от температуры РС и по изменению постоянной спада  $\alpha$ . Проводилось сравнение экспериментальных и расчетных (полученных с применением численного моделирования методом Монте-Карло) значений ТКР. Произведено измерение критических зазоров РС при различных температурах (в режимах работы с естественным теплоотводом и с использованием системы воздушно-го охлаждения).

**Ключевые слова:** бенчмарк-эксперименты, плутониевые размножающие системы, корреляционные эксперименты, температурный коэффициент реактивности, асимптотическая постоянная спада.

**ASSESSMENT OF REACTIVITY TEMPERATURE EFFECT IN SMALL-SIZE PLUTONIUM SYSTEMS / A. A. VAYVOD, S. S. BESOV, A. A. YUDOV, S. A. ANDREEV, A. V. LUKIN** // The work considers the impact of temperature change in plutonium breeder systems (BS) on their reactivity and critical parameters during integral critical experiments conducted in VNIITF. BS temperature reactivity factors (TRF)

$\frac{\partial \rho}{\partial T}$  were assessed according to the dependency of the multiplier factor  $Q$  on the BS temperature and according to the change in drop constant  $\alpha$ . Experimental and estimated (with Monte Carlo method) TRF values were compared. BS extreme clearance under various temperatures was measured (operating with natural heatsink and coupled with air-cooled system).

**Key words:** benchmark-experiments, plutonium breeder systems, correlation experiments, reactivity temperature factor, asymptotic drop constant.

### Введение

В 2017–2019 годах на стенде для критических сборок (СКС) были проведены прецизионные интегральные критические эксперименты с цилиндрическими и сферическими размножающими системами из плутония в  $\alpha$ -фазе. Особенность постановки проводимых экспериментов заключается в расширенной про-

грамме измерений. Помимо стандартных критических экспериментов, проводились опыты по измерению асимптотической постоянной спада мгновенных нейтронов  $\alpha$  как функции параметра  $H$  (зазор между верхней и нижней частями АЗ), определяющего реактивность системы. Производная  $\frac{\partial \alpha}{\partial H}$  этой функцио-

нальной зависимости характеризует время жизни нейтронов в РС [1], являясь, таким образом, интегральной характеристикой, дополняющей традиционно используемую величину – эффективный коэффициент размножения нейтронов  $K_{эф}$ . В ходе экспериментов также исследовалось влияние температуры РС на ее реактивность и критические параметры. Для регулирования температуры РС использовалась система воздушного охлаждения (СВО).

## 1. Эксперименты с цилиндрической РС

Размножающая система представляла собой цилиндрическую сборку из 16 дисков из металлического плутония диаметром  $\sim 120$  мм и толщиной  $\sim 4,9$  мм с несимметричным разбиением АЗ на нижнюю (НЧ) и верхнюю (ВЧ) части (4 диска в нижней части и 12 в верхней). Внешний вид и структура РС представлены на рис. 1. Плутониевые диски герметично упакованы в штампованные чехлы из нержавеющей стали толщиной  $\sim 0,2$  мм.



Рис. 1. Внешний вид цилиндрической РС из плутония

Нижняя часть системы собиралась на конусной чашке, установленной на подставке, закрепленной на подвижном штоке, верхняя часть располагалась на диафрагме, установленной на опорной трубе (см. рис. 1). Температура в центре и на поверхности РС контролировалась с помощью термопар, закрепленных с использованием специального фиксатора в верхней части РС. Сближение частей осуществлялось подъемом нижней части, закрепленной на механизированном штоке, к неподвижной верхней части, удерживаемой ажурной диафрагмой. Эта процедура проводилась дистанционно с пульта управления установки.

Зазор, соответствующий критическому на запаздывающих нейтронах состоянию  $H_{кр.зап} = 5,55 \pm 0,05$  мм, был определен экстраполяцией к нулю функции обратного коэффициента умножения от зазора  $y = \frac{1}{Q}(H)$ .

Зазор, соответствующий критическому на мгновенных нейтронах состоянию  $H_{кр.мгн} = 5,04 \pm 0,05$  мм, был определен экстраполяцией к нулю функции постоянной спада от зазора  $y = \alpha(H)$ . Функции определялись линейной аппроксимацией соответствующих экспериментальных зависимостей методом наименьших квадратов (МНК). За погрешность определения критического зазора была принята погрешность определения зазора между частями РС, которая составляет 0,05 мм.

