

УДК 539.14

К ВОПРОСУ ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Захарова В.П. (Ин-т ядерных реакторов РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Захоронение радиоактивных отходов — актуальная проблема ядерной энергетики. Ядерные отходы содержат как осколки деления ядер, так и трансурановые элементы. Последние подвержены длительному α -распаду, что создает трудности при их захоронении (разогрев, миграция, токсичность).

Возможно, что некоторые соображения, связанные с историей поиска «острова стабильности» вокруг ядра $^{298}114$, окажутся полезными в данном случае. Существование этого острова было предсказано в некоторых теоретических работах в начале 60-х гг. Американские специалисты во главе с Д. Хоффманом попытались обнаружить следы этого острова среди продуктов подземных ядерных испытаний. Однако поиски оказались безуспешными. Ситуация прояснилась в 1971 г., когда Е. Хьюлет с сотрудниками открыли ^{258}Fm с полупериодом спонтанного деления 380 ± 60 мкс. Распад оказался необычайно стремительным. Теоретические оценки превышали измеренное значение более чем в 10^8 раз [1]. Спустя несколько лет американские физики во главе с Е. Хьюлетом и Д. Хоффманом открыли ^{259}Fm с полупериодом спонтанного деления 1,5 с [2]. В этой работе было отмечено, что, продвигаясь к постулированному острову стабильности, авторы обнаружили, напротив, море нестабильности. Продвижение в сторону еще больших значений Z и N для синтезируемых ядер лишь расширило границы моря нестабильности. В дальнейшем было высказано предположение, что при постулировании существования острова стабильности не были приняты во внимание магические свойства нарождающихся осколков [3, 4].

Возникает вопрос: нельзя ли нежелательные трансурановые элементы «сбрасывать» в море нестабильности, чтобы они спустя непродолжительное время превращались в более безопасные элементы? Для этого следовало бы облучать рассматриваемые ядра подходящими более легкими ядрами.

В качестве примера рассмотрим реакцию $^{244}\text{Pu} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{256}\text{Fm}$. Полученный элемент спонтанно делится с периодом полураспада 2,7 ч [5]. Его массовое распределение близко к симметричному. Осколки этого ядра не являются α -активными. От ^{244}Pu желательно избавляться, поскольку в результате серии распадов этого ядра образуется опасный радиоактивный газ торон ^{220}Rn .

Можно рассмотреть и другие подходящие ядерные реакции. Для этого полезно принять во внимание рисунок, заимствованный из работы [1].

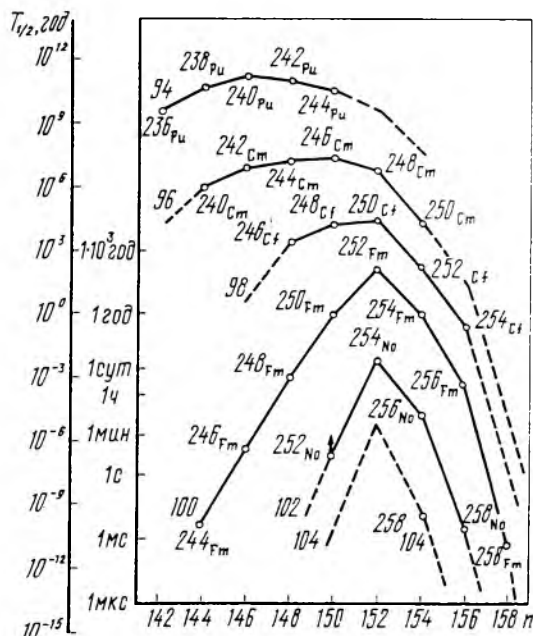
Можно оценить минимальную энергию, которую необходимо сообщить иону ядра ^{12}C для преодоления кулоновского барьера. Энергия определяется кулоновским отталкиванием двух касающихся ядер ^{244}Pu и ^{12}C и вычисляется по формуле [3] $E = k[Z_1 Z_2 / r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})]$. Здесь k , r_0 — константы; $Z_{1,2}$, $A_{1,2}$ — заряд и массовое число указанных ядер.

Расчет показал, что искомая энергия составляет ~ 75 МэВ. Отметим, что суммарная кинетическая энергия осколков при спонтанном делении ядер с $Z \geq 100$ превышает 200 МэВ.

Технология получения компаунд-ядер на ускорителях многозарядных ионов хорошо отработана. Переместить намеченное ядро в море нестабильности можно и с помощью более легких ядер, если использовать их в серии последовательных ядерных реакций.

Необходимо отметить, что предложенный метод эффективен лишь в том случае, если ядра моря нестабильности распадаются в основном за счет спонтанного деления, а не α -распада. Для рассмотренного примера это условие выполняется: для ^{256}Fm вклад спонтанного деления составляет 97%, α -распада — 3% [5].

