

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, Н. А. ВЛАСОВ (зам. главного редактора), И. Н. ГОЛОВИН, Н. А. ДОЛЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ (зам. главного редактора), А. К. КРАСИН, А. И. ЛЕЙПУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ (главный редактор), П. Н. ПАЛЕЙ, Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

- В. И. Баранов. Развитие радиогеологии в СССР . . . 419
- Я. Богач, П. Квиттнер, Э. Сабо. Определение некоторых примесей в кремнии высокой чистоты методом активационного анализа без разрушения образцов . . . 421
- Я. Божик, Е. Кубовский, С. Лягак. Измерение материального параметра критической сборки «Анна» . . . 425
- Н. Г. Ваданина, Ю. П. Сайков. Критерий сравнения состояния твэлов активной зоны реактора . . . 429
- Ю. В. Чушкин, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзьв, Т. М. Гусева, В. В. Колесов, М. Д. Дерибизов. Радиационная стойкость пластинчатых твэлов реактора СМ-2 . . . 432
- Б. Г. Егызаров, В. А. Зюбка, А. И. Новиков. Выбор оптимальной аналитической методики при инструментальном активационном анализе . . . 435
- В. И. Субботин, Д. М. Овечкин, Д. Н. Сорокин, А. П. Кудрявцев. Теплоотдача при кипении натрия в условиях свободной конвекции . . . 437
- В. П. Бобков, М. Х. Ибрагимов, В. И. Субботин. Расчет коэффициента турбулентного переноса тепла при течении жидкости в трубе . . . 442
- В. Я. Кудяков, М. В. Смирнов, Н. Я. Чукреев, Ю. В. Посохин. Образование двухвалентного тория в среде расплавленного хлористого калия . . . 448
- Н. М. Зуева, Л. С. Соловьев. Равновесие и устойчивость плазмы в аксиально симметричных тороидальных системах . . . 453

ПЕРСОНАЛИЯ

Исаак Константинович Кикоин (к 60-летию со дня рождения) . . . 460

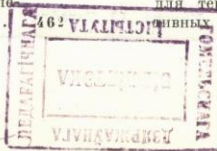
АННОТАЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

Н. Е. Врежнева, Ю. И. Капшанинов, С. Н. Озипанер. Изучение кинетики электролитического выделения гидроокисных осадков редкоземельных элементов . . . 462

- А. С. Тшечкин. Вычислительное устройство для обработки γ -спектров . . . 462
- В. Е. Дроздов, Ю. С. Рябухин. К расчету мощностей поглощенных доз полого цилиндрического облучателя с неравномерным распределением активности . . . 463
- М. Задубан, Л. Медвидь. Определение суммарной β -активности долгоживущих продуктов деления при помощи K^{40} . . . 464
- Г. П. Березина, Я. Б. Файнберг, А. К. Березин. Экспериментальное исследование потоков быстрых ионов, образующихся в системе пучок — плазма . . . 465

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

- М. А. Сарычев, Ю. Н. Алексеенко, Н. В. Звонов, В. И. Буйницкая, И. В. Рогожкин, А. А. Баталов, Ю. В. Александров. Распределение потока тепловых нейтронов в различных отражателях с каналами . . . 467
- Т. М. Гусева, Е. Ф. Давыдов, В. Н. Сюзьв, Ю. В. Чушкин. О возможном характере изменения объема тепловыделяющих композиций при твердом распухании . . . 469
- Е. М. Лобанов, Н. В. Зиновьев. Определение необходимой статистики при бескорреляционной расшифровке данных активационного анализа . . . 471
- С. Н. Вотвинов, Т. М. Гусева, В. И. Клименков. О радиационной стойкости сплава циркония с 1% ниобия в условиях работы реактора СМ-2 . . . 473
- А. Э. Шемьл-заде. О сухих выпадениях продуктов ядерных испытаний . . . 474
- К. П. Захарова, Г. М. Иванов, В. В. Куличенко, Н. В. Крылова, Ю. В. Сорокин, М. И. Федорова. Об использовании тепла химических реакций для термической переработки жидких радиоактивных отходов . . . 475