В точке со значением зазора  $H_1 = 6,51 \pm 0,05$  мм было выполнено два последовательных измерения временных корреляционных функций с различной стабилизированной температурой РС и определены постоянные спада  $\alpha$ . Также в результате экспериментов измерялось число отсчетов детекторов от нейтронов утечки  $N$  (за вычетом фона) от размножающей системы с ДМ с источником собственного нейтронного фона плутония. Значения постоянных спада и средних чисел отсчетов за 100 с приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные для цилиндрической РС при зазоре  $H_1 = 6,51 \pm 0,05$  мм

$H$ , мм	Условия проведения эксперимента	$\alpha$ , мкс <sup>-1</sup> ( $\delta \leq 0,5$ %; $p = 0,95$ )	$N$ ( $\delta \sim 1,5$ %; $p = 0,95$ )
6,51	При температуре $58,0 \pm 5$ °С в центральной части РС	-2,065	464759
6,51	При температуре $49,7 \pm 5$ °С в центральной части РС	-1,868	572638



Рис. 2. Внешний вид сферической РС из плутония

## 2. Эксперименты со сферической РС

Размножающая система разбита на нижнюю (НЧ) и верхнюю (ВЧ) части. НЧ сборки, состоящая из трех деталей, полусферы и двух полушаров (рис. 2), собиралась на дюралюминиевой сферической подставке, закрепленной на подвижном штоке механического стенда установки. ВЧ, состоящая из ответной полусферы, собиралась на неподвижной стальной диафрагме с кольцом. Температура в центре и на поверхности РС контролировалась

с помощью термопары, закрепленной с помощью специального фиксатора в нижней части РС. Охлаждение производилось с помощью системы СВО.

Для сферической РС были проведены эксперименты по изучению влияния температурного разогрева плутониевой РС на изменение величины  $H_{кр}$ . Было определено критическое состояние РС для трех значений температур РС, полученные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные данные для сферической РС. Указана температура в центральной части РС

$T$ , °С	31±5	45±5	62±5
$H_{кр.зап}$ , мм	0,41±0,05	0,30±0,05	0,18±0,05
$H_{кр.мгн}$ , мм	0,01±0,05	-0,09±0,05	-0,22±0,05
$\frac{\partial \rho}{\partial H}(2\sigma)$ , β/мм	2,46±0,48	2,55±0,53	2,51±0,44
$\frac{\partial \alpha}{\partial H}(2\sigma)$	-1,970±0,047	-1,982±0,050	-2,006±0,035
$\alpha_{DC}(2\sigma)$ , мкс <sup>-1</sup>	-0,80±0,11	-0,78±0,22	-0,79±0,11

### 3. Расчетная оценка величины ТКР

#### 3.1. Метод оценки возмущения реактивности и ТКР по результатам измерения постоянных спада $\alpha$

Оценка возмущения реактивности  $\Delta\rho$  была сделана исходя из модели реактора в одноточечном приближении [2]:

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 = \left(1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) \left(1 - \frac{\rho_1}{\beta_{эф}}\right) \beta_{эф}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – значения постоянной спада, соответственно, до и после охлаждения,  $\rho = \frac{K_{эф} - 1}{K_{эф}}$  – реактивность РС ( $\rho_1$  и  $\rho_2$  – реактивности РС, соответственно, до и после охлаждения,  $K_{эф}$  – эффективный коэффициент размножения РС),  $\beta_{эф} = 0,0019 (\pm 3 \%)$  [3] – эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Значение начальной реактивности  $\rho_1$  в точке с зазором  $H$  оценивалось по формуле

$$\rho_1 = (H_{кр.зап} - H) \frac{\beta_{эф}}{(H_{кр.мгн} - H_{кр.зап})}, \quad (2)$$

температурный коэффициент реактивности РС с АЗ из альфа-плутония –

$$\frac{\partial\rho}{\partial T} \approx \frac{\Delta\rho}{\Delta T}. \quad (3)$$

Погрешность определения разности температур  $\Delta T$  составляла  $\sim 1,0$  °С. Погрешность косвенно определенного температурного коэффициента реактивности оценивалась согласно [4].

#### 3.2. Метод оценки возмущения реактивности по результатам измерения коэффициента умножения $Q$

Реактивность  $\rho$  связана с коэффициентом умножения  $Q$  следующим образом [6]:

$$\rho = \frac{B}{1-Q} = \frac{B}{1 - \frac{S_{н.и}N}{S_{с.ф}N_0}}, \quad (4)$$

где  $S_{н.и}$  – интенсивность независимого источника нейтронов, 1/с;  $S_{с.ф}$  – интенсивность источника нейтронов, обусловленного собственным фоном плутония, 1/с;  $N_0$  – число отсчетов детекторов за 100 с в случае, когда независимый источник установлен в макете РС из инертного материала, 1/с.

