

и получим

$$\sigma_s(T_m, d_0) = C_i W_0 [1/E_T(d_0) - 1/T_m]/T_m. \quad (3)$$

Используя $\sigma_s(T_m, d_0)$ и зная энергию бомбардирующих частиц (а следовательно, и T_m) на разной глубине проникновения в мишень [5], можно определить, задаваясь пороговой энергией образования кластеров данного размера $E_T(d_0)$, их пространственное распределение в мишени. На рисунке представлены результаты расчетов для разных значений пороговой энергии. Значение W_0 для меди принято равным 0,4 [2]. Начало спада кривой зависит от значения $E_T(d_0)$, которое, таким образом, может быть найдено экспериментально.

УДК 621.039.542.344

Влияние продуктов деления на теплофизические свойства карбида урана

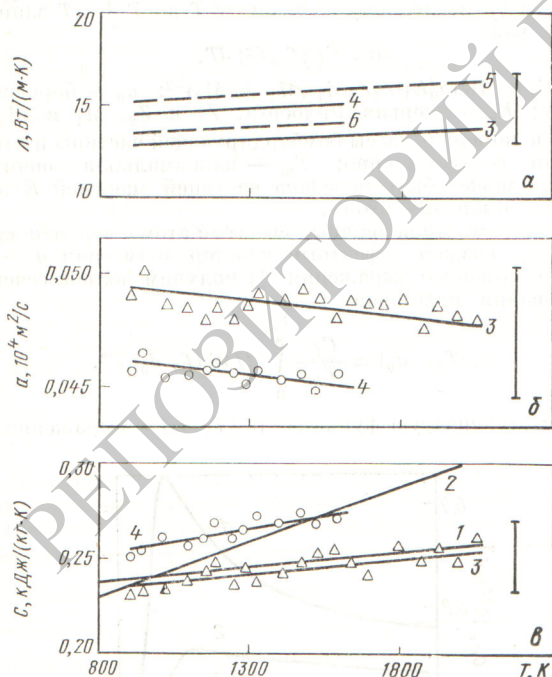
БАЛАНКИН С. А., БЕЛЕВАНЦЕВ В. С., БЫКОВ И. И., ЗЕЛЯНИН В. А., КОТЕЛЬНИКОВ В. Б., СКОРОВ Д. М., ЯРЦЕВ В. А.

Облучение сложным образом изменяет как макро- и микроструктуру, так и химический состав топлива, в частности карбидного, вследствие накопления продуктов деления. Однако исследование топлива после глубокого выгорания сопряжено со значительными трудностями, поэтому в целях определения влияния твердых продуктов деления на теплофизические свойства в УС вводились имитаторы осколочных элементов в количестве, соответствующем выгоранию 8% тяжелых атомов. Для сравнения были исследованы также образцы исходного карбидного топлива. Фазовый состав полученных материалов, распы-

танный по данным микрорентгеноспектрального и химического анализов, представлен в таблице.

Теплофизические свойства материалов исследовали нестационарным методом при ступенчатом изменении теплового потока [1]. Образец нагревали электронным пучком в вакууме на специальной установке [2]. Для металлических образцов оцененная максимальная приборная погрешность составляла 7; 6 и 12% для теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности соответственно. Теплофизические свойства исходного УС определяли в интервале температуры от 880 до 2100 К, свойства имитатора облученного топлива удалось измерить только до температуры 1580 К. Дальнейшее повышение температуры приводило к заметному газовыделению из образца, связанному, по-видимому, с интенсивным испарением некоторых компонентов многофазной системы, и к существенному возрастанию доли ионов в анодном токе, поэтому измерять теплофизические свойства используемым методом становилось невозможно.

Исследуемые образцы имели форму диска диаметром 9 мм и толщиной 1,5 мм. Пористость исходного карбида урана составила 12%, имитатора облученного топлива 4%. Пористость рассчитывали по аддитивным значениям теоретической плотности многофазного материала, определяемым с учетом объемных долей и теоретической плотности фаз. Одновременно определяли теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность исследуемых материалов. По экспериментальным данным были найдены уравнения регрессии (рисунк, а). Для определения влияния продуктов деления на теплопроводность карбидного топлива экспериментально найденные значения теплопровод-



