

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАРАБОТКИ Co-60 И Lu-177g ОТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПЛОТНОСТИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА

Р.А. Шагинян, В.В. Коробейников, В.Ю. Стогов

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1



В настоящее время существующие подходы к наработке искусственных изотопов в большинстве случаев основываются на опыте разработок предыдущих лет. В данной работе ставится задача разработки алгоритма выбора наиболее эффективных режимов облучения мишенных материалов. Исследование основано на последовательном моделировании облучения мишенных изотопов нейтронами разных «однотиповых» потоков при одинаковой плотности нейтронного потока внутри каждой энергетической группы (БНАБ-93). Для каждой энергетической группы использовался поток с плотностью, равной $2 \cdot 10^{15}$ нейтрон/(см²·с). Такой подход поможет при «конструировании» и выборе реального спектра нейтронов, обладающего наибольшей эффективностью по сравнению с альтернативными.

Моделировалась наработка Co-60 и Lu-177g для каждой энергетической группы. В наиболее эффективных по удельной активности группах проведен анализ кинетики.

Максимальная удельная активность для Co-60 достигается в группе 17 и равна 1 кКи/г.

Для схемы наработки Lu-177g через Lu-176 максимальная удельная активность достигается в группе 26 и равна ~58,5 кКи/г.

Для схемы наработки Lu-177g через Yb-176 максимальная удельная активность достигается в группе 17 и равна 260 Ки/г.

Ключевые слова: наработка, изотопы, удельная активность, сечение, группа, Co-59, Co-60, Lu-177g, Lu-176, Yb-176.

Для цитирования: Шагинян Р.А., Коробейников В.В., Стогов В.Ю. Исследование зависимости эффективности наработки Co-60 и Lu-177g от энергетической структуры плотности нейтронного потока. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 127-138. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.11>

ВВЕДЕНИЕ

Радиоизотопы искусственного происхождения широко используются в медицине (диагностика и лечение), в промышленности (стерилизация, дефектоскопия, техно-

© Р.А. Шагинян, В.В. Коробейников, В.Ю. Стогов, 2023

логический контроль), в научных исследованиях и космических миссиях [1–7].

Основными направлениями применения медицинских изотопов являются диагностика и терапия.

Задача короткоживущих изотопов – облучить или локализовать очаги новообразований и исчезнуть. Кроме короткоживущих в медицинской терапевтической практике используется ряд среднеживущих изотопов (с периодом полураспада до полугода) и даже долгоживущие изотопы [4].

Один из методов лечения злокачественных новообразований – радионуклидная терапия. Метод предполагает введение в организм пациента терапевтических радиофармпрепаратов (РФП), которые избирательно накапливаются в патологических тканях. Для лечения используют РФП, образующие сильную связь с рецепторами опухоли или антигенами. Таким образом, препарат прицельно транспортируется к патологической ткани и уничтожает ее, не затрагивая при этом здоровую. Ионизирующее излучение, которое испускает радиоизотоп, убивает клетки, повреждая их ДНК. Относительно недавно стали появляться препараты на основе Lu-177g.

Применяют радионуклидную терапию не только для лечения рака, но и при других заболеваниях, например, при воспалении суставов [4].

Наработка медицинских изотопов в энергетических и промышленных реакторах затруднительна, поскольку длительность их активации не может превышать двух – трех периодов полураспада. В производстве медицинских изотопов реакторным методом в России задействованы НИФХИ им. Л.Я. Карпова, НИИАР, ИРМ, «Маяк» и «Росэнергоатом» [4].

Разнообразие изотопов технического назначения пока не так велико, как медицинских, но потребности в них велики и, соответственно, велики объемы их производства. Задачи этих изотопов – стерилизация, дефектоскопия, рентгенофлуоресцентный анализ состава веществ и т.д. Короткоживущие изотопы здесь не используются, обычно это изотопы с периодами полураспада в несколько лет [1, 3, 8]. Соответственно, нарабатывать их можно, например, в боковом экране реактора на быстрых нейтронах: в первом ряду (изотопы, которые нарабатываются в быстром спектре в реакциях (n, p) и (n, 2n)) и во втором ряду (в облучательных устройствах с замедлителем) [1–3, 5–7, 9–12].

Наиболее широко используемый технический изотоп Co-60 с жестким гамма-излучением, который, в основном, используется для стерилизации (продуктов в хранилищах, медицинского инструмента и т. д.), соответственно, и потребности в этом изотопе очень велики (десятки МКв в год) [8]. В основном, он нарабатывается в энергетических тепловых реакторах (CANDU, РБМК), но высокую активность (более 80–100 Ки/г) в этих реакторах обеспечить невозможно. Быстрый реактор позволяет нарабатывать кобальт высокой активности (более 300 Ки/г). В мире отмечается дефицит этого изотопа, и в дальнейшем он будет только нарастать.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Наработка того или иного изотопа неразрывно связана с сечениями мишенного и целевого материалов, с энергетической структурой и интенсивностью потока нейтронов, а также временами облучения и выдержки.

Для исследования эффективности наработки искусственных изотопов в зависимости от энергетической структуры спектра нейтронного потока одним из принципиальных моментов является задание самой энергетической структуры спектра нейтронного потока. В данной работе для исследований эффективности спектра источника нейтронов представлен в 28-групповом приближении (БНАБ-93 [13]). Расчеты проведены в программном комплексе для расчета радиационных характеристик топ-

лива и конструкционных материалов ISKRA (версия 1.0) [14]. Необходимо отметить, что расчеты проводились без учета эффекта блокировки сечений.

