

НИИАР-30(761)

В.Л.Беркутов, И.А.Владимирова,
В.И.Карасев, Е.А.Карелин

**КАЛИФОРНИЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ
НЕЙТРОНОВ. СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
РАДИОАКТИВНОГО МАТЕРИАЛА**

НИИАР - 30 - 761 .

П р е п р и т

Москва-ЦНИИатоминформ-1988

УДК 546.799.8(73)

КАЛИФОРНИЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ. СПОСОБЫ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО МАТЕРИАЛА: Препринт.
НИИАР-30(76I)/ В.Л.Беркутов, Н.А.Владимирова, В.И.Карасев,
Е.А.Карелкин.- М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. - 19 с.

Исследованы способы изготовления радиоактивного материала калифорниевых источников нейтронов: пропитка пористых материалов, сорбция на неорганических и органических сорбентах, термодеструкция экстрактов, электрохимическое осаждение и изготовление интерметаллидов с металлами платиновой группы. Определено, что технологические потери калифорния при использовании этих методов не превышают 5-10 %, неравномерность распределения калифорния по длине протяженных источников - 10-15 %. Наибольшую массовую концентрацию радионуклидов в радиоактивном материале обеспечивает метод пропитки пористых материалов (до 0,45 мг/мм³). Из исследуемых методов только метод изготовления интерметаллидов с металлами платиновой группы позволяет получать невымываемый радиоактивный материал (вымываемость калифорния составляет менее 0,01 %). Определены области применения методов при производстве различных типов источников.

Табл.3, список лит. - 19 назв.

Научный редактор - канд.физ.-мат.наук А.В.Клинов



Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике (ЦНИИАтоминформ), 1988

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время накоплена достаточная информация о радиоактивных источниках ионизирующих излучений, конструкции, методах изготовления, способах и областях применения [1-4]. Не вызывает сомнений перспективность использования их в народном хозяйстве страны [5,6]. Особый интерес, с точки зрения безопасности и охраны окружающей среды, представляют закрытые источники излучения. Согласно существующим представлениям закрытый радионуклидный источник - это конструкция, препятствующая взаимным контактам радиоактивного материала и окружающей источник среды и исключаящая её загрязнение радиоактивным веществом выше допустимого действующими нормами уровня в условиях, предусмотренных для использования источника [7]. К конструкциям такого типа относят закрытые калифорниевые источники нейтронов, прочно занявшие свое место среди других радионуклидных источников излучения. За рубежом (США, Англия, Франция, ФРГ, Япония) и в Советском Союзе изготавливают значительное количество калифорниевых источников, применяющихся в самых различных областях науки, производства, медицины [2]. Для всех закрытых радионуклидных источников характерно наличие активной части - области в источнике, в которой распределен радиоактивный материал или радиоактивное вещество [8]. Способ изготовления радиоактивного вещества, используемого в источнике, его ядерно-физические, химические и механические свойства определяют качество источников и являются критерием уровня технологии их изготовления. Спо-

способ изготовления источников – это способ формирования его активной части.

В отечественных и зарубежных публикациях о способах изготовления источников излучения, в том числе калифорниевых, не всегда достаточно полно описана технология формирования их активной части. Имеются подробные сведения лишь о технологии изготовления радиоактивного материала в виде кермета на основе Cf_2O_3-Pd [2].

В данной работе оценены возможности имеющихся способов изготовления калифорниевых источников, разработанных за последние 10 лет, а также описаны исследования по созданию новых или по усовершенствованию имеющихся способов изготовления радиоактивного материала.

I. СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО МАТЕРИАЛА КАЛИФОРНИЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

I.1. Требования к радиоактивному материалу активной части источников

К радиоактивному материалу источников нейтронов предъявляют требования, выполнение которых позволяет выбрать оптимальные конструкционные решения и достичь высокого качества источников:

- обеспечение основного радиационно-физического параметра – требуемого потока нейтронов;
- максимальная удельная (объемная) активность;
- термическая, радиационная и химическая стойкость всех составляющих компонентов;
- отсутствие взаимодействия радиоактивного материала с капсулой источника.

