

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
А К Ц И О Н Е Р Н О Е О Б Щ Е С Т В О
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского

ФЭИ-3312

В. В. Колесов, В. В. Коробейников, Р. А. Шагинян

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО НАРАБОТКЕ СО-60
В РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ В КАЧЕСТВЕ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ
ГРАФИТА И ГИДРИДА ЦИРКОНИЯ**

Обнинск – 2025

В. В. Колесов², В. В. Коробейников¹, Р. А. Шагинян¹

¹ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск

² Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Сравнительные исследования по наработке Co-60 в реакторах на быстрых нейтронах с использованием в качестве замедлителя графита и гидрида циркония : Препринт ФЭИ-3312. — Обнинск, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», 2025. — 20 с.

Ключевые слова: наработка Co-60 в ядерных реакторах, реакторы на быстрых нейтронах, замедлители нейтронов, графит, гидрид циркония, облучательные устройства.

Проведены сравнительные расчетные исследования по наработке Co-60 в ядерном реакторе на быстрых нейтронах. Для наработки Co-60 использовались специальные облучательные устройства, содержащие Co-59, окруженный замедлителем. Облучательные устройства помещались в различные зоны ядерного реактора на быстрых нейтронах типа БН-800. В качестве замедлителя нейтронов использовались графит и гидрид циркония. Проведённые сравнительные исследования показали высокую скорость наработки Co-60 при использовании в качестве замедлителя графит.

Comparative calculation studies were conducted on the production of Co-60 in a fast neutron nuclear reactor. Special irradiation devices containing Co-59 surrounded by a moderator were used to produce Co-60. The irradiation devices were placed in different zones of a BN-800 type fast neutron nuclear reactor. Graphite and zirconium hydride were used as neutron moderators. The studies showed a higher rate of Co-60 production when graphite was used as a moderator.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Используемые модели реактора и программное обеспечение.....	5
2 Варианты размещения облучательных устройств для наработки Co-60 в реакторе типа БН800.....	5
3 Результаты расчётных исследований.....	7
4 Анализ зависимости наработки Co-60 от спектра и плотности потока	14
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	19

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭ (ЯЭ)	— атомная (ядерная) энергетика
АЭС	— атомная электростанция
БН	— реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
ВВЭР	— водо-водяной энергетический реактор
ЗБО	— зона большого обогащения
ЗМО	— зона малого обогащения
ЗСО	— зона среднего обогащения
МА	— минорные актиниды
МОКС-топливо	— ядерное топливо из смеси оксидов плутония и обедненного урана
УОКС-топливо	— оксидное топливо на основе обогащенного урана
ОЯТ	— отработавшее (облученное) ядерное топливо
РБН	— реакторы на быстрых нейтронах
ТВС	— тепловыделяющая сборка
ЯЭ	— ядерная энергетика
ЯЭС	— ядерная энергетическая система

ВВЕДЕНИЕ

Среди всех искусственных радиоактивных изотопов, используемых человечеством, наиболее широкое применение нашел Co-60 [1]—[16]. Этот изотоп имеет сочетание высокой удельной активности, высокой энергии гамма-излучения, удобного периода полураспада и наличия всего одного природного стабильного изотопа (что упрощает трансмутацию). Фактически источники гамма-излучения на базе Co-60 являются неким стандартным вариантом везде, где нужны фотоны с энергией больше 1 МэВ. Co-60 является активационным изотопом, т. е. его получают в результате поглощения нейтронов природным Co-59 [8].

Общее производство Co-60 в мире на сегодня порядка 75 миллиона кюри в год, которое делится на два типа: кобальт с низкой и средней активностью (до 100 кюри на грамм) и высокоактивный кобальт (250+ кюри на грамм) [5]. Последний считается высокотехнологичным продуктом.

Co-60 распадается в Ni-60, излучая гамма-кванты с энергией $\sim 1,3$ МэВ, которые глубоко проникают практически в любые материалы и при этом обладают высокой ионизирующей способностью.