В рамках данных исследований моделировалось облучение мишенных изотопов нейтронами последовательно для каждой энергетической группы (т.е. все нейтроны испускались последовательно каждой из 28-ми энергетических групп) при одинаковой плотности нейтронного потока, равной $2 \cdot 10^{15}$ нейтрон/(см²·с) (аналогично максимальной интенсивности из работы [15]), в течение различных временных интервалов: для короткоживущих 2–12 дней под облучением и последующих 2,5 дня выдержки без облучения, для долгоживущих 0,5–2 лет под облучением и 30 дней выдержки без облучения. Аналогичный подход использовался в работе [16]. Время облучения подобрано следующим образом: для короткоживущих от 0,5 до двух периодов полураспада, для долгоживущих – исходя из топливной кампании (1 микрокампания = 0,5 года).

Приведенные в статье удельные активности характеризуются как удельные активности облученных мишенных материалов и приводятся в величине Ки/г_стартового_Металла.

Зависимости микроскопических сечений от энергии нейтронов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость микроскопических сечений от энергии нейтронов

Номер группы	$E_{\text{нижн.}}$, эВ	$E_{\text{верх.}}$, эВ	Сечение Co-59, барн	Сечение Co-60, барн	Сечение Lu-176, барн	Сечение Lu-177g, барн	Сечение Yb-176, барн
1	2	3	4	5	6	7	8
-1	1,40E+07	2,00E+07	6,37E-04	6,17E-04	3,31E-03	9,89E-04	9,85E-04
0	1,05E+07	1,40E+07	7,10E-04	7,25E-04	2,66E-03	1,34E-03	1,30E-03
1	6,50E+06	1,05E+07	8,43E-04	4,15E-04	2,57E-03	9,27E-04	7,43E-04
2	4,00E+06	6,50E+06	1,40E-03	2,73E-04	5,87E-03	1,57E-03	9,54E-04
3	2,50E+06	4,00E+06	2,48E-03	3,62E-04	2,27E-02	8,58E-03	4,89E-03
4	1,40E+06	2,50E+06	4,13E-03	5,65E-04	8,60E-02	3,75E-02	1,66E-02
5	8,00E+05	1,40E+06	7,60E-03	7,20E-04	2,28E-01	8,16E-02	1,90E-02
6	4,00E+05	8,00E+05	7,26E-03	1,08E-03	4,14E-01	1,01E-01	1,61E-02
7	2,00E+05	4,00E+05	9,95E-03	2,04E-03	6,36E-01	1,63E-01	1,89E-02
8	1,00E+05	2,00E+05	1,51E-02	3,29E-03	7,98E-01	3,19E-01	2,98E-02
9	4,64E+04	1,00E+05	2,15E-02	5,33E-03	1,02E+00	5,12E-01	7,17E-02
10	2,15E+04	4,64E+04	3,66E-02	9,13E-03	1,42E+00	7,74E-01	1,10E-01
11	1,00E+04	2,15E+04	5,99E-02	1,52E-02	2,19E+00	1,17E+00	1,68E-01
12	4,64E+03	1,00E+04	1,61E-01	1,27E-02	3,56E+00	1,83E+00	2,57E-01
13	2,15E+03	4,64E+03	1,89E-01	3,71E-03	5,87E+00	3,06E+00	3,94E-01
14	1000	2,15E+03	3,40E-02	3,01E+00	9,81E+00	5,44E+00	5,37E-01

Таблица 1(продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
15	464,16	1000	4,83E-02	7,96E-02	1,63E+01	9,88E+00	1,93E+00
16	215,44	464,16	2,70E-01	3,29E-02	2,66E+01	1,79E+01	1,61E+00
17	100	215,44	7,38E+01	3,42E-02	4,12E+01	3,19E+01	2,04E+00
18	46,42	100	3,17E+00	4,37E-02	1,06E+02	2,58E+01	3,34E-01
19	21,54	46,42	1,68E+00	6,01E-02	1,17E+02	3,86E-01	5,97E-02
20	10	21,54	1,88E+00	8,59E-02	7,25E+01	3,66E+00	1,02E-01
21	4,64	10	2,48E+00	1,24E-01	1,42E+02	6,30E+01	1,63E-01
22	2,15	4,64	3,48E+00	1,81E-01	6,39E+01	1,11E+04	2,48E-01
23	1	2,15	5,00E+00	2,65E-01	5,54E+02	6,01E+02	3,72E-01
24	0,46	1	7,27E+00	3,88E-01	4,06E+01	3,30E+02	5,50E-01
25	0,22	0,46	1,06E+01	5,70E-01	4,38E+02	3,58E+02	8,11E-01
26	0,0253	0,0253	3,08E+01	1,66E+00	3,65E+03	8,56E+02	2,37E+00

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО НАРАБОТКЕ Co-60

Среди всех искусственных радиоактивных изотопов наиболее широкое применение нашёл Co-60. Источники гамма-излучения, использующие Co-60, являются неким стандартным вариантом везде, где необходимы фотоны с энергией более 1 МэВ.

Co-60 применяется в различных областях.

