

Оценки показывают, что без ядерной энергетики не могут быть осуществлены грандиозные планы роста производства электроэнергии в нашей стране. Доля АЭС в выработке электроэнергии в высокоразвитых странах к концу столетия, по-видимому, должна возрасти до 20—30%, что соответствует производству многих сотен миллиардов киловатт-часов в год. Важность и настоятельная необходимость широкого строительства АЭС определяются не только тем, что они обладают более высокой потенциальной экономичностью по сравнению с классическими электростанциями, но также и тем, что степень сравнительной экономичности АЭС (ввиду возрастания затрат на добычу ископаемого топлива для обычных тепловых электростанций) имеет тенденцию к повышению. Не менее важным является и то, что чрезвычайно высокая калорийность ядерного горючего приводит к существенной экономии трудовых ресурсов, занятых в сфере энергетического производства, особенно при транспортировке органических видов топлива.

Анализируя возможности стран—членов СЭВ, следует указать, что сдерживающим моментом в сооружении АЭС, в поставках для них сложного трудоемкого, металлоемкого и крупногабаритного оборудования может явиться производственно-промышленная база, если она не будет специализирована и в какой-то мере перестроена для обслуживания развивающейся ядерной энергетики. Но все это можно сделать на основе социалистической интеграции в духе решений XXIII и XXIV сессий СЭВ.

Конечно, специфические особенности сложившегося и перспективного топливно-энергетического баланса в разных социалистических стра-

нах накладывают свой отпечаток на сроки и масштабы предполагаемого ввода ядерно-энергетических мощностей.

На XXIV сессии СЭВ в Варшаве в мае 1970 г. подчеркивалось, что в настоящее время ни одна малая и даже средняя страна не в состоянии решить самостоятельно все основные научно-технические проблемы. Ядерная энергетика относится как раз к таким сложным научно-техническим и организационным проблемам, решение которых может быть осуществлено только на базе соответствующего разделения труда, специализации и социалистической экономической интеграции стран—членов СЭВ.

Изложенные мною состояние, положения и выводы, конечно, не претендуют на исчерпывающую полноту освещения очень сложной и многогранной проблемы развития и использования различных типов энергетических ядерных реакторов в народном хозяйстве нашей страны. Оно касалось лишь использования реакторов для производства наиболее универсального продукта—электроэнергии. Наряду с этим открываются перспективы возможного использования энергетических ядерных реакторов для решения становящейся все более острой проблемы получения пресной воды, получения химических продуктов, теплофикационных нужд и многих других целей. Работы в этих направлениях также ведутся, но это не входит в тему нашего сегодняшнего сообщения.

Однако все изложенное может служить подтверждением больших усилий советского народа, нашей Коммунистической партии, последовательно претворяющих в жизнь завет великого Ленина—«Коммунизм—это есть советская власть плюс электрификация всей страны».

## Исследование накопления изотопов плутония в горючем реактора ВВЭР-1 Ново-Воронежской АЭС

В. Я. ГАБЕСКИРИЯ, В. С. БЕЛОКОПЫТОВ, О. А. МИЛЛЕР, Г. А. СИМАКИН,  
Л. И. БУРНЯКОВ, З. И. ПАХОМОВ, Н. А. ВЛАДИМИРОВА, И. В. МАТЯЩУК

УДК 621.039.554:621.311.25:621.39

С целью экспериментального определения изотопного состава горючего, облученного в реакторе типа ВВЭР, были исследованы образцы, вырезанные из твэла реактора Ново-Воронежской АЭС (НВАЭС).

В ходе исследований, проводимых в рамках контракта № 577/RB с МАГАТЭ, решались следующие задачи:

- определение изотопного состава урана и плутония после облучения;
- определение количества изотопов плутония, образовавшихся в результате облучения;

в) определение зависимости изотопного состава горючего от глубины выгорания.

### Приготовление образцов

Кассета, из которой был извлечен твэл, облучалась 2,75 года и выдерживалась 1,5 года. Исследуемый твэл был расположен во втором ряду от периферийного ряда твэлов со стороны грани, противоположной поглотителю. В качестве горючего использовалась  $UO_2$  с 2%-ным обогащением  $U^{235}$ .

Для исследуемого твэла среднее выгорание составляло  $16,4 \text{ кг/т U}$ , а коэффициент неравномерности по длине был равен 1,3. Таким образом, максимальное выгорание в середине твэла равнялось  $21,2 \text{ кг/т U}$ . Точность относительных измерений составляла  $\pm 5\%$ , точность определения глубины выгорания была равна  $\pm 10\%$ . Измерения были выполнены с помощью  $\gamma$ -спектрометрии по известной методике [1] в горячей камере НВАЭС. Затем твэл был доставлен в НИИАР, где из него были вырезаны пять образцов, с тем чтобы получить сведения об изменении изотопного состава горючего при наиболее глубоких выгораниях.