С учетом перечисленных требований разработаны следующие методы изготовления закрытых источников нейтронов из ^{252}Cf :

- пропитка пористых материалов растворами радионуклида;
- сорбция на неорганических и органических сорбентах;
- электрохимическое осаждение;
- получение интерметаллидов с металлами платиновой группы;
- термодеструкция экстрактов.

Эти методы позволяют удовлетворять разнообразные запросы потребителей с учетом конкретных физических, конструктивных и экономических показателей.

1.2. Метод пропитки пористых материалов

Данный метод используют для изготовления не только калифорниевых, но и источников других видов излучений (β , γ) [9,10]. Он отличается простотой исполнения, не требует специального аппаратного оснащения, что позволяет реализовывать его дистанционно практически в любой экранированной камере.

В этом методе используют высокую гидрофильность некоторых пористых материалов, способных поглощать значительные количества растворов радионуклидов.

В различных странах использовали разнообразные пористые материалы [2]: кварцевый порошок, спрессованные металлические порошки, оксиды и силикаты некоторых металлов и др. Однако не все эти материалы полностью отвечали основным требованиям (высокая пористость, химическая инертность, устойчивость к высоким температурным и радиационным нагрузкам и т.д.), предъявляемым к подложкам для пропитки. Поэтому для практического использования данного метода потребовалась тщательная проверка возможностей ряда широко доступных пористых материалов с развитой внутренней пористостью (например прессованный пористый оксид алюминия), а также материалов, адсорбирующих только за

счет развитой поверхности (дробленый кварц, оксиды некоторых металлов). Все изучаемые материалы пропитывали азотно-кислыми растворами калифорния или юрия с концентрацией азотной кислоты 0,1–1 моль/л, затем сушили при температуре $T = 200^\circ\text{C}$ и для фиксации радионуклида в виде термостойкого оксида прокаливали при $T = 600+800^\circ\text{C}$.

Технологические показатели способа пропитки и особенности процесса для всех изученных материалов приведены в табл. I. Потери радионуклида при использовании данного метода минимальны. Во всех случаях можно получить технологический выход 92–98 %. Однако только пеноалунд обладает достаточно высоким удельным содержанием, что, наряду с высокой радиационной и термической устойчивостью, сохранением агрегатного состояния при термообработке, делает его очень удобным материалом в качестве подложки для пропитки (см. табл. I). В этом материале вследствие высокой пористости, хорошей смачиваемости и капиллярного эффекта радиоактивный раствор заполняет внутренние поры, где радионуклид и фиксируется при термообработке. Опыт работы полностью подтвердил правильность выбора этого материала. Все источники общетехнического назначения с потоками нейтронов $\Phi = 1 \cdot 10^6 \div 2 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, а также источники медицинского назначения с $\Phi \leq 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ изготавливают с использованием метода пропитки пеноалунда в виде таблеток или гранул.

I.3. Сорбция на неорганических сорбентах

Соединения этого класса представляют интерес при использовании в качестве возможного материала для изготовления активной части калифорниевых источников, поскольку, как известно [1], они являются ионообменниками высокой селективности, а также имеют высокую радиационную и термическую устойчивость. Была изучена возможность использования альмосиликатов структуры $(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{CaO})\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ (цеолиты), фосфатов циркония и титана и кремнийсодержащих сорбентов (кремнеземное пористое волокно и силикагель).