1. Стерилизация медицинских изделий и разнообразных продуктов питания.
2. Промышленные направления использования источников с Co-60:
 - толщиномеры и плотномеры;
 - гамма-дефектоскопия (в основном, толстых сварных швов);
 - высотомеры (в редких случаях);
 - облучение пластиковых полимеров.
3. Медицина (гамма-нож и брахитерапия).
4. Наука.

В среднем ежегодное потребление Co-60 в медицине оценивается примерно в 2,25 МКи, для промышленности – 55 МКи [8].

Наработка Co-60 обеспечивается облучением мишени, состоящей из природного Co-59. Зависимость микроскопических сечений (в логарифмической шкале) Co-59 и Co-60 от энергии нейтронов представлена на рис. 1.

Из рисунка видно, что сечение мишенного изотопа имеет значительный рост в группах 17–26. Отмечаются не только высокие сечения мишенного изотопа, но и довольно низкие сечения целевого изотопа, отличающиеся на порядок и более.

В расчетах приняты следующие периоды облучения для наработки Co⁶⁰ с учетом его $T_{1/2} = 5,27$ года: четыре шага по полгода и 30 дней выдержки (после двух лет облучения) являются достаточными для понимания общей картины эффективности наработки.

Плотность мишенного материала Co-59 равна 8,9 г/см³.

На рисунке 2 приведены результаты расчета удельной активности Co-60 в зависимости от энергетической структуры спектра и времени.

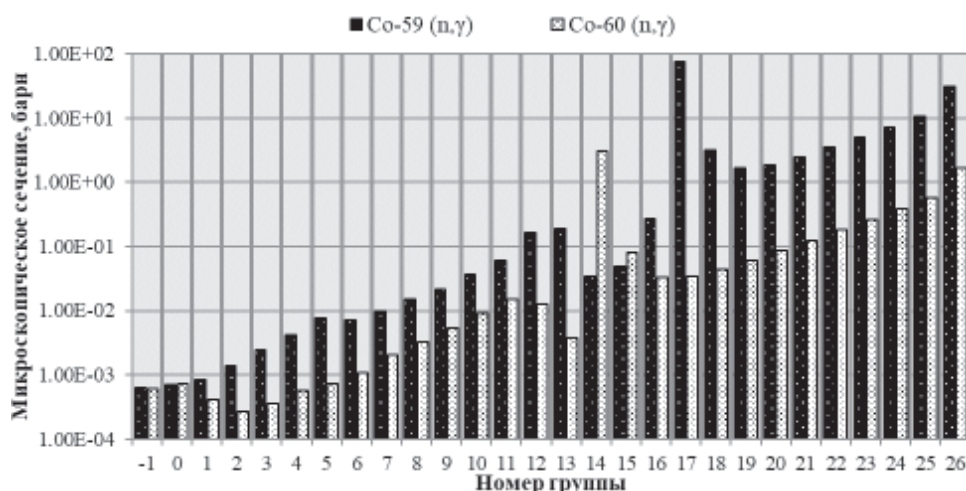


Рис. 1. Зависимость микроскопических сечений Co-59 и Co-60 от энергии нейтронов [13]

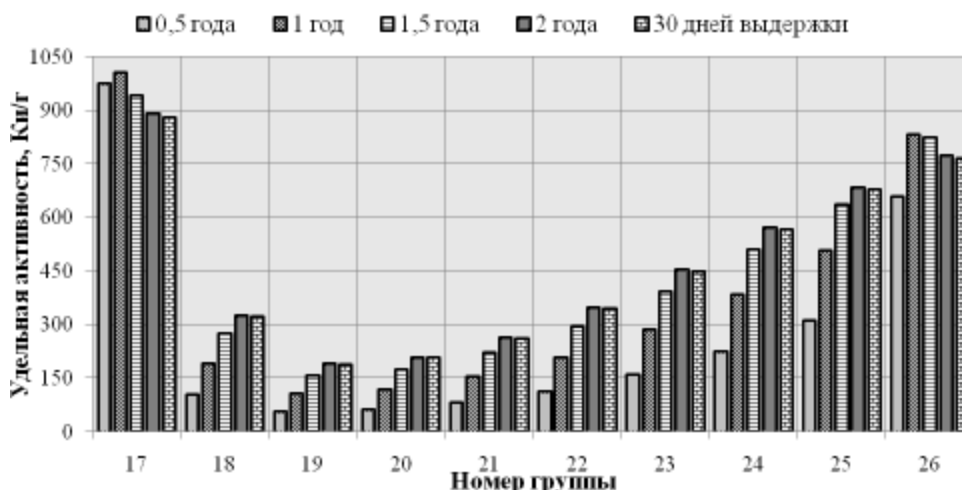


Рис.2. Зависимость наработки Co-60 от энергетической структуры спектра нейтронного потока и времени облучения

Из результатов следует, что группа 17 является самой эффективной – в пике активность более 1 кКи/г. Это вполне очевидный результат: из рис. 1 видно, что Co⁵⁹ имеет один довольно широкий резонанс, и именно эта группа попадает под него, что характеризуется высокими сечениями взаимодействия и, следовательно, высокими скоростями реакций и наработки.