Изучение микроструктуры  $\text{UO}_2$  показало отсутствие существенных изменений в структуре горючего за период работы твэла.

Отсутствие температурных зон свидетельствовало о том, что температура  $\text{UO}_2$  в центре брикетов не превышала  $1400\text{--}1500^\circ \text{C}$ . Это позволило использовать для радиохимического исследования лишь  $1/8\text{--}1/4$  образца в виде сектора. Вес такой пробы составлял от 0,3 до 1,0 г.

#### Методы исследований

Для определения изотопного состава урана на испаритель трехленточного источника ионов масс-спектрометра наносили исходный раствор анализируемого образца. При проведении изотопного анализа плутония последний выделяли из анализируемого раствора и очищали от осколочных элементов.

Для выделения и очистки плутония применяли экстракцию  $0,5 \text{ M}$  раствором теноилтрифторацетона в бензоле [2]. Плутоний предварительно стабилизировали в четырехвалентном состоянии нитратом натрия при нагревании на водяной бане  $1 \text{ M}$  раствора  $\text{HNO}_3$ . Экстракцию проводили в делительных воронках при отношении  $V_{\text{водн}} : V_{\text{орг}} = 1 : 1$  в течение 15 мин. Органическую фазу промывали один раз  $1 \text{ M}$  раствором  $\text{HNO}_3$ . Реэкстракцию проводили  $10 \text{ M}$   $\text{HNO}_3$ . Реэкстракт промывали бензолом два-три раза и упаривали досуха. Сухой остаток растворяли в требуемом объеме ( $1 \text{ мл}$ )  $\text{HNO}_3$  при нагревании.

Изотопный состав урана и плутония определяли на масс-спектрометрах МИ-1311 и реконструированном МИ-1305. В последнем для создания ионного пучка использовали трехленточный источник ионов. Ионный ток регистрировался счетчиком СИ-01. Материалом для ионизатора служила рениевая фольга. Методика анализа аналогична описанной ранее [3].

Содержание изотопов плутония на 1 г урана определяли двумя методами: кулонометрическим и изотопного разбавления. Количество урана в анализируемом образце определяли кулонометрически. Кроме того, эта величина контролировалась по весу образца.

Кулонометрический анализ выполняли на кулонометре ЦЛА типа К5312/02. Обычную трехмерную ячейку с рабочим объемом  $20 \text{ мл}$  помещали в тяжелый бокс. Рабочий электрод был изготовлен из платиновой сетки с геометрическими размерами  $5 \times 20 \text{ см}$ . Электродом сравнения служил насыщенный каломельный электрод. В качестве фона использовался  $1 \text{ M}$  раствор  $\text{HNO}_3$  с добавкой  $0,01 \text{ моль/л}$  сульфаминовой кислоты.

На анализ отбирали аликвоту пробы объемом  $5 \text{ мл}$ . Пробу упаривали досуха и остаток переводили фоновым раствором в ячейку. Процедура кулонометрического определения не отличалась от обычной [2]. Степень превращения была равной  $98\%$ , так как в пробах железо не обнаружено. В расчет принимались результаты, полученные при окислении и восстановлении.

Для определения содержания плутония методом изотопного разбавления в аликвотную часть анализируемого раствора добавляли  $\text{Pu}^{242}$ . После тщательного перемешивания производилось химическое выделение плутония с последующим определением изотопного состава смеси на масс-спектрометре. По известным изотопным составам анализируемого и добавляемого плутония и измеренному отношению изотопов  $\text{Pu}^{239}/\text{Pu}^{242}$  полученной смеси определяли содержание плутония в анализируемом растворе [4].

Окончательное содержание плутония в анализируемом растворе находили как среднее из двух измерений, полученных кулонометрически и методом изотопного разбавления, т. к. погрешности обоих методов примерно одинаковы.

#### Экспериментальные результаты

Результаты определения количества урана и плутония в образцах 1—5 приведены в таблице. Ошибка определения содержания урана в образцах составляла  $\sim 1\%$ . Ошибка определения содержания плутония в образцах оценивалась по среднему расхождению результатов масс-спектрометрических и кулонометрических измерений и составляла  $\sim 10\%$ .

Количество продуктов деления, образовавшихся за счет деления изотопов  $\text{U}^{235}$ ,  $\text{Pu}^{239}$  и  $\text{Pu}^{241}$ , определялось по формулам (1)—(3).