Результаты расчетов эквивалентного содержания U^{235} ($г/см^2$), отнесенного к единице поверхности твэла, в первом контуре реактора и водяной петле

Периоды кампании	Содержание U^{235} , рассчитанное по			Среднее значение отношений		
	J+Br	Sr	Ba	P_{Ba}/P_{Sr}	P_{Sr}/P_J	P_{Ba}/P_J
Первый контур	$(2,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$(6,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$	$(7,3 \pm 0,7) \cdot 10^{-8}$	$1,2 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,3$	$3,4 \pm 0,5$
VI—VII 1964 г.	$(1,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$	$(4,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$	$(10,8 \pm 0,8) \cdot 10^{-8}$	$2,4 \pm 0,4$	$2,6 \pm 0,3$	$6,2 \pm 0,4$
IX—X 1964 г.	$(1,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$	$(3,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$	$(7,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-8}$	$2,1 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,2$	$5,6 \pm 0,4$
X 1964—II 1965 гг.	$(3,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$(5,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$	$(12,6 \pm 2,0) \cdot 10^{-8}$	$2,3 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,3$	$4,1 \pm 0,5$
III—V 1965 г.	$(3,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$(5,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-8}$	$1,4 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,3$	$1,7 \pm 0,2$
VI—VII 1965 г.	$(3,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$	$(5,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-8}$	$(8,3 \pm 1,5) \cdot 10^{-8}$	$1,5 \pm 0,2$	$1,9 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,5$
X—XII 1965 г.	$(2,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-8}$	$(3,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,8$
XII 1965—II 1966 гг.	$(1,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-8}$	$(2,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-8}$	$(3,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$	$1,6 \pm 0,5$	$1,5 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,3$
II—IV 1966 г.	$(1,56 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$(2,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$	$(2,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-8}$	$0,9 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,3$	$1,5 \pm 0,1$
IV—VII 1966 г.						
Петля VI 1965 г.	$(4,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$	$(2,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$	$(8,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	$3,6 \pm 0,1$	$5,0 \pm 0,1$	$17,9 \pm 0,7$

Примечание. В таблице указаны среднеквадратичные ошибки нескольких измерений, проведенных в течение одной кампании.

июнь 1965 г. Возможно, это связано с загрузкой в реактор другой партии твэлов. Для сравнения там же приведены результаты анализа специальных экспериментов на водяной петле с заведомо негерметичным твэлом. Видно, что особенно резко изменяется отношение эквивалентного содержания, рассчитанное по Ba и J. Таким образом, отклонение эквивалентного содержания урана, определяемого для различных элементов и изотопов, свидетельствует о степени негерметичности твэлов активной зоны реактора.

Опыт использования определения эквивалентного содержания урана даже по сумме изотопов показал, что величина эквивалентного содержания U^{235} позволяет оценивать состоя-

ние твэлов активной зоны в течение всего цикла работы реактора, а также сравнивать эту величину с известной величиной поверхностного загрязнения.

Использование величины эквивалентного содержания урана в качестве критерия сравнения состояния твэлов активной зоны различных реакторов позволит полнее использовать опыт контроля за герметичностью твэлов.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В. Д. Ганже, К. А. Коноплеву, В. А. Перельгину и В. Т. Шарову за постоянное внимание и помощь в работе.

Поступила в Редакцию 13/XII 1966 г.

Радиационная стойкость пластинчатых твэлов реактора СМ-2

Ю. В. ЧУШКИН, Е. Ф. ДАВЫДОВ, В. Н. СЮЗЬЕВ, Т. М. ГУСЕВА,
В. В. КОЛЕСОВ, М. Д. ДЕРИБИЗОВ

УДК 621.039.548

Твэлы реактора СМ-2 выполнены в виде прямых пластин размерами $280 \times 33,4 \times 0,8$ мм. В качестве материала оболочки и матрицы используется электролитический никель. Толщина оболочки равна 0,15 мм. Горючим служит двуокись урана (90%-ного обогащения), объемное содержание которой в тепловыделяющей композиции составляет 40%.