Таблица I

Технологические показатели метода пропитки
для различных пористых материалов

Материал подложки	Способ пропитки	Удельное содержание радионуклида в подложке (предельное), мг/мг	Особенности процесса пропитки
Дробленая сталь марки Х18Н10Т в виде таблеток	Полное погружение таблетки в раствор	0,001	Возможно однократное насыщение, так как при последующих погружениях происходит смыв ранее сорбированного радионуклида
Спеченный оксид алюминия (пеноалунд, пористость 60-70 %): в виде таблеток	Смачивание раствором торца таблетки	0,93	Возможно многократное смачивание с промежуточной сушкой. Смыва не происходит, так как идет заполнение внутренних пор
в виде дробленых гранул (0,5-1,2 мм)	Упаривание раствора с радионуклидом в присутствии дробленого пеноалунда	0,9	Спекания и прилипания гранул к стенкам посуды не происходит
Дробленный кварц (0,1-0,32 мм)	Накапывание раствора с промежуточной сушкой	0,04	При большом удельном содержании радионуклида во время прокали порошек спекается в трудноразрушаемый монолит
Порошки оксидов металлов (0,05-0,25 мм): тория	То же	0,007	При большом удельном содержании радионуклида происходит сильное спекание композиции и увеличение её объема
алюминия	"	0,005	

Однако после первых экспериментов такие ионообменники, как цеолиты и фосфаты металлов, были признаны непригодными, поскольку их максимальная поглощающая способность (до 7 мг-экв/г) реализуется только при использовании растворов с $\text{pH} \geq 3$, что неприемлемо для трансплутониевых элементов (ТПЭ), находящихся в виде катионов только в кислых растворах [12]. В слабокислых растворах (0,01–0,1 моль/л) емкость этих сорбентов падала настолько, что использование их становилось нецелесообразным. Кроме того, цеолиты во время термообработки при $T = 700^\circ\text{C}$ деформировались, а соединения с фосфатами после термообработки становились гигроскопичными, что затрудняло дальнейшую работу с ними.

Известно [11], что структурной основой кремнийсодержащих сорбентов типа кремнеземного пористого волокна (КПВ) или силикагеля являются кремнекислородные тетраэдры, образующие цепи поликремниевых кислот с OH -группами на концах. Диссоциация данных групп, происходящая в щелочной среде, определяет сорбционные свойства этих сорбентов. Однако, как отмечалось, сорбция катионов ТПЭ возможна только из кислых растворов, поэтому использовать кремнийсодержащие материалы в качестве ионообменников невозможно. Тем не менее большая пористость этих материалов позволяет механически пропитывать их растворами калифорния или других ТПЭ. Была определена поглощающая способность этих материалов, способ пропитки и применимость для изготовления активной части источников (табл.2). Пропитку сорбентов проводили многократно азотно-кислыми растворами калифорния или другими ТПЭ (концентрация кислоты до 0,5 моль/л). После каждой пропитки сорбент сушили при температуре 100°C , по окончании пропитки прокаливали при $T = 600\text{--}700^\circ\text{C}$ для перевода радионуклида в термически устойчивую форму – оксид.

Кроме того, для выяснения возможности использования кремнийсодержащих сорбентов в качестве подложки для пропитки была исследована их химическая стойкость в растворах кислот и в органических растворах, используемых в технологии изготовления источников. После обработки материа-

Таблица 2

Характеристика кремнийсодержащих пористых материалов

Материал подложки	Способ пропитки	Удельная масса ТПЭ в подложке, мг/мг		Примечание
		предельная	допустимая*	
КПВ	Погружение в раствор, многократное смачивание	0,43	0,26	При достижении предельного насыщения волокно теряет гибкость, становится ломким, хрупким
Силикагель (фракция 0,5-1,0 мм)	Погружение в раствор	I	0,2	При максимальном насыщении гранул (60 %) рассыпается на куски

* Критерием допустимого удельного содержания радионуклида в подложке являлось сохранение эластичности КПВ и целостности гранул силикагеля.

лов в растворе азотной кислоты с концентрацией 4 моль/л при температуре до 100 °С и в растворах фосфорорганических и высших изомерных карбоновых кислот (0,5 моль/л) перечисленные материалы сохранили поглощающую способность по ТПЭ, эластичность и механическую прочность. Для изучения радиационной стойкости силикагеля и КПВ их облучали флюенсом нейтронов $2 \cdot 10^{15}$ и $2,8 \cdot 10^{16}$ см⁻², что по внешнему нейтронному облучению соответствовало дозам, полученным этими материалами за 5 лет эксплуатации. Видимых механических повреждений у исследуемых материалов не наблюда-

ли. Однако выщелачиваемость радионуклида из обоих материалов увеличивалась по мере возрастания дозы облучения и достигала 1,3 % для КПВ при флюенсе нейтронов $2,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, что связано, по-видимому, с образованием микродефектов в материалах.