Содержание урана и плутония в анализируемых образцах

Номер образца	Вес образца (в пересчете на уран), г	Вес урана в образце (данные кулонометрии), г	Количество плутония в образце		
			данные кулонометрии, мг	изотопное разбавление, мг	среднее значение
1	0,343	0,332±0,004	1,31	1,31	1,31
2	0,505	0,494±0,005	3,75	3,36	3,55
3	0,356	0,318±0,003	2,80	3,28	3,04
4	0,944	0,936±0,009	6,20	4,78	5,50
5	0,239	0,197±0,002	1,80	1,57	1,69

Выгорание  $X$   $U^{235}$  рассчитывалось по формуле

$$X = \frac{1000}{1-\alpha^5} \left[ \gamma_0^5 - \gamma_i^5 \frac{\gamma_0^8}{\gamma_i^8 + z\omega} \right] \frac{кг}{мУ}, \quad (1)$$

где  $\gamma_0^i$  и  $\gamma_i^i$  — относительное содержание  $i$ -го изотопа до и после облучения ( $i$  — последняя цифра массового числа данного изотопа);  $\alpha^5$  — отношение эффективного сечения радиационного захвата к сечению деления  $i$ -го изотопа;  $z$  — измеренное отношение содержания плутония к урану в исследуемом образце.

Величина  $\omega$ , входящая в формулу (1), определялась из соотношения

$$\omega = \gamma_i^9 + \frac{1+\alpha^9}{\alpha^9} \left( \gamma_i^0 + \gamma_i^1 + \gamma_i^2 \frac{1+\alpha^1}{\alpha^1} \right). \quad (2)$$

Значения величин  $\alpha$  для изотопов  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$  и  $Pu^{241}$  были взяты из работ [5, 6].

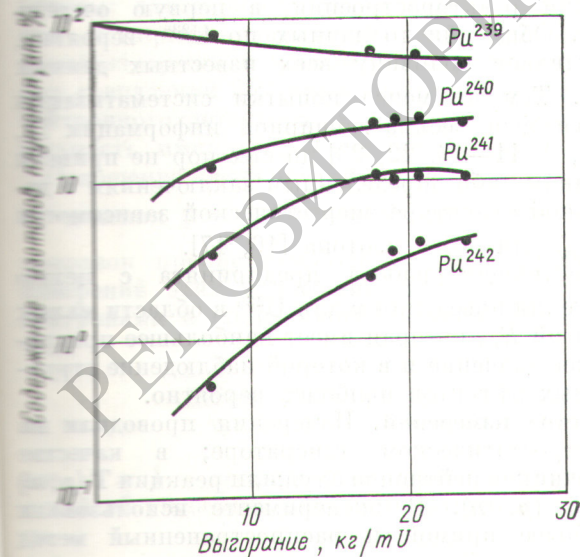


Рис. 1. Зависимость изотопного состава плутония от глубины выгорания.

Вклад изотопов плутония в общее выгорание  $Y$  рассчитывался по формуле

$$Y = \frac{z(1000-z)(\omega+1)}{1+z\omega}. \quad (3)$$

Данные по содержанию в образцах 1–5 изотопов урана и плутония (в пересчете на тонну исходного урана) в зависимости от выгорания представлены на рис. 1 и 2. На рис. 2 также показаны рассчитанные по программе POP [7] кривые накопления изотопов для решетки с реальным шагом твэла.

Погрешность измерения выгорания  $U^{235}$  определялась в основном ошибкой изотопного анализа и составляла 5%. Вклад плутония в общее выгорание определялся с точностью 10–15%, так как величины  $\alpha^9$  и  $\alpha^1$  известны с погрешностью порядка 5–10%.

Проведенные измерения показали, что вклад плутония в общее выгорание достигает в образ-

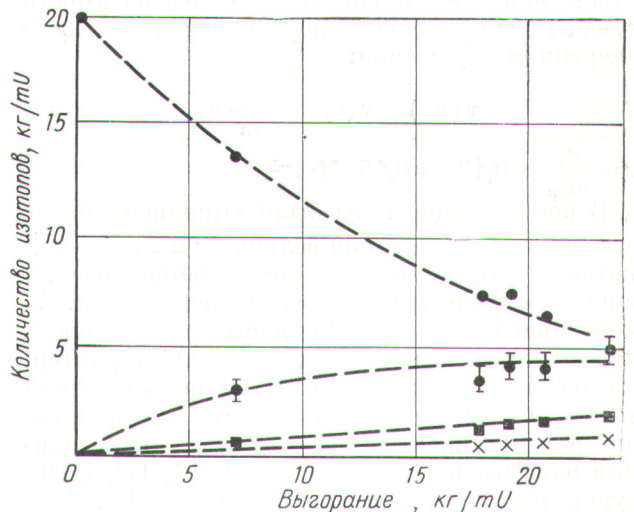


Рис. 2. Зависимость содержания изотопов урана и плутония от глубины выгорания:

— — — расчетные данные (по методу работы [7]); ● —  $U^{235}$ ; ■ —  $Pu^{239}$ ; ▲ —  $Pu^{240}$ ; × —  $Pu^{241}$ .