Твэлы изготовлены методом прокатки сборки, состоящей из рамки, сердечника и двух покровных пластин. Прокатку производили при

температуре 900°C и суммарном обжатии до 75%. Окончательным этапом термообработки был нормализующий отжиг при 800°C .

Сборка твэла представляет прямоугольную кассету из нержавеющей стали с хвостовиком и головкой для захвата. Пластины собирают с шагом 2,40 мм; их дистанционирование осуществляется гофрированной гребенкой. Всего в сборке 54 пластины, расположенные в два ряда [1—3].

Исследуемые твэлы работали при максимальном тепловом потоке $6 \cdot 10^6$ ккал/м²·ч,

максимальной температуре стенки $\sim 200^\circ\text{C}$ и максимальной температуре в центре $\sim 280^\circ\text{C}$. Температура охлаждающей воды составляла 80°C . С целью более полного представления о скорости накопления радиационных повреждений исследовали твэлы с различными выгораниями урана — от 1,9 до 30%.

Результаты исследований

Всего было исследовано шесть партий твэлов со следующими выгораниями урана: 1,9; 2,2; 6,6; 13,7; 24,0 и 30%. При визуальном осмотре существенных дефектов у большинства твэлов обнаружено не было. Изменения на наружной поверхности в виде небольших бугорков имело лишь несколько твэлов с максимальным выгоранием. Отмечено значительное увеличение прочности и уменьшение пластичности твэлов в целом. Если необлученные твэлы очень легко сгибались и правились, то облученные гнулись с трудом, а после снятия нагрузки возвращались к прежней форме. На поверхности облученного твэла четко выделялись светлые контуры никелевой рамки вокруг значительно более темной оболочки над тепловыделяющей композицией.

Размерная стабильность твэла

Изменение объема твэла определяли путем измерения плотности (с точностью $\pm 0,02 \text{ г/см}^3$) гидростатическим взвешиванием (табл. 1).

Изменение плотности тепловыделяющей композиции рассчитывали умножением значений

Результаты измерений объема твэла Таблица 1

Выгорание, %	0	1,9	2,2	6,6	13,7	24,0	30,0
Средняя плотность целого твэла, г/см^3	9,12	9,09	9,10	8,97	8,85	8,65	8,52
Изменение плотности, %	0	0,3	0,2	1,6	3,0	5,1	6,6
Изменение плотности тепловыделяющей композиции, %	0	0,7	0,5	3,7	6,9	11,8	15,2

распухания целого твэла на отношение объема всего твэла к объему одной тепловыделяющей композиции. Изменения плотности твэла с малыми выгораниями (1,9 и 2,2%) невелики и лежат в пределах погрешности измерений. При больших выгораниях уменьшение плотности существенно больше величин погрешностей измерений, что позволяет сделать оценку зависимости этого уменьшения от выгорания. Данные табл. 1 не вызывают сомнений относительно линейности этой зависимости, описываемой соотношением $\delta\rho = 15V$, где $\delta\rho$ — изменение плотности, %; V — выгорание, г-осколков/см^3 . Если выгорание выражать в процентах, то коэффициент пропорциональности будет равен не 15, а 0,5.

Структурная стабильность твэла

Для изучения структуры твэла готовили образцы, вырезанные вдоль и поперек направления прокатки. Образцы заливали в специальных обоймах сплавом Вуда. Как известно [4], подготовка образцов горячего дисперсионного типа весьма сложна. Опробование имевшихся методик положительных результатов не дало. В частности, не удалось избежать выкрашивания и вытравливания зерен UO_2 при шлифовке и травлении электролитами на основе уксусной и азотной кислот, серной кислоты и при химическом травлении.