Зависимость теплопроводности (а), температуропроводности (б), теплоемкости (в) исходного карбида урана (Δ) и имитатора облученного карбида топлива ($\circ$): 1, 2 — данные работ [3] и [4]; 3, 4 — данные настоящей работы для карбида урана и имитатора; 5, 6 — теплопроводность карбида урана и имитатора, рассчитанная для восьмипроцентной пористости соответственно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Norgett N., Robinson M. — Nucl. Engng. Design, 1975, v. 33, p. 50.
2. Merkle K. Report AERE-R-5269, 1966.
3. Jenkins M., Wilkens M. — Phil. Mag., 1976, v. 34, N 6, p. 1155.
4. Клименков В. И., Кирсанов В. В. — В кн.: Радиационная физика твердого тела и реакторное материаловедение. М., Атомиздат, 1970, с. 23.
5. Sternheimer R. — Phys. Rev., 1959, v. 115, p. 137.

Поступило в Редакцию 16.06.80

Фазовый состав образцов исследуемых материалов

Материал	Фазовый состав	Содержание фаз, об. %
UC	UC UC _{1,88}	87,5 12,5
Имитатор облученного UC	(U _{0,963} Zr _{0,03} Mo _{0,007})C (U, P39) ₂ C ₃ UMoC ₂ (P39) ₂ O ₃ Ba _{0,56} Sr _{0,44} O U(Ru _{0,63} Pd _{0,37}) ₃	78,38 13,55 2,09 3,07 0,74 2,17

ности исходного карбида урана и материала-имитатора были пересчитаны в предположении, что пористость составляет 8%. В целях уменьшения возможных погрешностей, связанных с пересчетом, принималось, что теплопроводность материалов линейно зависит от пористости. Согласно полученным результатам введение продуктов деления привело к снижению теплопроводности УС на 9,4% или на 1,2% на каждый процент выгорания тяжелых атомов. Статистическая проверка, проводимая как сравнение двух выборочных средних при неизвестных характеристиках рассеяния генеральных совокупностей, подтвердила значимость полученных результатов с высокой степенью достоверности.

Температуропроводность УС при введении продуктов деления уменьшилась на 7% (см. рисунок, б). Полученные значения теплоемкости исходных образцов УС (см. рисунок, в) хорошо согласуются с данными работы [3], но отличаются от полученных в работе [4]. Как видно из рисунка в, теплоемкость УС линейно зависит от температуры, что

характерно для большинства тугоплавких соединений, в том числе и карбидов. При введении продуктов деления в УС теплоемкость увеличилась на 8%, что соответствует 1% на каждый процент выгорания тяжелых атомов. Это связано, по-видимому, с тем, что теплоемкость большинства новых фаз в материале-имитаторе превышает теплоемкость карбида урана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баланкин С. А., Скоров Д. М., Ярцев В. А. — Атомная энергия, 1976, т. 41, вып. 4, с. 271.
2. Баланкин С. А., Скоров Д. М., Ярцев В. А. — Атомная энергия, 1979, т. 46, вып. 4, с. 261.
3. Technical reports ser. N 14. A report from a panel held in Vienna, 8—12 Oct. 1962, Vienna, IAEA, 1963.
4. Affortie C. — J. Nucl. Mater., 1970, v. 34, p. 105.

Поступило в Редакцию 08.08.80

УДК 621.09.54:539.128.4.144:539.166.3

Полный анализ выгоревшего топлива АЭС с ВВЭР-440

ЗЕЛЕНКОВ А. Г., ПИРОЖКОВ С. В., ПЧЕЛИН В. А., РОДИОНОВ Ю. Ф., ТАРАСЕВИЧ В. П., СИНЮТИНА З. М., ЧИСТЯКОВ Л. В., ШАТИНСКИЙ В. М., ШВЕЦОВ И. К., ШУБКО В. М., БАРАНОВ С. А.

В целях проверки корректности реакторных программ, а также для прогноза наработки изотопов трансурановых элементов нами были предприняты измерения состава топлива образца твэла из кассеты четвертого блока Нововоронежской АЭС (НВАЭС) с расчетным выгоранием 33,2 кг/т. С помощью разработанных авторами радиохимических, масс-спектрометрических и радиометрических методов определено содержание 20 тяжелых нуклидов от ^{232}U до ^{246}Cm . В качестве средств инструментального анализа использовали масс-спектрометр МИ1201, газоразрядный пропорциональный проточный счетчик для определения интенсивности α и β -излучений [1], полупроводниковые гамма- и альфа-спектрометры [2], прецизионный магнитный альфа-спектрометр [3] с позиционно-чувствительным полупроводниковым детектором (ПЧД) [4] или фотопластинками с ядерной эмульсией.

