

# О ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСМУТАЦИИ ИЗОТОПА CO-60 В НЕЙТРОНОВОДЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КАНАЛА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ВВР-К



Ермаков Е.Л., Тиванова О.В., Шаймерденов А.А., Сайранбаев Д.С.

РГП на пхв «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

Широкое применение среди искусственных радиоактивных изотопов нашел Co-60 в виде ампульных источников излучения. Период полураспада Co-60 составляет 5,27 года, но в зависимости от изначальной активности переход в безопасное состояние может растянуться на 100 и более лет. Одним из способов снижения остаточной активности при обращении с РАО является метод ядерной трансмутации в короткоживущие или стабильные изотопы. Трансмутация изотопа Co-60 эффективно протекает при облучении тепловыми нейтронами и в результате ядерной реакции радиационного захвата образуется Co-61с с периодом полураспада 1,65 ч. В настоящее время такая реакторная обработка радиоактивных материалов с Co-60 в промышленных объемах считается нецелесообразной, ввиду влияния на энергетическое поле реактора и достаточно длительный цикл обработки. Тем не менее, вызывает интерес эффективность трансмутации небольших партий или единичных экземпляров источников Co-60 в процессе рутинной работы реактора ВВР-К.

В настоящей работе рассмотрена возможность реализации процесса трансмутации изотопа Co-60 в Co-61 на выходе из нейтронновода горизонтального экспериментального канала (ГЭК) реактора ВВР-К.

## Методика расчетно-экспериментальных исследований

Спектр нейтронов реактора ВВР-К характеризуется важной долей тепловых и эпитепловых нейтронов плотность потока которых составляет в центре активной зоны около  $2,0 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Горизонтальный экспериментальный канал сконструирован в виде трубы диаметром 100 мм и длиной 3330 мм и заполнен воздухом при атмосферном давлении, что сказывается на существенном снижении доли и плотности потока тепловых нейтронов на выходе из ГЭК. Одним из наиболее доступным с технологической точки зрения решением проблемы термализации нейтронов и уменьшения доли быстрых нейтронов может стать организация эффективного нейтронновода с наборов соответствующих фильтров на выходе из ГЭК.

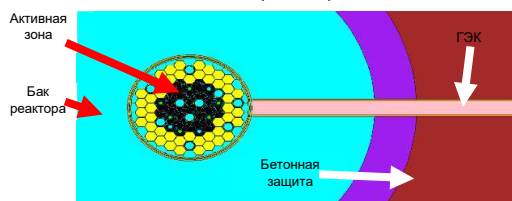
В качестве материалов фильтра рассмотрены сапфир, графит, бериллий, висмут, свинец, алюминий и вода или их комбинация (сэндвич-фильтр).

### Размеры моделируемых фильтров

Материал фильтра	Be	Графит	Al	Al-графит	Вода	Сапфир	Pb	Bi
Диаметр, мм	100	100	100	100-100	100	100	100	100
Толщина, мм	50	100	100	50-100	100	110	110	110

Исследование характеристик поля потока нейтронов на выходе из ГЭК осуществлялось расчетным и экспериментальным путем. Расчеты проводились на основе транспортного кода MCNP6 и библиотеки ядерных констант ENDF/B-VII.1 с применением верифицированной модели реактора ВВР-К, с учетом текущего состояния и конфигурации активной зоны. При расчетах учитывалось выгорание топлива в каждой ТВС и отравление бериллия в каждом блоке бокового отражателя.

### Расчетная модель реактора ВВР-К



Экспериментальные исследования заключались в измерении энергетического распределения плотности потока нейтронов и фотонов на выходе из ГЭК. В качестве экспериментального метода измерения плотности потока нейтронов разных энергий был выбран активационный метод измерения детекторами из Au-197 (с Cd экраном и без) и In-115 (с Cd экраном), который хорошо зарекомендовал себя в реакторных экспериментах. Активность детекторов определялась по фотопике: 411,8 кэВ для Au-197, 336,2 кэВ для In-115.

Плотность потока нейтронов ( $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) вычислялась по формуле:

$$\Phi = \frac{S}{\varepsilon \cdot \varphi} \cdot \frac{1}{t_{\text{изм}}} \cdot \frac{10^{24}}{\sigma} \cdot \frac{t_{\text{изм}} \cdot \lambda}{(1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{обл}}}) \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{\text{изм}}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_{\text{охл}}}} \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{P_{\text{обл}}}$$

где S - площадь пика,  $\varepsilon$  - эффективность регистрации,  $\varphi$  - квантовый выход,  $t_{\text{изм}}$  - время измерения (с),  $\eta$  - количество ядер на детектор,  $\sigma$  - эффективное сечение (барн),  $\lambda$  - постоянная распада ( $\text{с}^{-1}$ ),  $t_{\text{обл}}$  - время облучения (с),  $t_{\text{охл}}$  - время охлаждения (с),  $P_{\text{ном}}$  - мощность номинальная (%),  $P_{\text{обл}}$  - мощность облучения (%)

Данная работа профинансирована Министерством образования и науки Республики Казахстан (BR10965174).