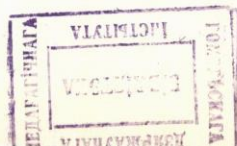
Поэтому была разработана методика шлифовки, полировки и травления, включающая следующие операции:

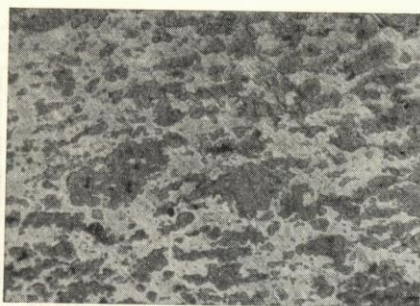
шлифовка на бумагах КЗ-8, КЗ-4, КЗМ-40, КЗМ-28, КЗМ-20, предварительно смоченных керосином (последний номер бумаги смачивался парафинированным керосином);

полировка на бархате с подачей абразивной эмульсии Al_2O_3 ;

химическое травление в растворе соляной кислоты (плотность $1,19 \text{ г/см}^3$).

Следует отметить, что образцы облученных твэлов травятся более энергично. В образцах необлученных твэлов наблюдается большое количество вытянутых зерен UO_2 , расположенных участками темно-серого цвета на фоне светлой матрицы. Мелкие зерна чаще имеют сферическую форму, крупные зерна не монолитны и, очевидно, состоят из более мелких. Зерна располагаются цепочками параллельно покрытию. Переходного слоя между матрицей и оболочкой нет. Неровности оболочки отсутствуют (рис. 1). Микротвердость материала оболочки равна 183 кг/мм^2 .





Р и с. 1. Микроструктура необлученных твэлов ($\times 130$)

В образцах облученных твэлов (выгорание 30%) заметных изменений строичной структуры нет. Микротвердость материала оболочки составляет $\sim 375 \text{ кг/мм}^2$.

Влияние нагрева на размерную и структурную стабильность образцов твэла

С целью определения предельной температуры, ниже которой изменения размера образцов не происходит, проводился их ступенчатый изотермический отжиг. В качестве характеристики, описывающей физический объем образцов, была выбрана плотность. Геометрический объем определяли как сумму физического объема и открытой пористости.

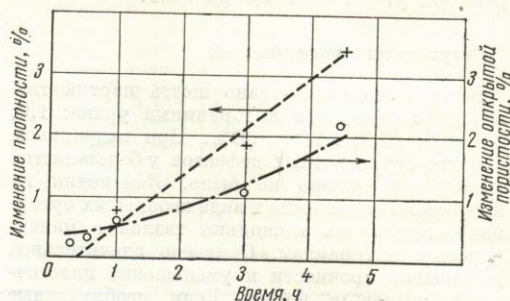
Отжиг образцов проводили в выдвигающейся рейке, которую вводили в заранее нагретую до заданной температуры печь. Измерение температуры проводили хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром. Колебания температуры при отжиге составляли $\pm 10^\circ \text{ C}$. Время отжига 1 ч. Результаты отжига образцов с выгоранием 24% представлены в табл. 2.

Изменение свойств образцов в зависимости от температуры отжига Таблица 2

Свойства образцов	Температура отжига, $^\circ \text{C}$				
	20	100	300	350	450
Средняя плотность, г/см^3	8,76	8,75	8,71	8,50	7,90
Открытая пористость, %	1,0	1,0	1,6	2,6	3,2
Изменение плотности, %	—	0	0,5	3,0	10,0

Результаты измерения распухания образцов в зависимости от времени отжига при температуре 350° C приведены на рис. 2.

Структурный анализ образцов был выполнен по описанной выше методике. В образцах после отжига появились трещины, форма и размеры



Р и с. 2. Зависимость изменения распухания от времени отжига при температуре 350° C .



Р и с. 3. Микроструктура образца из отожженного облученного твэла ($\times 200$).



Р и с. 4. Микроструктура зерен UO_2 после отжига ($\times 1000$).