Для анализа был использован образец твэла из средней части кассеты с массой ~8 г. Проверку представительности образца и грубую оценку глубины выгорания проводили по спектрам α -излучения источников из исходного раствора, измеренным с помощью ППД [5]. Более точно выгорание образца топлива определяли с помощью масс-спектрометрии по содержанию ^{148}Nd и гамма-спектрометрии по содержанию ^{137}Cs . Оно оказалось равным $33,4 \pm 1,2$ кг/т. Относительное содержание ^{235}U , ^{236}U и ^{238}U измеряли с помощью масс-спектрометра, а содержание ^{232}U , ^{234}U и ^{238}U — с помощью полупроводникового альфа-спектрометра.

Радиохимическое выделение и очистку нептуния осуществляли хроматографическими методами. Нептуний в четырехвалентном состоянии сорбировался из исходного азотнокислого раствора на анионите. Высокую очистку нептуния от плутония достигали двумя последовательными сорбциями его на колоннах с анионитом из концентрированной соляной кислоты 0,5 н. по иодистоводородной кислоте. Химический выход превышал 0,98. Количество ^{237}Np определяли по интенсивности α -излучения, измеренной с помощью пропорционального 2 π -счетчика. Радиохимическую чистоту препарата контролировали полупроводниковым альфа-спектрометром.

Содержание изотопов плутония определяли следующим образом. С помощью пропорционального счетчика измеряли удельную интенсивность α -излучения раствора, а полупроводниковым альфа-спектрометром определяли

относительные интенсивности суммарных излучений ^{239}Pu и ^{240}Pu ($E = 5,16$ МэВ), ^{238}Pu и ^{241}Am ($E_{\alpha} = 5,5$ МэВ). Затем проводили радиохимическое выделение плутония. Измерения α -спектра плутониевой фракции с помощью того же ППД в сочетании с данными об исходном растворе позволяли определить содержание ^{238}Pu и ^{241}Am , а также ^{236}Pu и относительную интенсивность суммарного α -излучения ^{241}Pu и ^{242}Pu . Содержание ^{241}Pu находили по накоплению ^{241}Am в плутониевой мишени в зависимости от времени. Относительное содержание ^{239}Pu и ^{240}Pu измеряли с помощью магнитного альфа-спектрометра, снабженного ПЧД.

Для определения содержания ^{243}Am и ^{242m}Am проводили радиохимическое выделение америция. Относительное содержание ^{243}Am определяли непосредственно по альфа-спектру америциевой мишени, а содержание ^{242m}Am по временному накоплению в ней ^{242}Cm .

Содержание ^{242}Cm ($E_{\alpha} = 6,1$ МэВ) и ^{244}Cm ($E_{\alpha} = 5,8$ МэВ) находили непосредственно из α -спектра мишени исходного раствора и его удельной α -активности. Относительное содержание ^{243}Cm определяли на ППД по интенсивности γ -излучения энергией 210, 229 и 278 кэВ. Относительное количество ^{244}Cm , ^{245}Cm и ^{246}Cm измеряли

Состав выгоревшего топлива ВВЭР-440 с начальным обогащением 3,6% и глубиной выгорания 33,4 кг/т

Нуклид	Содержание на дату выгрузки из реактора, кг/т	Нуклид	Содержание на дату выгрузки из реактора, кг/т
^{232}U	$(0,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	^{242}Pu	$0,43 \pm 0,04$
^{234}U	$0,215 \pm 0,006$	^{241}Am	$(4,1 \pm 1,5) \cdot 10^{-2}$
^{235}U	$11,2 \pm 0,3$	^{242m}Am	$(6,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-4}$
^{236}U	$4,5 \pm 0,2$	^{243}Am	$(4,9 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$
^{238}U	941 ± 2	^{242}Cm	$(1,36 \pm 0,03) \cdot 10^{-2}$
^{237}U	$0,445 \pm 0,013$	^{243}Cm	$(3,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$
^{236}Pu	$(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$	^{244}Cm	$(1,97 \pm 0,04) \cdot 10^{-2}$
^{238}Pu	$0,137 \pm 0,006$	^{245}Cm	$(1,03 \pm 0,07) \cdot 10^{-3}$
^{239}Pu	$5,37 \pm 0,17$	^{246}Cm	$(6,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-5}$
^{240}Pu	$2,17 \pm 0,07$	Продукты деления	$33,4 \pm 1,2$
^{241}Pu	$1,06 \pm 0,06$		