## Результаты моделирования ГЭК с разными фильтрами

Реакторное излучение характеризуется не только мощным нейтронным излучением, но и фотонным, поэтому исследовано влияние фильтров из разных материалов на энергетическое распределение фотонов на выходе ГЭК.

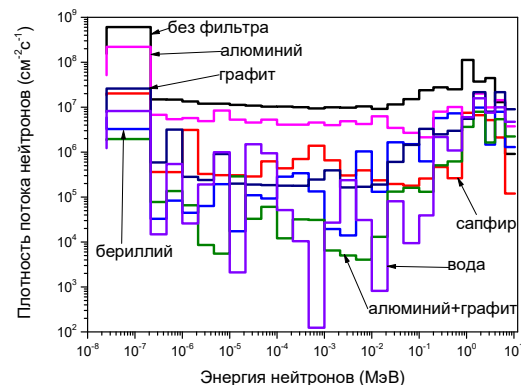
Установлено, подавление низкоэнергетичной фотонной составляющей реакторного излучения происходит при использовании фильтров из сапфира и свинца, а высокоэнергетичных фотонов при использовании фильтров из висмута и бериллия.

Доля тепловых нейтронов в интегральном потоке увеличивается только для варианта фильтра из алюминия с 63% до 65%. При использовании других фильтров происходит уменьшение доли тепловых нейтронов. В частности, при использовании сэндвич фильтра (алюминий+графит) доля тепловых нейтронов уменьшается до 14%, а для фильтра из графита - уменьшается до 29%. Таким образом, необходимо начинать термализовать нейтроны внутри ГЭК, так как увеличение толщины фильтра за защитной заслонкой приведет к потере интенсивности нейтронов.

### Энергетический спектр фотонов на выходе ГЭК

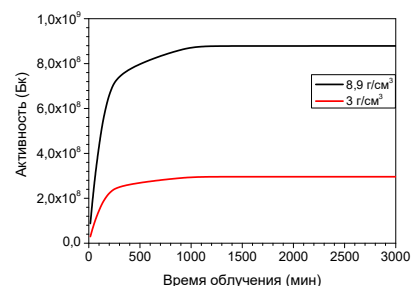
Энергия фотонов, МэВ	Плотность потока фотонов, $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$				
	Без фильтра	С фильтром			
		сапфир	свинец	висмут	бериллий
0 - 0,05	1,40E+08	4,79E+07	4,81E+07	1,36E+08	1,30E+08
0,05 - 0,1	7,00E+08	4,38E+08	4,48E+08	6,81E+08	6,69E+08
0,1 - 2	7,70E+09	7,18E+09	7,31E+09	6,32E+09	6,13E+09
2 - 3	2,80E+09	1,48E+09	1,62E+09	2,69E+09	2,08E+09
3 - 4	7,70E+08	5,16E+08	5,34E+08	7,54E+08	7,46E+08
4 - 5	5,60E+08	2,04E+08	2,28E+08	4,12E+08	3,99E+08
5 - 6	1,70E+08	1,06E+08	1,18E+08	1,67E+08	1,18E+08
6 - 7	5,70E+07	4,61E+07	4,81E+07	5,07E+07	5,16E+07
7 - 8	1,30E+08	5,83E+07	5,92E+07	1,09E+08	9,75E+07
8 - 9	3,00E+06	1,57E+06	1,77E+06	1,74E+06	2,81E+06
9 - 10	8,00E+05	6,80E+05	6,80E+05	6,30E+05	6,20E+05
10 - 20	9,00E+04	6,13E+04	6,41E+04	8,51E+04	8,15E+04

### Энергетический спектр нейтронов на выходе ГЭК с разными фильтрами



Проведена оценка нарабатываемой активности Co-61 при облучении потоком тепловых нейтронов  $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  для двух вариантов плотности исходной мишени ( $8,9 \text{ г/см}^3$  и  $3 \text{ г/см}^3$ ).

### Динамика изменения активности нарабатываемого Co-61



При облучении мишени Co-60 в течение 15 мин нарабатываемая активность Co-61 при плотности исходной мишени  $8,9 \text{ г/см}^3$  составит  $8,8 \cdot 10^7$  Бк, а при плотности  $3 \text{ г/см}^3$  -  $3 \cdot 10^7$  Бк.

Время достижения максимальной активности Co-61 составляет 960 мин, что показывает возможность переработки твердых радиоактивных отходов на реакторе ВВР-К при использовании соответствующей системы фильтра замедлитель/поглотитель.