В группах 17 и 26 видно отличное от других групп нарастание удельной активности. Судя по графику, можно отметить, что после 30-ти дней выдержки наблюдается небольшой спад удельной активности, поэтому делается вывод, что в группах 17 и 26 наблюдается максимальная удельная активность (концентрация Co-60 становится столь большой, что даже превосходящие сечения взаимодействия Co-59 над Co-60 не могут поддерживать такой уровень удельной активности), которая достигается в этих группах за один год облучения и составляет величину 1 кКи/г и ~ 800 Ки/г соответственно.

Если рассматривать целевым продуктом кобальт средней удельной активности ~ 100 Ки/г, то область эффективной наработки можно назвать группы с 17 по 26, так как в них реализуются требуемые величины за период от полугода (17, 22–26 груп-

пы) до года (19–21 группы). Если же рассматривать кобальт высокой удельной активности, то показатели в ~ 200 Ки/г достигаются от полугода (17,24–26 группы) до двух лет (19–20 группы).

В то же время максимумы по некоторым группам не достигнуты за два года вследствие либо низкого соотношения сечений мишенного и целевого изотопов, либо недостаточного времени облучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО НАРАБОТКЕ Lu-177g

Lu-177g является одним из наиболее перспективных радионуклидов, служащих основой для производства современных радиофармацевтических препаратов. Он демонстрирует высокую эффективность в таргетной терапии ряда онкологических заболеваний: метастатических форм кастрационно-резистентного рака предстательной железы, нейроэндокринных опухолей и др. Параллельно с противораковыми свойствами исследуется его применимость в неонкологических заболеваниях, например, в локальной терапии Lu-177g при воспалительных заболеваниях суставов.

В данной работе рассматриваются две схемы наработки целевого изотопа [15]:

- реакция Lu-176 (n,γ) Lu-177g;
- реакция Yb-176 (n,γ) Yb-177g \rightarrow Lu-177g.

Зависимости микроскопических сечений (в логарифмической шкале) Lu-176 (Yb-176) и Lu-177g от энергии нейтронов представлены на рис. 3, 4.

Как видно из этих рисунков, сечения захвата нейтронов на мишенном изотопе Lu-176 имеют высокие значения, как и сечения на целевом изотопе Lu-177g, что говорит о скорейшем наступлении установившегося равновесного состояния.

Иная ситуация наблюдается с мишенным материалом Yb-176. Его сечения на порядок и более ниже, чем у целевого изотопа. Это сильно ограничивает максимально возможную наработку из-за выгорания целевого изотопа.

Еще одним фактором, который необходимо учитывать, является небольшой период полураспада, равный 6,6 суток. В связи с этим периоды облучения, по сравнению с предыдущим случаем, скорректированы на 2–12 дней облучения и 2,5 дня выдержки после облучения.

Представлены зависимости наработки Lu-177g из Lu-176 (рис. 5) и из Yb-176 (рис. 6) от энергетической структуры спектра нейтронного потока и времени облучения.

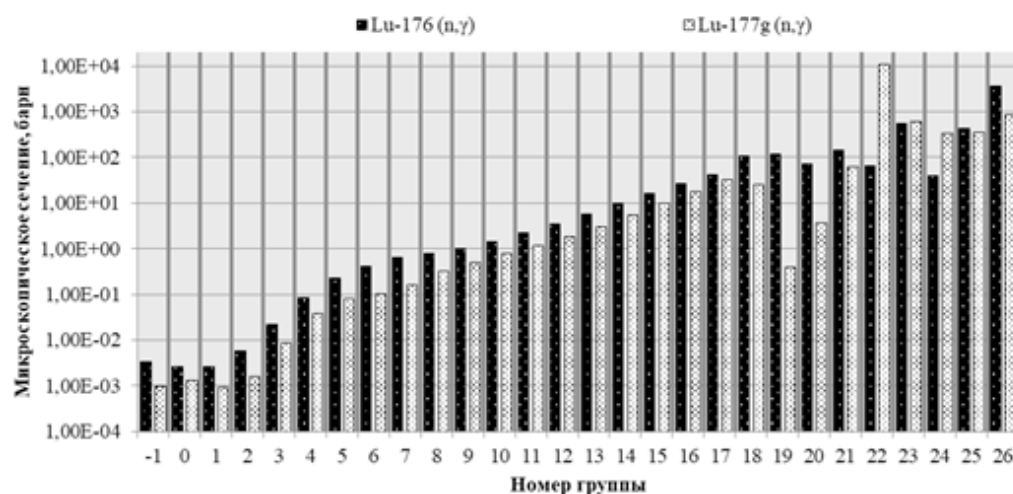


Рис. 3. Зависимость микроскопических сечений Lu-176, Lu-177g от энергии нейтронов [13]