Росэнергоатом свыше 20 лет занимается промышленной наработкой Co-60 в облучающих устройствах канальных реакторов на тепловых нейтронах РБМК-1000 на Ленинградской АЭС. А с 2017 года проект масштабирован на Курскую и Смоленскую атомные станции. В последнее время растёт интерес к наработке Co-60 в реакторах на быстрых нейтронах. Для повышения эффективности наработки используются замедлители нейтронов. Наиболее широко применяется ZrH_2 . В данной работе проведены исследования по применению для этой цели графита.

1 Используемые модели реактора и программное обеспечение

Для расчётных исследований эффективности наработки Co-60 использовались различные модели ядерного реактора на быстрых нейтронах, разработанные авторами на основе реактора типа БН-800 [7]. В качестве программного обеспечения использовался программный код SERPENT, реализующий метод Монте-Карло с детальным описанием геометрической структуры и сечений взаимодействия нейтронов с веществом [17].

2 Варианты размещения облучательных устройств для наработки Co-60 в реакторе типа БН-800

Модельные облучательные устройства для наработки Co-60 состояли из двух типов зон. В центре устройства находилась зона, которая полностью заполнена элементами с Co-59 вместо делящегося материала. ТВС с Co-59

оказалась двумя слоями ТВС, содержащими замедлитель вместо делящегося материала. В качестве замедлителя нейтронов использовался графит либо гидрид циркония. Всего рассматривалось 6 вариантов размещения устройств для наработки Со-60 в разных зонах ядерного реактора типа БН-800 (рис. 1—3). Длительность облучения при всех вариантах размещения устройств для наработки Со-60 — 1 год.

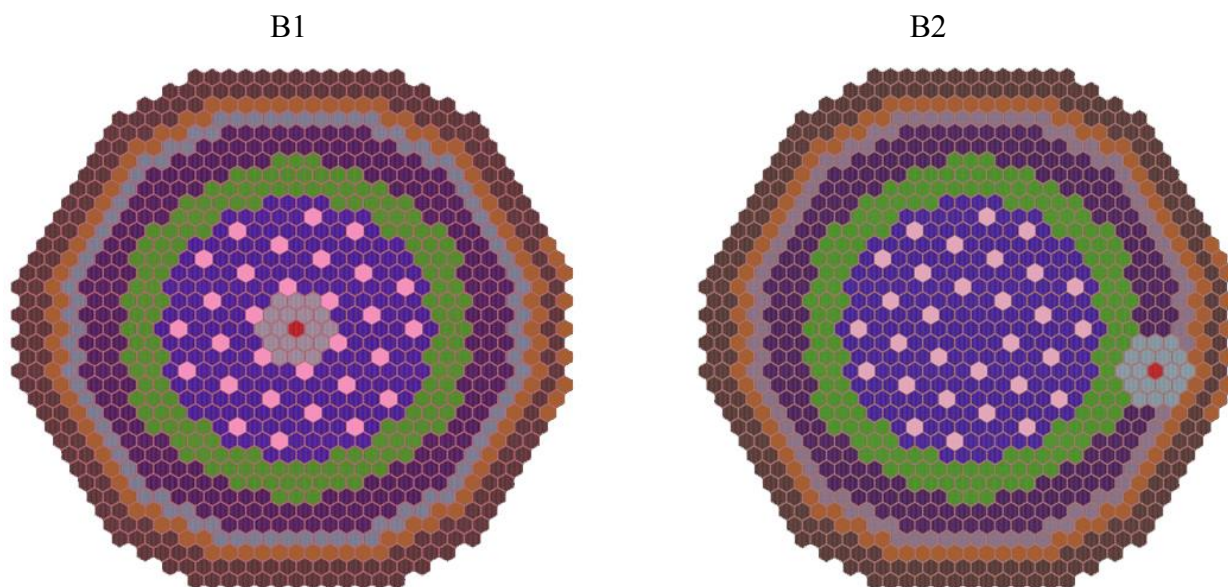


Рис. 1. Вариант 1: устройство для наработки Со-60 размещено в ЗМО; вариант 2: устройство для наработки Со-60 размещено в ЗБО