Согласно данным [2] открытие ^{259}Fm подтвердило тенденцию к резко уменьшающемуся периоду полураспада изотопов фермия относительно спон-



танного деления с увеличением числа нейтронов. Так, добавление двух нейтронов к ^{257}Fm сократило период его спонтанного деления в $3 \cdot 10^{10}$ раз. Аналогично добавление двух нейтронов к ^{256}Fm уменьшило срок его жизни относительно спонтанного деления в 10^8 раз. Авторы связывают столь резкую дестабилизацию тяжелых изотопов фермия относительно спонтанного деления с оболочечной структурой осколков деления. Последние все ближе примыкают к дважды магическому ядру $^{132}_{50}\text{Sn}$ по мере увеличения числа нейтронов в делящемся ядре. Это объяснение согласуется с тем, что массовое распределение осколков оказалось узкосимметричным. Суммарная кинетическая энергия околomagических осколков достигла 242 ± 6 МэВ и почти полностью исчерпала доступную энергию распада.

В работе [2] отмечена общая тенденция: уменьшение времени жизни относительно спонтанного деления по мере продвижения к новым сверхтяжелым элементам, особенно когда для них увеличивается число нейтронов. Вследствие этого до 1980 г. удалось идентифицировать лишь три элемента с числом $N > 157$: ^{258}Fm , ^{256}Cf и ^{259}Md . Каждое из этих ядер распадается преимущественно за счет спонтанного деления [2].

Итак, можно предположить, что при определенных достаточно больших значениях Z и N ядра моря нестабильности резко теряют устойчивость относительно спонтанного распада на магические и близкие к ним осколки. Полученные продукты распада являются слабо активными, поэтому они более приемлемы для захоронения, чем исходные α -активные радионуклиды.

Нет никакого принципиального запрета на то, чтобы сбрасывать в море нестабильности и такие ядра, как ^{90}Sr или ^{137}Cs . Для этого их следует облучать ускоренными ионами подходящих элементов.

Согласно данным [6] ионы всех элементов, включая уран, могут быть ускорены до энергии ~ 10 МэВ/нуклон, превышающей кулоновский барьер для самых тяжелых элементов. Поэтому допустимы как однократные ядерные реакции, так и серии последовательных ядерных реакций с участием более легких ядер.

Оценка экономической целесообразности применения предложенного метода выходит за рамки настоящей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hulet E., Wild J., Loughheed R. e.a. Spontaneous-fission half-life of ^{258}Fm and nuclear instability. — Phys. Rev. Lett., 1971, v. 26, № 26, p. 523.
2. Hulet E., Loughheed R., Landrum J. e.a. Spontaneous Fission of ^{259}Fm . — Phys. Rev. C, 1980, v. 21, № 3, p. 966.
3. Wilkins B., Steinberg E. Semi-empirical interpretation of nuclear fission based on deformed-shell effects. — Phys. Lett. B, 1972, v. 42, № 2, p. 141.
4. Захарова В.П. О новых типах самопроизвольного распада ядер. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования (теория и эксперимент), 1990, вып. 8(16), с. 13.
5. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. И.К. Кикоина, М.: Атомиздат, 1976.
6. Флеров Г.Н., Оганесян Ю.Ц. Перспективы научных и прикладных исследований с помощью ускоренных тяжелых ионов. — Вестник Академии наук СССР, 1980, № 12, с. 28.

Рефераты публикуемых статей

УДК 621.039

Дик Г.Р., Ерыкалов А.Н., Петров Ю.В. Точность малогрупповой модели при расчете критической массы ВВР-М. — Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 2, с. 83—87.

Излагается малогрупповая диффузионная модель для расчета водоалюминиевой активной зоны типа ВВР-М. Модель использует из интегрального эксперимента лишь один параметр — эффективный возраст нейтронов. Сравнение с данными 22 критических кольцевых сборок с легководным отражателем показывает, что модель позволяет рассчитать $k_{\text{эф}}$ с погрешностью $\sim 0,1\%$ при изменении обогащения и концентрации топлива в широком диапазоне. Это доказывает, что она адекватно описывает нейтронно-физические процессы в реакторе. Рис. 2, табл. 1, список лит. 19 назв.

УДК 621.039.562.3

Мионов Ю.Н., Никитин Ю.М., Фомичева Т.И., Доморадов А.Е. Анализ динамики РБМК-1000 при разрыве напорного коллектора на малой мощности. — Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 2, с. 88—92.

Приводятся результаты численного исследования динамики теплоносителя и изменения мощности

РБМК-1000 при разрыве напорного коллектора на малой начальной мощности с учетом обратных связей по реактивности. Рис. 5, табл. 1, список лит. 2 назв.

УДК 669.639.4.011

Пермяков Л.Н., Антонов А.А., Исаков В.П., Шетникова С.Т. Коррозионное разрушение кермета в окислительной среде. — Атомная энергия, 1993, т. 75, вып. 2, с. 92—97.

Исследованы кинетические закономерности процесса коррозии кермета $\text{UO}_2-(\text{Ni}+\text{Cr})$ на воздухе в широком диапазоне изменения температуры 670—1570 К, давления 0,01—16 МПа, физико-химических и структурных характеристик композиционного материала.

Показано, что локальные напряжения в металлической матрице, обусловленные термехимическим расширением диоксида урана, определяют последовательность фазовых превращений в никель-хромовом сплаве при окислении и приводят к его периодическому растрескиванию. Масштаб и скорость коррозионного растрескивания матрицы зависят от изменения молекулярного объема продуктов окисления UO_2 , скорости реакции и структурных характеристик кермета. Рис. 3, список лит. 4 назв.