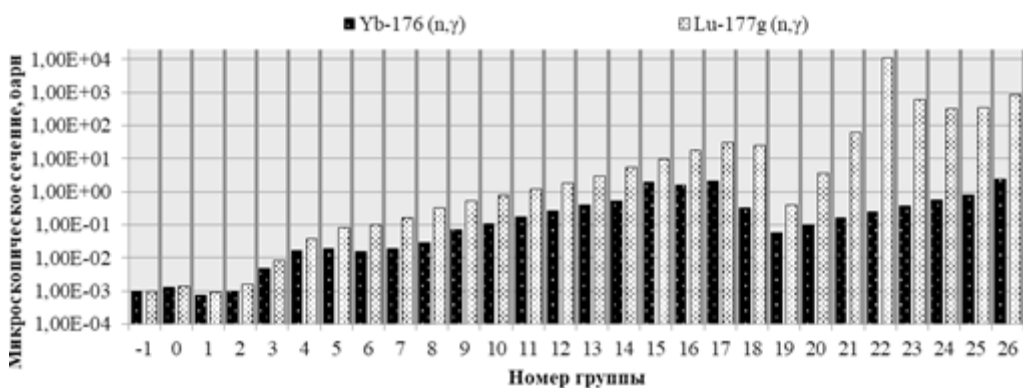


Рис. 4. Зависимость микроскопических сечений Yb-176, Lu-177g от энергии нейтронов [13]

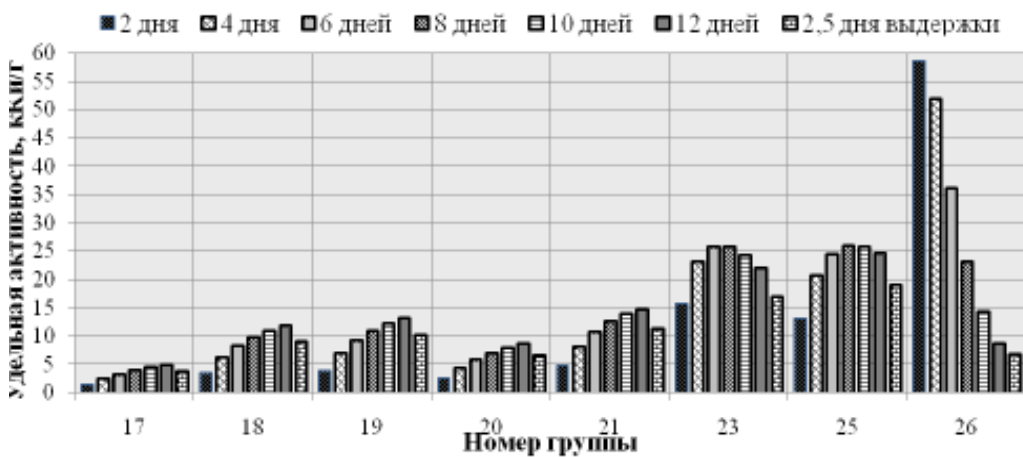


Рис. 5. Зависимость наработки Lu-177g из Lu-176 от энергетической структуры спектра нейтронного потока и времени облучения

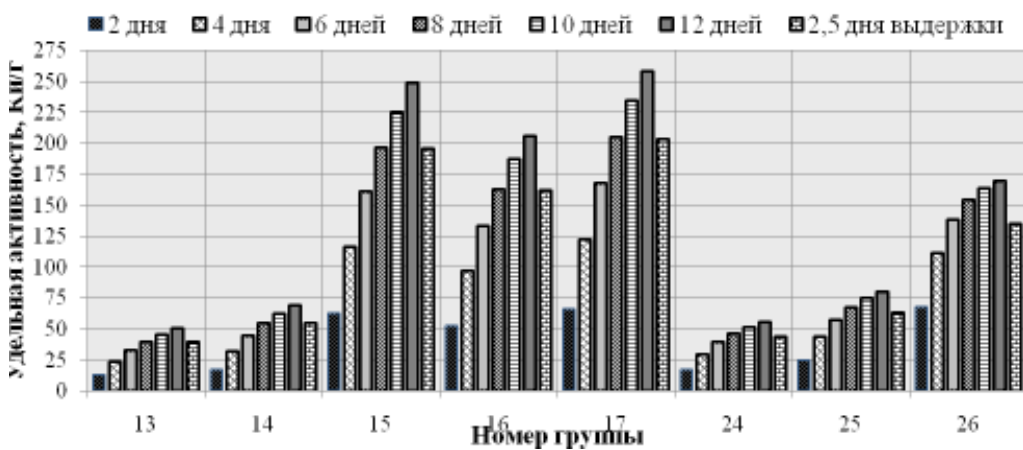


Рис. 6. Зависимость наработки Lu-177g из Yb-176 от энергетической структуры спектра нейтронного потока и времени облучения

Рисунок 5 показывает, что в группе 26 отмечается поведение, схожее с наработкой Co-60 (см. рис. 2), наступление максимальной удельной активности с последующим выгоранием целевого изотопа. Максимум среди всех групп наблюдается именно в этой группе, находится на уровне около 58,5 кКи/г и нарабатывается в течение двух дней облучения.

В группах 23 и 25 наблюдается схожесть в наработке. Равновесный режим устанавливается на шестой – восьмой день облучения, равный периоду полураспада целевого изотопа, что закономерно приводит к уменьшению удельной активности в последующих циклах облучения. Максимум удельной активности в этих случаях находится на уровне ~ 25,5 кКи/г.

Иной результат наблюдается в группах 17–21. В этих случаях равновесная концентрация не достигается и накопление происходит на всех циклах облучения.

Нельзя оставлять без внимания влияние выдержки в течение 2,5 дней. Расчеты показывают, что падение удельной активности составляет ~ 22%.

На рисунке 6 приведен результат наработки лютеция из иттербия. При облучении в каждой группе не были достигнуты ни максимальная удельная активность (с последующим выгоранием), ни равновесное состояние. В связи с этим наработка лютеция практически в каждой группе происходит по одному сценарию – рост удельной активности на протяжении всего цикла облучения.