Таким образом, можно сделать вывод, что силикагель и КПВ можно использовать в качестве материала для изготовления активной части калифорниевых источников с удельной массой ^{252}Cf в подложке не более 0,2 мг/мг для силикагеля и 0,26 мг/мг для КПВ. Достоинство этих материалов – возможность формирования из них активной части очень малого диаметра (0,5–1,5 мм) с достаточно высокой массовой концентрацией радионуклида. Недостатком является то, что активная часть на основе кремнийсодержащих сорбентов будет находиться в выщелачиваемой форме, что нежелательно с точки зрения охраны окружающей среды.

Метод был успешно применен при изготовлении источников на основе ^{244}Cm и некоторых калифорниевых источников медицинского назначения.

Г.4. Сорбция на органических сорбентах и термодеструкция экстрактов

Иониты на основе высокомолекулярных органических соединений широко применяют для селективного выделения и разделения радиоактивных элементов. Исследовалась возможность использования этих соединений при совмещении операций выделения радионуклида из смеси различных элементов и получения гранулированного материала для активной части источников.

В мировой практике для изготовления нейтронных калифорниевых [2,13], гамма- и бета-источников [10] используют сорбцию на катионитах и анионитах, причем масса ^{252}Cf в смоле может достигать 5 мг [13].

Ограничения в использовании смол связаны с радиационным разрушением материала и некоторыми радиолитическими эффектами при сорбции из высокоактивных растворов. Однако, если после сорбции радиоактивных элементов провести термообработку при температуре 200–500 °С в течение нескольких часов, то смола переходит в углеродсодержащую форму, нерастворимую в воде, прочно фиксирующую радионуклид.

Анализ структуры смол отечественного производства позволил выделить аниониты типа ВПК и АНКБ, в качестве функциональных групп в которых используются пиридиновые и карбонильные группы [14]. Поглощающая способность этих смол достаточно высока (130–170 мг/г для двухвалентных металлов), а при термическом разложении ионитов данного типа остается углеродный остаток в виде гранул, объем которых в два раза меньше исходных зерен смолы.

Исследования по изучению возможности использования этих смол для сорбции на них ^{252}Cf и для последующего изготовления на этой основе активной части показали, что после насыщения смол ВПК и АНКБ радионуклидами Me^{+3} и последующей термодеструкции их можно получить микросферические композиции на основе углерода и оксида калифорния с массовой концентрацией ^{252}Cf до 2 мг/см³. При этом образуется сыпучий гранулированный материал с размерами микросфер (0,22±0,07) мм и насыпной плотностью 0,8 г/см³.

Способ вполне приемлем и перспективен для изготовления активной части калифорниевых источников, тем более, что, разработав надежную систему дозирования гранул с одинаковым содержанием радионуклида в них, можно автоматизировать процесс изготовления активной части практически любого размера.

Отсутствие необходимого количества отечественных смол с требуемыми характеристиками сдерживает развитие этого метода в настоящее время.

Органические материалы используют и во вновь разработанном методе изготовления радиоактивного материала путем

термодеструкции экстрактов ТПЭ в карбоновых и фосфор-органических кислотах.

Предварительно была показана принципиальная возможность получения покрытий из оксидов или из других трудно-растворимых соединений ТПЭ на поверхности подложки из металла методом пиролиза экстрактов, содержащих ТПЭ. Такие композиции можно использовать для изготовления источников излучения, например, на основе ^{252}Cf , ^{244}Cm и др. [15].

Метод предполагает экстракцию ТПЭ в выбранный экстрагент, смачивание поверхности подложки полученным экстрактом и последующую её термообработку. В результате термодеструкции экстракта на поверхности остается прочно сцепленное с ней равномерное покрытие, содержащее ТПО. Процесс смачивание-термообработка может быть повторен многократно.