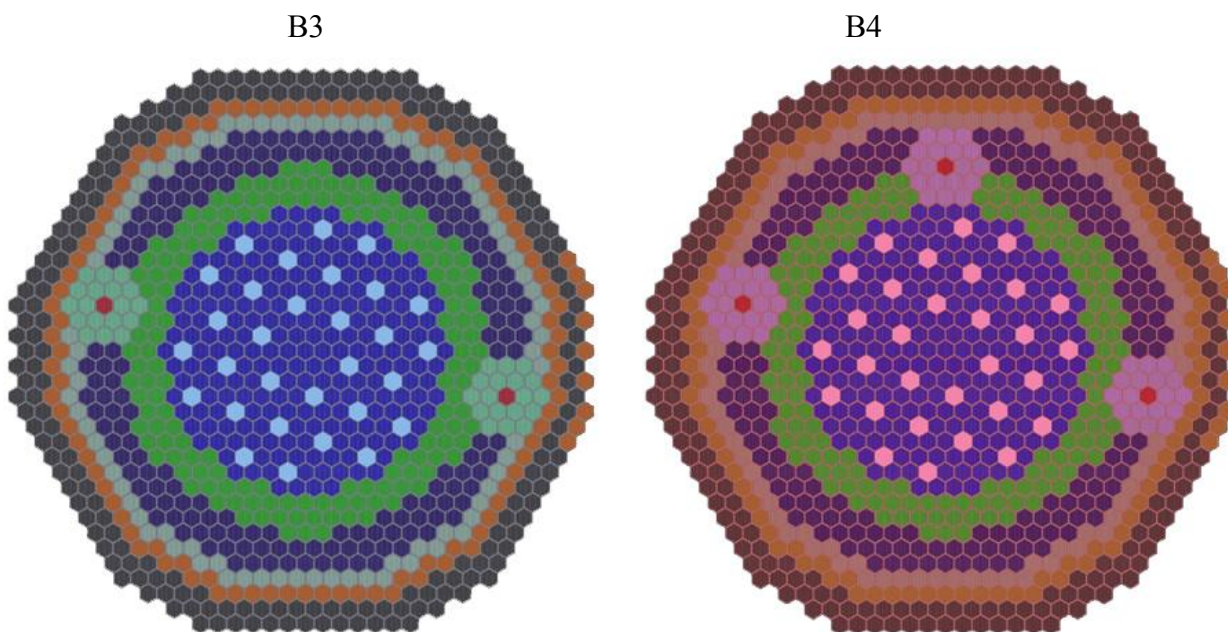


Рис. 2. Вариант 3 — два устройства, вариант 4 — три устройства для наработки Со-60 размещены в ЗБО