В группе 17 наблюдается максимальная удельная активность и составляет ~260 Ки/г. Также группа 15 близка к этим показателям с удельной активностью, равной 250 Ки/г. Группа 16 близка по сценарию и темпам наработки к группам 15 и 17 и несколько отстает по величине максимальной удельной активности, но достижение максимума приходится на тот же период, что и в упомянутых группах.

Целевые показатели в 26-й группе достигаются за весь период облучения (12 дней). Однако после шести дней облучения отмечается заметный спад темпов роста удельной активности. Максимальные показатели удельной активности для этой группы находятся на уровне 170 Ки/г.

Как и в случае с наработкой на Lu-176, необходимо обратить внимание на потерю удельной активности при выдержке в 2,5 дня – средняя потеря по всем группам составляет около 20%.

На основании расчетов и анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы. Для наработки Lu-177g через Lu-176 с учетом специфики применения и его периода полураспада выгодными для наработки являются группы 18–21, 23, 25 (шесть дней облучения) и 26-я группа (два дня облучения).

Для другой схемы наработки Lu-177g через Yb-176 наиболее высокая наработка в группах 15–17 и 26.

Результаты проведенных исследований помогут при конструировании облучательного устройства с наиболее эффективной наработкой рассматриваемых в работе изотопов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены результаты распределений зависимостей наработки 60-Co и Lu-177g от энергетической структуры спектра нейтронного потока и времени облучения. Приведенные в результатах группы соответствуют групповому представлению БНАБ-93 [13].

По результатам расчетов по наработке Co-60 отмечены две группы с максимальной удельной активностью (группы 17 и 26), которая достигается за один год облучения, удельная активность в этих группах составляет 1 кКи/г и ~ 800 Ки/г соответственно. В приближенной к практическому применению удельной активности избраны

предпочтительные группы. Если рассматривать целевым продуктом кобальт средней удельной активности ~ 100 Ки/г, то областью эффективной наработки можно назвать группы с 17-й по 26-ю, так как в них реализуются требуемые величины за период от полугода (17, 22–26 группы) до года (19–21 группы). Если же рассматривать кобальт высокой удельной активности, то показатели в ~ 200 Ки/г достигаются от полугода (17, 24–26 группы) до двух лет (19–20 группы).

По результатам расчетов по наработке Lu-177g из Lu-176 отмечается достижение максимальной за два дня облучения удельной активности в группе 26 величиной ~58,5 кКи/г. Наступление равновесного режима наблюдается в шестой – восьмой день облучения в группах 23 и 25 с удельной активностью ~25,5 кКи/г.

По результатам расчетов по наработке Lu-177g из Yb-176 максимальная удельная активность достигается в группах 15 и 17 и составляет 250 и ~ 260 Ки/г соответственно. Также нельзя упускать из внимания группы 16 и 26 с удельной активностью 207 и 170 Ки/г соответственно, которая достигается за весь период облучения (12 дней).

Полученные распределения наработки по группам с учетом времени дают явное представление об эффективности накопления на всем энергетическом интервале, что дает возможность сделать вывод о предпочтительных спектральных характеристиках конкретных нуклидов и помочь в формировании наиболее эффективного спектра нейтронов.

В результатах имеются случаи достижения как равновесного состояния, максимального с последующим выгоранием, так и недооблученного.

Литература

1. *Рисованый В.Д.* Нарботка радиоизотопов в ядерных реакторах на быстрых нейтронах / Сб. докл. конференции «Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах». Томск, 11–12 октября 2018 г. – М.: Издательство АО «НИКИЭТ», 2020. – С. 179-189.
2. *Камович М.С., Стогов В.Ю., Гурская О.С.* Облучательное устройство для быстрого реактора большой мощности // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – № 2. – С. 228-233. Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2019/2-22.pdf> (дата доступа 10.11.2022)
3. *Дзугоева Э.М., Евдокимов В.П., Стогов В.Ю., Шагинян Р.А.* Исследование возможности наработки кобальта-60 заданной удельной активности в реакторе типа БН-800 / Сборник материалов научно-практической конференции «Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2021». Нижний Новгород, 16 апреля 2021 года. – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 38-40.
4. Атом для здоровья / Вестник атомпрома. – 2022. – Вып. 3. – С. 59. Электронный ресурс: https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2022/07/VA3_spreads.pdf (дата доступа 10.11.2022).
5. Isotope Production at the Hanford Site in Richland, Washington, report, June 1, 1999; Richland, Washington. (<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc877112/> accessed November 10, 2022), University of North Texas Libraries, UNT Digital Library, <https://digital.library.unt.edu/crediting> UNT Libraries Government Documents Department.
6. *Шагинян Р.А., Коробейников В.В., Стогов В.Ю.* Исследование зависимости эффективности наработки различных изотопов от энергетической структуры плотности нейтронного потока. Препринт-3302 ГНЦ РФ-ФЭИ. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2022. – 44 с.
7. *Evdokimov V.P., Poplavsky V.M., Saraeva T.O., Khomyakov Yu.S., Tsibulya A.M., Abdurashitov D.N., Gavrin V.N.* The possibilities of fast power reactors to create high intensity radioactive sources / Proceedings of the PHYSOR 2002 – International Conference on the New Frontiers of Nuclear Technology: Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing – The ANS 2002 RPD Topical Meeting, Seoul, 07–10 October 2002. – Seoul, 2002.
8. СТРАНА РОСАТОМ. Кобальт-60: точки роста. Электронный ресурс: <https://strana-rosatom.ru/2017/11/30/kobalt-60-tochki-rosta/> (дата доступа 10.11.2022).
9. *Мальцев В.В., Карпенко А.И., Чернов И.А., Головин В.В.* Опыт наработки ⁶⁰Со в БН-600 // Атомная энергия. – 1999. – Т. 86. – Вып. 3. – С. 216–219.