которых показаны на рис. 3 (Т-образная трещина между оболочкой и композицией и по композиции). Существенных изменений структуры зерна UO_2 не обнаружено (рис. 4).

Заключение

Приведенные данные позволяют сделать вывод о высокой структурной и размерной стабильности пластинчатых твэлов реактора СМ-2. Линейный характер увеличения объема с выгоранием дает возможность оценивать изменения физических, гидравлических и теплотехнических параметров активной зоны. Замечено, что у некоторых твэлов с выгоранием урана 30% начался процесс расслаивания, ведущий к потере герметичности, что может быть связано с нарушениями в режимах охлаждения или расхолаживания. Проверка послед-

него обстоятельства позволит выбрать критерий, определяющий предельно допустимое выгорание. Весьма вероятно, что такой критерий будет связан с вопросами физики реактора, а не со степенью его радиационной повреждаемости.

Поступила в Редакцию 14/II 1967 г.
В окончательной редакции 19/XI 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Фейнберг и др. «Атомная энергия», 8, вып. 6, 493 (1960).
2. Доклад № 320, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
3. А. Г. Самойлов и др. Дисперсионные тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1965.
4. Б. Л а с т м а н. Радиационные явления в двуокиси урана. М., Атомиздат, 1964.

Выбор оптимальной аналитической методики при инструментальном активационном анализе

В. Г. ЕГИАЗАРОВ, В. А. ЗЮБКО, А. И. НОВИКОВ

УДК 543.53

Выбор оптимальной аналитической методики при инструментальном активационном анализе представляет трудности даже для образцов с несложным элементарным составом. Для образцов сложного состава или для образцов материалов высокой чистоты, в которых содержание основного элемента близко к 100%, решение указанной задачи связано с кропотливыми и трудоемкими вычислениями. Такие задачи целесообразнее решать на вычислительных машинах.

Рассмотрим случай идентификации элементов по γ -спектрам с помощью многоканального анализатора.

Пусть N_k соответствует числу импульсов, зарегистрированных в k -м канале анализатора. Это число импульсов в общем случае соответствует результату суммарного вклада в k -й канал всех компонентов смеси, энергия которых соответствует номерам каналов, большим или равным k , и находится из выражения [1]

$$N_k = \alpha_{kr} C_r,$$

где α_{kr} — вклад от r -го компонента в k -й канал; C_r — интенсивность r -го компонента, пропорциональная концентрации r -го радиоактивного изотопа; $k=1, 2, \dots, n$ — номер

канала; $r = 1, 2, \dots, l$ — номер компонента, соответствующего энергетической линии E_r , расположенной в r -м канале.

Предположим, что общий спектр состоит только из фотопиков и комптоновских распределений от отдельных изотопов, тогда ошибка в числе отсчетов в k -м канале, в который попадает излучение k -го исследуемого изотопа, определяется также вкладом всех других изотопов в k -й канал, т. е.

$$\Delta N_k \sim \sqrt{A_{kk} + \sum_{r=1}^l A_{rk} + \sum_{r=1}^l B_{rk} \eta(E_r - E_k)},$$

где A_{kk} — число импульсов от k -го элемента в k -м канале; A_{rk} — вклад фотопиков r -х элементов в k -ом канале; B_{rk} — вклад комптоновских распределений r -х элементов в k -й канал; E_r и E_k — энергии, соответствующие r -му и k -му каналу анализатора;

$$\eta(E_r - E_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } E_r - E_k > 0; \\ 0, & \text{если } E_r - E_k \leq 0. \end{cases}$$

Приняв, что фотопики имеют гауссовское распределение, можно показать, что ошибка

$$\Delta N_k \sim \sqrt{\frac{C_k}{\sigma_k} + \sum_{r=1}^l \left\{ \frac{C_r}{\sigma_r} \exp \left[-\frac{(E_r - E_k)^2}{2\sigma_r^2} \right] + \frac{C_r}{E_r} \eta(E_r - E_k) \right\}}, \quad (1)$$