В результате дальнейших исследований были определены виды экстрактов и материал подложки, позволяющие получать лучшие покрытия. Наиболее подходящие экстракты - смесь высших изомерных карбоновых кислот с числом атомов углерода 5-11 и растворы фосфорорганических кислот (ДЭГФК или ЭЭГФК) с концентрацией 0,5 моль/л в декане.

В качестве материалов подложек могут быть использованы нержавеющая сталь, никель, титан, платина. Кроме того, определены условия нанесения экстракта и режим процесса термодеструкции. Выяснено, что для уменьшения потерь радионуклида, обусловленных стеканием экстракта, его вскипанием и разбрызгиванием при нагревании, необходимо на подложку наносить нагретый до $T = 80-90^\circ\text{C}$ экстракт, а процесс термодеструкции проводить ступенчато, в две стадии.

Характеризуя этот метод в целом, следует отметить, что максимальное содержание ТПЭ на 1 см^2 покрытия составляет 1 мг. Технологические потери радионуклида не превышают 5 %, выщелачиваемость ТПЭ из покрытия, определенная по методике, описанной в работе [16], составляет 0,03-0,1 %. Покрытие имеет высокие адгезионные свойства, неравномер-

ность распределения радиоизотопа по поверхности не превышает $\pm 10\%$. Внешнее нейтронное облучение флюенсом $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и внутреннее α -облучение дозой $7 \cdot 10^9 \text{ Гр}$ практически не изменяют свойств покрытий. Увеличение дозы внутреннего α -облучения до $2 \cdot 10^{10} \text{ Гр}$ приводит к возрастанию выщелачиваемости ТПЭ до $1,5\%$, но прочность сцепления покрытия с подложкой остается высокой.

Разработанный метод может быть рекомендован для изготовления активной части различных калифорниевых источников, а также источников с другими радионуклидами.

1.5. Электрохимическое осаждение

Электрохимическое осаждение широко используют при изготовлении источников излучений [2,10], что обусловлено рядом достоинств этого метода. Главные из них – точность дозировки радионуклида в изделие, работа с растворами, разнообразие форм подложек и равномерность нанесения излучателя, возможность дистанционной работы с относительно простой аппаратурой и др. Сложность электрохимического осаждения калифорния и других ТПЭ состоит в том, что все ТПЭ являются электроотрицательными металлами, а поэтому из любых протонсодержащих растворителей (водные растворы, спирты и др.) в виде металла они не осаждаются. Выделение происходит в виде гидроксида [9], который затем термической обработкой переводится в оксид.

На процесс электросаждения калифорния влияет множество факторов, поэтому разработка этого метода потребовала больших усилий. Было выяснено, что среди протонсодержащих растворителей лучшие результаты достигаются при использовании водно-спиртовых электролитов. На полноту и количество осажденного на катоде калифорния влияют состав электролита (отношение органического и водного компонентов, концентрация азотной кислоты и калифорния) и режим электролиза (плотность тока, продолжительность процесса,

температура электролита). Для каждого из этих параметров существует определенная область значений, которая позволяет успешно проводить электрохимическое осаждение. За счет выделения водорода на катоде в процессе электролиза околокатодное пространство подщелачивается, в результате чего и образуется гидроксид калифорния. Указанные параметры влияют на ширину этого подщелоченного слоя. При большой ширине слоя гидроксид калифорния образуется в объеме раствора и на катод не осаждается, а при малой ширине - на катоде осаждается незначительное количество калифорния.

Был разработан режим электроосаждения, который позволяет получать на катоде осадок, содержащий калифорния на 1 см^2 до $0,8 \text{ мг}$. Полнота извлечения калифорния из электролита при этом составляет не менее 96% , неравномерность распределения калифорния по длине протяженных источников, полученных этим способом, не превышает $\pm 15 \%$, а выщелачиваемость после прокаливания осадка на воздухе при температуре 700°C составляет $0,3-0,5 \%$. В качестве материала катода можно использовать платину или другие металлы платиновой группы, при этом обеспечивается удовлетворительная прочность сцепления электрохимического покрытия с подложкой.