Электронный ресурс: <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4043/3906> (дата доступа 10.11.2022).

10. Голубев В.И., Долгов Е.В., Ефремов А.И., Звонарев А.В., Коробейников В.В. и др. Расчетно-экспериментальные исследования в обоснование облучательных устройств для наработки кобальта-60 // ВАНТ. Серия: Ядерные константы. – 1991. – № 4. – С. 56–70.

11. Звонарев А.В., Коробейников В.В. и др. Получение ⁶⁰Со в БН-350 // Атомная энергия. – 1994. – Т. 77. – Вып. 6. – С. 454–457.

Электронный ресурс <http://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5010/4885> (дата доступа 10.11.2022).

12. Варивцев А. В., Жемков И. Ю., Романов Е. Г. и др. Физическая оптимизация облучательного устройства для накопления кобальта-60 высокой удельной активности в реакторе БН-600 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 6. – С. 112–118.

Электронный ресурс: http://www.ssc.smr.ru/izv_2014_6.html (дата доступа 10.11.2022).

13. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93. Часть 1. Ядерные константы для расчета нейтронных и фотонных полей излучений // ВАНТ. Серия: Ядерные константы. – 1996. – № 1. – С. 59–98.

14. Тормышев И.В. Программный комплекс для расчета радиационных характеристик топлива и конструкционных материалов. ISKRA, версия 1.0 – Свидетельство о гос. регистрации № 2020660280. – 2020.

15. Тарасов В. А., Романов Е. Г., Кузнецов Р. А. Сравнительный анализ схем реакторной наработки лютеция-177 // Известия Самарского научного центра Российской Академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 4–5. – С. 1084–1090.

Электронный ресурс: http://www.ssc.smr.ru/izv_2013_4.html#part5 (дата доступа 07.11.2022).

16. Косякин Д.А., Коробейников В.В., Стогов В.Ю. Исследование зависимости эффективности трансмутации Am-241 от энергетической структуры плотности нейтронного потока // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 1. – С. 5–15.

Электронный ресурс: <https://vant.ippe.ru/year2022/1/nuclear-structure/2111-1.html> (дата доступа 08.11.2022).

Поступила в редакцию 04.02.2023 г.

Авторы

Шагинян Рубен Арменович, инженер-исследователь

E-mail: ShaginyanRA@yandex.ru

Коробейников Валерий Васильевич, главный научный сотрудник, профессор,

д. ф.-м. н.

E-mail: korob@ippe.ru

Стогов Виктор Юрьевич, старший научный сотрудник

E-mail: stogov@ippe.ru

UDC 621.039.8.002

Study into the Dependence of the Co-60 and Lu-177g Efficiency Production on the Energy Structure of Neutron Flux Density

Shaginyan R.A., Korobeinikov V.V., Stogov V.Yu.

IPPE JSC

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russian Federation

ABSTRACT

At present, the existing approaches to production of artificial isotopes are mostly based on the development experience from previous years. This work aims to develop an

algorithm for selecting the most effective irradiation modes for target materials. The study is based on sequential modeling of irradiation of target isotopes by neutrons of different 'single-group' fluxes at the same neutron flux density within each energy group (ABBN-93). In this study, a flux density equal to $2.4 \cdot 10^{15}$ n/(cm²·s) was used for each energy group. This approach will help 'designing' and selecting the actual neutron spectrum that has the highest efficiency compared to alternatives.

The study modelled Co-60 and Lu-177g production for each energy group. The kinetics was analyzed in the most efficient groups in terms of specific activity.

The maximum specific activity for Co-60 is reached in group 17 and is equal to 1 kCi/g.

For the scheme of Lu-177g production through Lu-176, the maximum specific activity is reached in group 26 and is equal to 58.5 kCi/g.

For the scheme of Lu-177g production through Yb-176, the maximum specific activity is reached in group 17 and is equal to 260 Ci/g, the groups advantageous for production are 15–17 and 26.

Key words: production, isotopes, specific activity, cross section, group, Co-59, Co-60, Lu-177g, Lu-176, Yb-176.

For citation: Shaginyan R.A., Korobeinikov V.V., Stogov V.Yu. Study into the Dependence of Co-60 and Lu-177g Efficiency Production on the Energy Structure of Neutron Flux Density. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 127-138; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.11> (in Russian).