Коэффициент  $B$  оценивался с применением метода Монте-Карло (использовалась программа ПРИЗМА [7]). Погрешность косвенно определенной реактивности оценивалась согласно [4].

Согласно (4) изменение реактивности  $\Delta\rho$  при изменении температуры РС (при охлаждении) для двух состояний

$$\Delta\rho = B \left( \frac{1}{1-Q_2} - \frac{1}{1-Q_1} \right). \quad (5)$$

С использованием (4) получим зависимость реактивности от числа отсчетов нейтронов утечки за фиксированный временной интервал:

$$\rho = \frac{B}{1-Q} = \frac{B}{1 - \frac{S_{н.и}N}{S_{с.ф}N_0}} \approx \frac{300}{1 - 0,011N}. \quad (6)$$

С использованием формулы (6) и экспериментальной зависимости скорости счета от температуры  $N(T)$  для сферической РС была построена зависимость реактивности от температуры  $\rho(T)$ . Методом МНК была определена эмпирическая (линейная) зависимость  $\rho(T)$  и определен ТКР как тангенс угла наклона линии к оси  $T$ .

#### 3.3. Оценка ТКР с использованием численного моделирования

Температурный коэффициент реактивности  $\frac{\Delta\rho}{\Delta T}$  модели размножающей системы при  $K_{эф} \sim 1$  можно оценить, зная коэффициент  $\alpha_L$  теплового расширения материала АЗ и коэффициент чувствительности  $K_{эф}$  модели РС к одновременному относительному изменению ее размеров (для РС в виде шара – к изменению ее радиуса):

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta T} \approx \alpha_L \vartheta, \quad (7)$$

где  $\vartheta = \frac{\partial K_{\text{эф}}}{\partial(\delta R = \delta H)}$  (для цилиндрической РС,

$\delta H = \delta R = \alpha_L \Delta T$ ),  $\vartheta = \frac{\partial K_{\text{эф}}}{\partial(\delta R)}$  (для РС шаровой

геометрии,  $\delta R = \alpha_L \Delta T$ ) – коэффициент чувствительности  $K_{\text{эф}}$  модели РС к одновременным относительным изменениям ее размеров (для РС в виде шара – к изменению ее радиуса),  $\alpha_L$  – коэффициент линейного расширения материала АЗ,  $\Delta T$  – величина изменения температуры РС. Коэффициенты чувствительности  $K_{\text{эф}}$  к относительным изменениям размеров моделей РС из плутония при неизменной массе определялись методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА. Упрощенные расчетные модели РС представляли собой соответственно сплошной цилиндр и сплошной шар из  $\alpha$ -плутония.

В результате расчетов были получены следующие значения коэффициентов чув-

ствительности: для цилиндрической РС  $\vartheta = -1,7 \pm 0,6 \%$  ( $1\sigma$ ), для сферической РС  $\vartheta = -1,6 \pm 0,6 \%$  ( $1\sigma$ ). Средний коэффициент теплового расширения  $\alpha_L$  для  $\alpha$ -плутония при температуре 300–400 К равен  $(60 \pm 5) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  [8]. Таким образом, расчетный температурный коэффициент реактивности, определенный по формуле (7) с использованием коэффициентов чувствительности, определенных по данной расчетной модели, равен: для цилиндрической РС  $\frac{\Delta\rho}{\Delta T} \approx - (10,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  ( $p = 0,95$ ), для сферической  $\frac{\Delta\rho}{\Delta T} \approx (9,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  ( $p = 0,95$ ). Погрешности определялись в соответствии с [4].

### 3.4. Сравнение значений ТКР, полученных разными способами

В табл. 3 приведены значения температурных коэффициентов реактивности, оцененные для цилиндрической и сферической

Таблица 3

*Значения температурных коэффициентов реактивности (расчетные оценки и экспериментальные значения для плутониевых РС)*