Метод электрохимического осаждения успешно применяют при изготовлении протяженных (штырьковых и цилиндрических) источников медицинского назначения. В этом случае фактор линейной равномерности радионуклида в источнике является определяющим.

Г.6. Изготовление кермета $\text{Cf}_2\text{O}_3 - \text{Pd}$

Изготовление кермета $\text{Cf}_2\text{O}_3 - \text{Pd}$ является основным методом формирования активной части нейтронных источников в США. Данный способ позволяет получать массовую концентрацию калифорния в протяженной проволоке до 20 мкг/мм^3 , в спеченной таблетке до 250 мкг/мм^3 [2].

Метод заключается в получении в водном растворе мелкодисперсного осадка калифорния (например оксалата) и в восстановлении содержащихся в этом же растворе катионов палладия до металла [17]. Восстановление проводится при перемешивании, благодаря чему металлический палладий покрывает плотным слоем каждую частичку осадка калифорния. Затем полученный плакированный осадок отфильтровывается, прессуется и спекается, в результате чего образуется кермет, представляющий собой "соты" из палладия, заполненные оксидом калифорния. Для получения проволоки керметную заготовку многократно подвергают ковке и волочению с промежуточным отжигом.

Достоинство этого метода - невыщелачиваемость радионуклида, так как оксид калифорния оказывается ампулированным в палладию. Однако исследования, проведенные с калифорниевым источником CVN-5 фирмы *Amer sham* (Англия), использующей керметную проволоку в качестве радиоактивного материала, показали, что выщелачиваемость калифорния составила около 0,1 % [18]. Это обстоятельство можно объяснить либо случайным загрязнением в процессе изготовления, либо тем, что при резке керметной проволоки на отрезки необходимой длины разрушается палладиевое покрытие на частицах оксида калифорния.

Метод, безусловно, универсален, позволяет изготавливать как компактные заготовки с большим содержанием ^{252}Cf в них, так и проволоку с равномерным линейным распределением радионуклида, в результате чего её можно дозировать в зависимости от требуемого потока нейтронов. Тем не менее из-за сложного и трудоемкого процесса изготовления метод нигде, кроме США, не используется, в том числе и у нас в стране.

1.7. Изготовление интерметаллидов калифорния с платиной (палладием)

Интерметаллид $Pt_5 Cf(Pd_5 Cf)$ образуется при нагревании до $T = 1000 \div 1300$ °C в атмосфере особо чистого водорода смеси порошков оксида калифорния с платиной (палладием) или оксида, нанесенного на подложку из платины (палладия) [19]. В этих условиях оксид калифорния восстанавливается до металла, образуется интерметаллид, а затем твердый раствор интерметаллида в платине (палладии).

Полученный таким образом радиоактивный материал характеризуется исключительно высокой степенью фиксации калифорния в подложке. Выщелачиваемость калифорния составляет не более 0,005 %, т.е. такой радиоактивный материал относится к категории невыщелачиваемых веществ; возможная масса калифорния в 1 мм^3 материала до 100 мкг.

Недостатком этого метода является использование атмосферы водорода, поэтому необходимы специальные меры по обеспечению безопасной работы. Кроме того, следует отметить, что метод получения интерметаллидов предполагает фиксацию уже распределенного в подложке калифорния.

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ЧАСТИ КАЛИФОРНИЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ

Основные показатели методов изготовления активной части калифорниевых источников приведены в табл.3. Как видно, все перечисленные методы могут быть применены и применяются для различных конкретных целей. Максимальную массовую концентрацию ^{252}Cf в радиоактивном материале обеспечивают методы изготовления кермета и пропитки пеноалунда. Причем значение 150 мг/мм^3 (см. табл.3) для пеноалунда не является предельно возможным. Для других радионуклидов, например для ^{244}Cm , это значение составляет 450 мг/мм^3 . Вследствие надежности и простоты исполнения метод пропитки универсален и широко исполь-