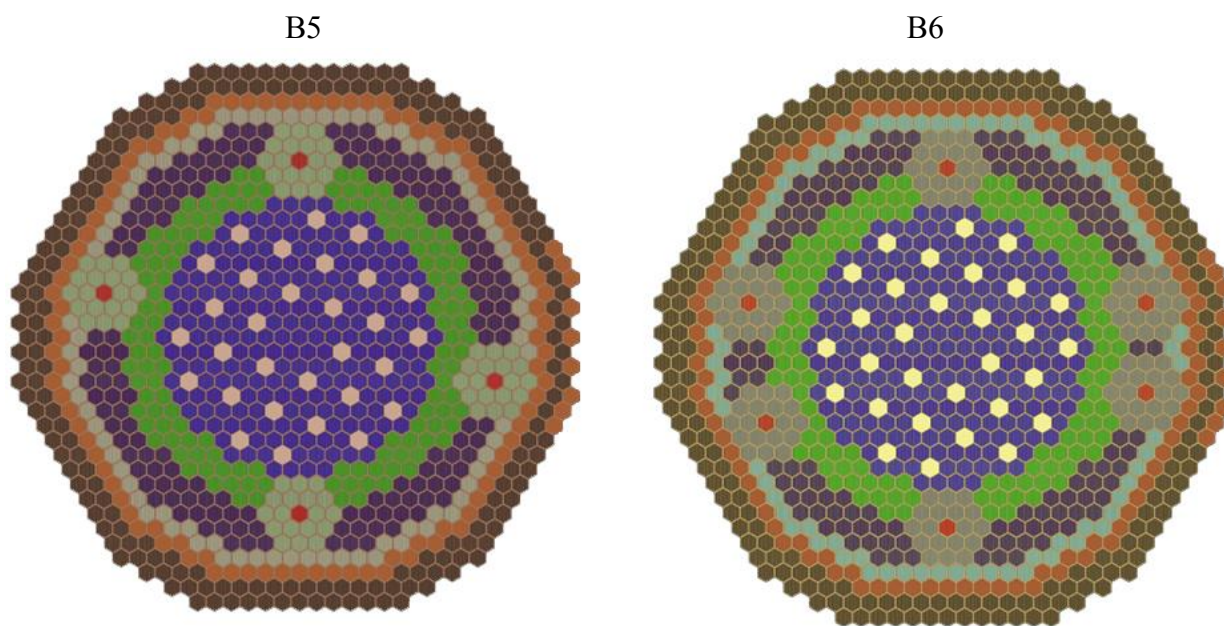


Рис. 3. Вариант 5 — четыре устройства, вариант 6 — шесть устройств для наработки Co-60 размещены в ЗБО

3 Результаты расчётных исследований

В данном разделе приведены результаты исследований по наработке Co-60 в зависимости от вида замедлителя, места размещения и количества облучательных устройства (ОУ).

В варианте В1 ОУ размещалось в центре реактора, а в варианте В2 — в зоне ЗБО. В расчётах определялись величины удельных масс и удельных активностей для данных вариантов при облучении в течение года. В таблице 1 и на рисунках 4 и 5 в качестве иллюстраций приведены результаты расчётного моделирования накопления Co-60 для варианта 1 при использовании разных замедлителей. Из результатов видно, что в устройстве, размещённом в центре, эффективность наработки Co-60 существенно выше, если в качестве замедлителя использовался графит, а не гидрид циркония.

В варианте 2 устройство размещалось в зоне ЗБО. В качестве замедлителей в данных устройствах также использовались графит и гидрид циркония. Результаты расчётов приведены в таблице 2 и на рисунке 6. Аналогично предыдущему варианту, использование графита в качестве замедлителя также показывает более высокую наработку Co-60 по сравнению гидридом циркония.

Таблица 1. Результаты расчёта накопления Co-60, вариант В1

Материал замедлителя	Удельная масса Co-60, г/см ³	Удельная активность, Ки/грамм
Графит	2,89573E-01	318,5303
ZrH ₂	1,73155E-01	190,4705