Тип РС	Определение $\frac{\partial\rho}{\partial T}$		
	по изменению постоянной спада	по изменению коэффициента умножения	методом Монте-Карло (использовались упрощенные расчетные модели)
Цилиндрическая	$-(6,3 \pm 1,3) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , или $-0,033 \pm 0,007 \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}$ ( $p = 0,95$ )	$-(8,2 \pm 1,6) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , или $0,043 \pm 0,009 \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}$ ( $p = 0,95$ )	$-(10,2 \pm 0,9) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , или $-0,053 \pm 0,005 \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}$ . В предположении, что уменьшение реактивности происходит только из-за расширения по радиусу: $-(7,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ( $p = 0,95$ ) или $-0,039 \pm 0,004 \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}$ ( $p = 0,95$ )
Сферическая	$-(3,4 \pm 0,7) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , или в единицах $\beta_{\text{эф}}$ $-0,018 \pm 0,004 \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}$ ( $p = 0,95$ )	$-(3,61 \pm 0,7) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ , или в единицах $\beta_{\text{эф}}$ $-0,019 \pm 0,004 \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}$ ( $p = 0,95$ )	$-(9,6 \pm 0,9) \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ( $p = 0,95$ ), или $-0,051 \pm 0,005 \beta_{\text{эф}} / ^\circ\text{C}$ ( $p = 0,95$ )

РС двумя способами с использованием экспериментальных данных и значений, полученных с помощью численного моделирования.

Между рассчитанными по формуле (7) при использовании упрощенных моделей и экспериментальными температурными коэффициентами реактивности плутониевых РС существует различие. Вероятнее всего, оно связано с тем, что тепловое расширение деталей происходит в пределах технологических зазоров ( $\sim 0,1$  мм) между плутониевыми деталями и защищающими чехлами, что приводит к компенсации эффекта изменения реактивности вследствие расширения. Для модели цилиндрической РС можно учесть данный эффект, считая, что уменьшение реактивности является следствием расширения только в одном направлении (по радиусу РС). Рассчитанное значение ТКР в этом случае приведено в табл. 3, оно совпадает в пределах погрешности с экспериментальными значениями, полученными двумя способами.

#### **4. Учет температурного расширения при постановке экспериментов с плутониевыми РС**

Если принять, что температура деталей в момент эксперимента равна  $\sim 70$  °С, а температура деталей, при которой измерялись их размеры, равна  $\sim 35$  °С, диаметр нагретой детали (цилиндрической РС) будет на  $\sim 0,25$  мм больше. Такое различие размеров деталей приводит к различию расчетных коэффициентов размножения моделей РС на  $\sim 0,0025$  в абсолютных единицах. Эта величина сопоставима с суммарной погрешностью  $K_{эф}$  расчетной модели. Очевидно, изменением размеров деталей плутониевой РС при изменении температуры пренебрегать нельзя. Детали из плутония находятся в защищающих чехлах, следовательно, отсутствует возможность прямых измерений размеров плутониевых деталей при проведении экспериментов.

Один из способов устранения данной неопределенности – установление стабилизированного температурного режима работы, при

котором температура РС будет близка к температуре деталей, при которой измерялись их размеры. В расчетной модели необходимо указывать температуру, при которой определялся критический зазор РС (который, очевидно, зависит от температуры РС).

### **Заключение**

По полученным экспериментальным данным были оценены значения температурных коэффициентов реактивности плутониевых размножающих систем различной геометрии. Для РС сферической геометрии измерены значения критических зазоров РС при трех значениях температур. Проведение определения критического зазора  $H_{кр}$  при известной постоянной температуре РС позволяет устранить неопределенность, связанную с температурой РС, и тем самым повысить точность бенчмарк-модели.

### **Список литературы**

1. Бесов С. С., Ершова Л. С., Костенко И. И., Лукин А. В., Самойлова Л. Ю., Соколов Ю. А., Хмельницкий Д. В. Верификация нейтронных констант по результатам нестационарных экспериментов с размножающими системами // Атомная энергия, 2011, т. 110, вып. 4, с. 231–236.
2. Лукин А. В. Физика импульсных ядерных реакторов. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006.
3. Кипин Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1967.
4. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов аблюдений. – М.: Наука, 1970.
5. МИ 2083-90. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

6. Лукин А. В., Хмельницкий Д. В. О коэффициентах умножения в критических экспериментах и калибровке реактивности в абсолютных единицах // Импульсные реакторы: история создания и перспективы использования. Труды межотраслевой научной конференции / Под ред. С. В. Воронцова. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2016. Т. 1.

7. Зацепин О. В., Кандиев Я. З., Кашаева Е. А., Малышкин Г. Н., Модестов Д. Г. Расчеты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ВВЭР-1000 // Вопросы атомной науки и техники, сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 4, с. 64–73.

□8. Чиркин В. С. Теплофизические

8. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968.

Контактная информация –

Вайвод Александр Андреевич

e-mail: dep5@expd.vniitf.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 12–18.