Сравнение методов изготовления активной части

Метод изготовления	Максимальная массовая концентрация ^{252}Cf в активной части, з мкг/мм^3		Выщелачиваемость калифорния, %	Область применения метода
	в СССР	за рубежом		
Пропитка пористых материалов (пеноалунд в виде таблетки)	150	-	0,1-0,2	Мощные с высокой удельной активностью источники различного назначения
Сорбция на неорганических сорбентах:				
	КПВ	70	-	0,1
оксид алюминия	-	10	0,2	
51 Сорбция на органических сорбентах	2	6,5	0,3	Точечные источники небольшой мощности
Термодеструкция органических экстрактов	35	-	0,03-0,1	Источники со сложной конфигурацией активной части, источники малого диаметра
Электрохимическое осаждение	30	10	0,3-0,5	Протяженные конструкции с равномерным нанесением радионуклида по длине и поверхности подложки
Изготовление кермета $\text{Cf}_2\text{O}_3-\text{Pd}$ в виде:				
	проволоки	-	20	0,1
таблетки	-	250	0,01	
Изготовление интерметаллидов $\text{Cf}-\text{Pt}$	100	-	0,005	Компактные с высокой удельной активностью источники, протяженные источники с равномерно распределенным калифорнием по длине активного сердечника

зуются. В ряде случаев, когда не требуются очень высокие потоки нейтронов от источника и нет больших ограничений в отношении размеров, т.е. допустимо двойное ампулирование, вполне могут быть пригодны другие изученные методы.

Большинство медицинских источников нейтронов изготавливают с одинарной капсулой для того, чтобы обеспечить минимальный диаметр источника. Для таких источников важно иметь активную часть с невыщелачиваемым радионуклидом. Как видно из табл.3, с этой точки зрения метод получения интерметаллидов оказывается единственно пригодным, так как он обеспечивает выщелачиваемость калифорния менее 0,01 %. Что касается достижения максимально возможной массовой концентрации ^{252}Cf при использовании метода получения интерметаллидов, то достигнутое в настоящее время значение (100 мкг/мм^3) не является предельным. Имеются предпосылки для существенного увеличения этого значения.

ВЫВОДЫ

1. Проведен комплекс исследований по оптимизации и разработке методов, обеспечивающих изготовление различных типов калифорниевых источников нейтронов.

2. Показано, что все исследованные методы используются для изготовления радиоактивного материала калифорниевых источников различного назначения.

3. Найдено, что метод пропитки пористого материала пеноалунда обеспечивает максимальную массовую концентрацию радионуклида в радиоактивном материале (до $0,45 \text{ мг/мм}^3$), что позволяет использовать его для изготовления мощных и малогабаритных источников.

4. Перспективным для дальнейшего развития можно считать метод получения интерметаллидов, поскольку он обеспечивает изготовление невыщелачиваемого радиоактивного материала. Заслуживает внимания также метод термодеструкции

органических экстрактов, однако окончательный вывод можно сделать после их проверки в полупромышленных масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сытин В.П., Теплов Ф.П., Череватенко Г.А. Радиосактивные источники ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Карелин Е.А., Владимирова Н.А. Калифорниевые источники нейтронов. Методы изготовления и конструкция: Обзор, Димитровград, 1982.
3. Еербин Е.А. Мирные профессии нейтронов. М.: Знание, 1980.
4. Этерин Б.М., Иванов В.Н., Конопляников А.Г. и др. Эффекты нейтронного и гамма-излучений. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. XX лет производства и применения изотопов в СССР. - Изотопы в СССР. М.: Атомиздат, 1980, № 59, с.54.
6. Гума В.И., Демидов А.М., Иванов В.А. и др. Нейтронно-радиационный анализ. М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. ГОСТ 15484-81. Излучения ионизирующие и их измерения: Термины и определения.
8. ГОСТ 25504-82 (СТ СЭВ 3439-81). Источники ионизирующего излучения радионуклидные закрытые: Термины и определения.
9. Гордеев Я.Я., Зинковский В.И., Карасев В.И. и др. Изготовление нейтронных источников из калифорния-252: Препринт. НИИАР-10(418). Димитровград, 1980.
10. Сытин В.П., Теплов Ф.П., Меловатская А.И. Методы изготовления, конструкция и характеристики радиоактивных источников. М.: ВНИИМ, 1981.