REFERENCES

1. *Risovanyy V.D.* Radioisotope production in fast-neutron nuclear reactors. Proc. Conf. «Closing the Nuclear Power Fuel Cycle Based on Fast Neutron Reactors» Tomsk, Oct. 11-12, 2018. Moscow. Publ. NIKIET JSC, 2020. pp. 179–189 (in Russian).
2. *Kamovich M.S., Stogov V.Yu., Gurskaya O.S.* The irradiating device for the fast reactor of big power // *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Seriya: Yadernye konstanty*. 2019, no. 2, pp. 228–233 Available at: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2019/2-22.pdf> (accessed Nov. 11, 2022) (in Russian).
3. *Dzugkoeva E. M., Evdokimov V. P., Stogov V. Yu., Shaginyan R. A.* Study of the possibility of production of cobalt-60 of a given specific activity in a reactor of BN-800 type. Proc. of the scientific and practical Conf. «Nuclear technologies: from research to implementation – 2021». Nizhny Novgorod – Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 2021. – pp. 38–40 (in Russian).
4. Atom for health // *Vestnik atomproma*, No. 3, april 2022, p. 59. Available at: https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2022/07/VA3_spreads.pdf (accessed Nov. 11, 2022) (in Russian).
5. Isotope Production at the Hanford Site in Richland, Washington, report, June 1, 1999; Richland, Washington. (<https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc877112/>; accessed November 10, 2022), University of North Texas Libraries, UNT Digital Library, <https://digital.library.unt.edu/>; crediting UNT Libraries Government Documents Department.
6. *Shaginyan R.A., Korobeinikov V.V., Stogov V.Yu.* Study of the dependence of the efficiency of various isotopes on the energy structure of the neutron flux density: IPPE Preprint 3302. Obninsk, IPPE JSC Publ., 2022. 44 p. (in Russian).
7. *Evdokimov V.P., Poplavsky V.M., Saraeva T.O., Khomyakov Yu.S., Tsibulya A.M., Abdurashitov D.N., Gavrin V.N.* The possibilities of fast power reactors to create high intensity radioactive sources. Proceedings of the PHYSOR 2002 – International Conference on the New Frontiers of Nuclear Technology: Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing – The ANS 2002 RPD Topical Meeting, Seoul, 07–10 October 2002. Seoul, 2002.

8. STRANA ROSATOM. Cobalt-60: points of growth. Available at: <https://strana-rosatom.ru/2017/11/30/kobalt-60-tochki-rosta/> (accessed Nov. 10, 2022) (in Russian).
9. Mal'tsev V.V., Karpenko A.I., Chernov I.A., Golovin V.V. Experience with ^{60}Co production in BN-600. Atomic Energy. 1999, vol. 86, no. 3, pp. 219–221; DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02672950>.
10. Golubev V.I., Dolgov E.V., Efremov A.I., Zvonarev A.V., Korobeinikov V.V., Kolyjenkov V.A., Koloskov B.V., Liforov V.G., Matveev V.I., Matveenko I.P., Suslov I.R., Khomyakov Yu.S., Chernyi V.A. Calculated pilot studies in justification of irradiating devices for a cobalt-60 operating time. Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Seriya: Yadernye konstanty. 1991, no. 4, pp. 56–70 (in Russian).
11. Zvonarev A.V., Korobeinikov V.V., Matveenko I.P., Suslov I.R., Khomyakov Yu.S., Tsibulya A.M., Chernui V.I., Shkol'nik V.S., Netsvet V.P., Skorikov N.V., Zinov'ev A.I., Rodionov N.G. ^{60}Co production in BN-350 // Atomic Energy, 1994, vol. 77, no. 6., pp. 940–943. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02415548>.
12. Varivtsev A.V., Zhemkov I.Yu., Romanov E.G., Tikhonchev M.Yu., Toporov Yu.G. Physical optimization of the irradiating device for accumulation of a cobalt-60 of a high specific activity in the BN-600 reactor. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoj akademii nauk. 2014, vol. 16, no. 6, pp. 112–118. Available at: http://www.ssc.smr.ru/izv_2014_6.html (accessed Nov. 7, 2022) (in Russian).
13. Manturov G.N., Nikolaev M.N., Tsybulya A.M. The system of group constants BNAB-93. Part 1. Nuclear constants for calculating neutron and photon radiation fields. Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Seriya: Yadernye konstanty. 1996, no. 1, pp. 59–98 (in Russian).
14. Tormyshev I.V. Software package for calculating the radiation characteristics of fuel and structural materials. ISKRA, version 1.0. Certificate of State Registration, No. 2020660280, 2022 (in Russian).
15. Tarasov V.A., Romanov E.G., Kuznetsov R.A. Comparative analysis of flowsheets for lutetium-177 reactor production. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoj akademii nauk. 2013, vol. 15, no. 5, pp. 1084–1090. Available at: http://www.ssc.smr.ru/izv_2013_4.html#part5 (accessed Nov. 7, 2022) (in Russian).
16. Kosyakin D.A., Korobeinikov V.V., Stogov V.Yu. Evaluation of the relationship of the Am-241 transmutation efficiency with the energy structure of the neutron flux density. Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Seriya: Yadernye konstanty. 2022, no. 1, pp. 5–15. Available at: <https://vant.ippe.ru/year2022/1/nuclear-structure/2111-1.html> (accessed Nov. 8, 2022) (in Russian).

Authors

Ruben A. Shaginyan, Research Engineer

E-mail: ShaginyanRA@yandex.ru

Valery V. Korobeinikov, Principal Scientist, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: korob@ippe.ru

Viktor Yu. Stogov, Senior Researcher

E-mail: stogov@ippe.ru