це с наибольшим выгоранием 50%. При этом содержание тяжелых изотопов  $Pu^{240}$ ,  $Pu^{241}$ ,  $Pu^{242}$  в накопившемся плутонии составило ~40%. (см. рис. 1). Общее выгорание в этом образце составило 23,6 кг/т U, что хорошо согласуется с результатом 21,2 кг/т U, полученным в работе [1]. Сравнение экспериментальных и расчетных данных [7] показало их удовлетворительное совпадение в пределах ошибки измерений (см. рис. 2). Аналогичные результаты были получены ранее [8].

В заключение авторы выражают благодарность А. Н. Новикову за проведение расчетов накопления изотопов в горячем Ново-Воронежской АЭС.

Поступила в Редакцию 5/II 1970 г.

## Выход мгновенных нейтронов $\bar{\nu}$ при делении $U^{235}$ нейтронами с энергией до 1,5 Мэв

Л. И. ПРОХОРОВА, Р. Е. БАГДАСАРОВ, И. И. КОТУХОВ, В. Г. НЕСТЕРОВ,  
Б. НУРПЕЙСОВ, Г. Н. СМИРЕНКИН, Ю. М. ТУРЧИН

УДК 539.173.84

Начиная с 1955 г. ведутся интенсивные исследования энергетической зависимости среднего числа нейтронов деления [1,2]. Накопленные в течение первых пяти лет данные [3, 4] подтвердили, что среднее число нейтронов, испускаемых при делении, с ростом энергии бомбардирующих нейтронов  $E_n$  возрастает в соответствии с предположением о независимости средней кинетической энергии осколков  $E_k$  от энергии возбуждения:

$$\bar{\nu}(E_n) = \bar{\nu}(0) + \frac{d\bar{\nu}}{dE_n} E_n, \quad (1)$$

где  $\frac{d\bar{\nu}}{dE_n} \approx 0,13 - 0,15 \text{ Мэв}^{-1}$ .

В последующие годы были выполнены более детальные исследования величин  $\bar{\nu}$  и  $\bar{E}_k$  [5-15], которые подтвердили существование небольших, но вполне заметных отступлений от линейной зависимости (1). По-видимому, они носят нерегулярный и достаточно сложный характер, но из-за малости эффектов и недостаточной точности и детальности измерений большинство авторов предпочитают экспериментальные данные описывать упрощенно [6, 9, 16, 17], пользуясь различными модификациями (1). Имеющиеся теоретические представления о зависимости  $\bar{\nu}(E_n)$  весьма бедны [7, 18], однако они подтверждают идею о нерегулярном характере изменения  $\bar{\nu}(E_n)$  и связывают происхож-

### ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Миллер и др. «Атомная энергия», 27, 281 (1969).
2. М. С. Милюкова и др. Аналитическая химия плутония. М., «Наука», 1965.
3. Р. Палмер. В кн. «Успехи масс-спектрометрии». М., Изд-во иностр. лит., 1963, стр. 35.
4. Р. Уэбстер. Там же, стр. 107.
5. I. Milsted, P. Fields, D. Metta. Nucl. Appl., 1/2, 136 (1965).
6. Neutron Cross Sections BNL-325, Second Edition Suppl. No. 2, Vol. 3, 1965.
7. Фейнберг и др. Итоговый отчет по контракту 459/PB с МАГАТЭ, ИАЭ, 1968.
8. G. Minton. Доклад № 266, представленный США Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).

дение нерегулярностей в ходе  $\bar{\nu}(E_n)$  с канальными эффектами — проявлениями дискретной структуры спектра переходных состояний. Наиболее яркая демонстрация этих эффектов была получена при изучении околопорогового деления  $Th^{232}(n, \gamma)$  [10, 12, 19-21].

Наиболее подробно в настоящее время исследованы ядра, представляющие интерес с точки зрения реакторостроения, в первую очередь  $U^{235}$ . Общее число данных по  $U^{235}$ , вероятно, составляет половину всех известных данных о  $\bar{\nu}$ . Тем не менее попытки систематизации имеющейся весьма обширной информации [2, 3, 6, 9, 11-13, 22, 23] до сих пор не привели к каким-либо определенным заключениям о детальной структуре энергетической зависимости  $\bar{\nu}(E_n)$  для этого изотопа [16, 17].

Настоящая работа предпринята с целью изучения поведения  $\bar{\nu}$  для  $U^{235}$  в области малых энергий  $E_n$ , которая имеет наибольшее практическое значение и в которой наблюдение структурных эффектов наиболее вероятно.

**Метод измерений.** Измерения проводили на электростатическом генераторе; в качестве источников нейтронов служили реакции  $T(p, n)$  и  $Li(p, n)$ . В эксперименте использовали наиболее прямой и распространенный метод измерения  $\bar{\nu}$  — регистрацию совпадений между импульсами от детекторов нейтронов и оскол-