11. Иониты в химической технологии/ Под ред. Б.П.Никольского. Л.: Химия, 1982.
12. Мясоедов Б.Ф., Нусева Л.И., Лебедев И.А. и др. Аналитическая химия трансплутониевых элементов. М.: Наука, 1972.
13. Калифорниевые источники: Руководство по изготовлению и обслуживанию. АИНФ-187. М.: ЦНИИАтоминформ, 1973.
14. Ионообменные материалы для процессов гидрометаллургии, очистки сточных вод и водоподготовки: Справочник/ Под ред. Б.Н.Ласкорина. М.: ВНИИХТ, 1983.
15. Беркутов В.Л., Бударрагин Л.В., Лебедев В.М., Карасев В.И. Условия получения и свойства тонкослойных покрытий на основе оксидов трансплутониевых элементов: Препринт. НИИАР-24(670). М.: ЦНИИАтоминформ, 1985.
16. ГОСТ 25926-83 (СТ СЭВ 3839-82). Источники ионизирующего излучения радионуклидные закрытые. Классы прочности и методы испытаний.
17. Berman P.H., Boylogne A.R., Mosley W.C., Walker V.W. Proposed for presentation at the International Symposium of Californium-252 Utilisation. Belgium; Brussel. DP-MS-76-30. 1976, p.1-7.
18. Беркутов В.Л., Владимирова Н.А., Давыдов Е.Ф. и др. Сравнительные исследования закрытых радионуклидных источников нейтронов типа ИНК-3 и CVN-5: Препринт. НИИАР-10(656). М.: ЦНИИАтоминформ, 1985.
19. Радченко В.М., Рябинин М.А., Судаков Л.В. и др. Синтез и изучение бинарных соединений актиноидов и лантаноидов.- Радиохимия, 1981, т.23, № 6, с.876-878.

Рукопись поступила в ОПИНТИ
 28.12.86, обработана 28.04.88.
 Окончательно подготовлена авторами 28.06.88.

Владимир Леонидович Беркутов
Нина Александровна Владимирова
Валентин Иванович Карасев
Евгений Александрович Карелин

КАЛИФОРНИЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ.
СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Редактор Ю.В.Волкова

Корректор С.Н.Бобкина

Подписано в печать 12.08.88. Т-17771. Формат 60x90 1/16.
Печать офсетная. Печ.л. 1,4. Уч.-изд.л.1,1. Тираж 180 экз.
Зак.тип.№ 2068. Цена 17 коп. Индекс 3622.

Отпечатано в Научно-исследовательском институте
атомных реакторов им. В.И.Ленина
433510, Дмитровград-10, НИИАР

МНОГОКРАТНОЕ ИЗДАНИЕ ИЗДАЕТСЯ самостоятельно, не всегда дублирующей в последствии в других изданиях ПУБЛИКАЦИЕЙ отдельных оригинальных научных трудов, на которую можно ссылаться в других публикациях, указывая при этом авторов, наименование, порядковый номер (НИИАР- ...), год и место издания.

ИЗДАЕТСЯ с целью более быстрой или более полной информации по сериям:

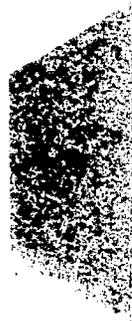
1. Ядерные реакторы
2. Методика и техника облучения
3. Радиационное материаловедение
4. Радиохимия
5. Ядерная физика
6. Вычислительная техника и электроника
7. Вычислительная математика и программирование
8. Информатика и управление

ПЕЧАТАЕТСЯ тиражом 180-200 экз.

РАССЫЛАЕТСЯ в научные организации, научно-технические библиотеки и отдельным лицам в соответствии с установленным порядком.

17 коп.

Индекс 3622



КАЛИФОРНИЕВЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ. СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
РАДИОАКТИВНОГО МАТЕРИАЛА

Препринт. НИИАР-30(761), 1988, 1-19