В1. Удельные массы г/см³

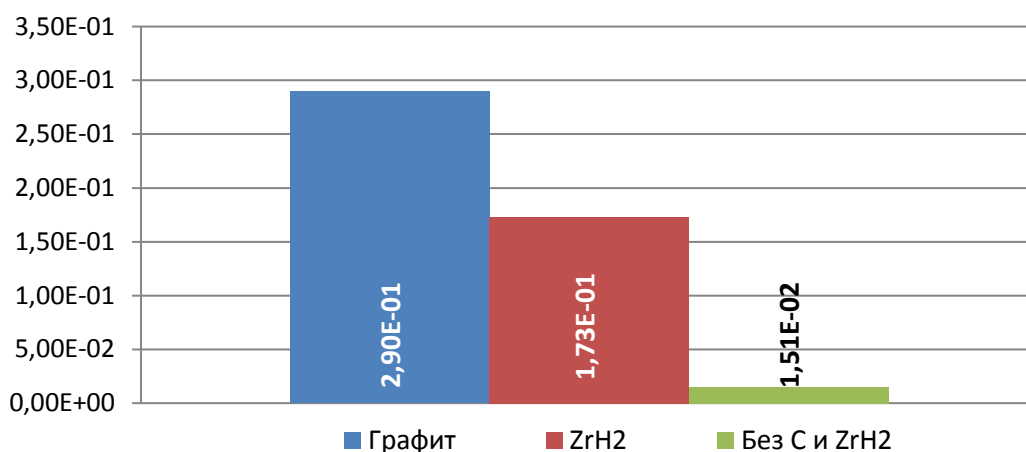


Рис. 4. Удельные массы Co-60, В1

В1. Удельные активности Ки/грамм

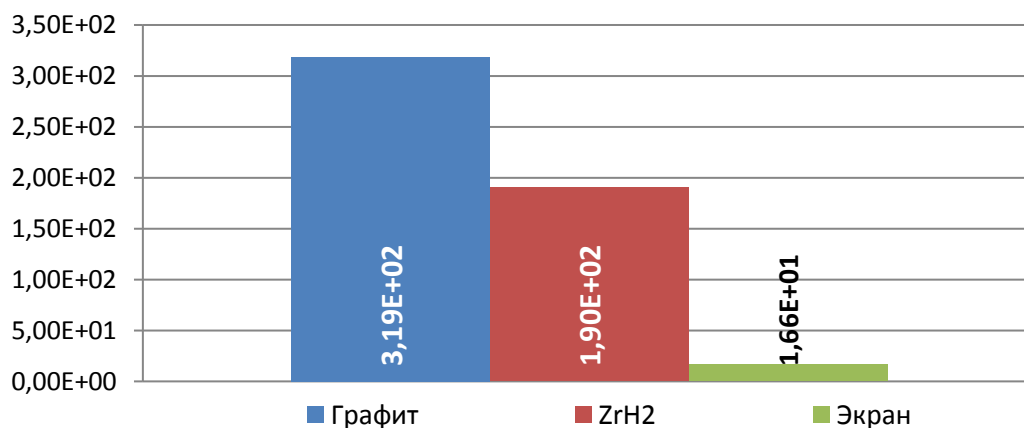


Рис. 5. Удельные активности Co-60 для варианта 1

Таблица 2. Результаты расчёта накопления Co-60, вариант В2

Материал замедлителя	Удельная масса Co-60, г/см ³	Удельная активность, Ки/грамм
Графит	1,10E-01	1,21E+02
ZrH ₂	6,25E-02	6,87E+01

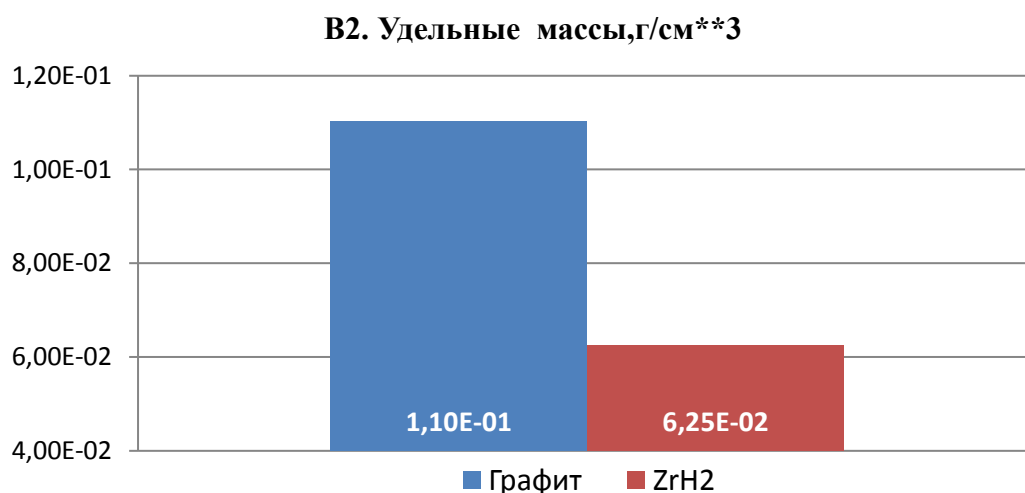


Рис. 6. Удельные массы Со-60 для варианта 2

Сравним варианты с размещением одного и четырёх устройства в зоне ЗБО. Результаты расчётных исследований, приведённые на рисунках 7 и 8, нормированы на одно устройство. На рисунке 7 сравниваются величины удельных масс. На рисунке 8 — удельные активности. Результаты показывают, что для двух вариантов замедлителей в каждом облучательном устройстве из четырёх (вариант В5) нарабатывается Со-60 больше, чем когда установлено только одно устройство (вариант В2).

Из результатов расчётов видно, что ZrH₂ уступает по эффективности наработки Со-60 графиту.

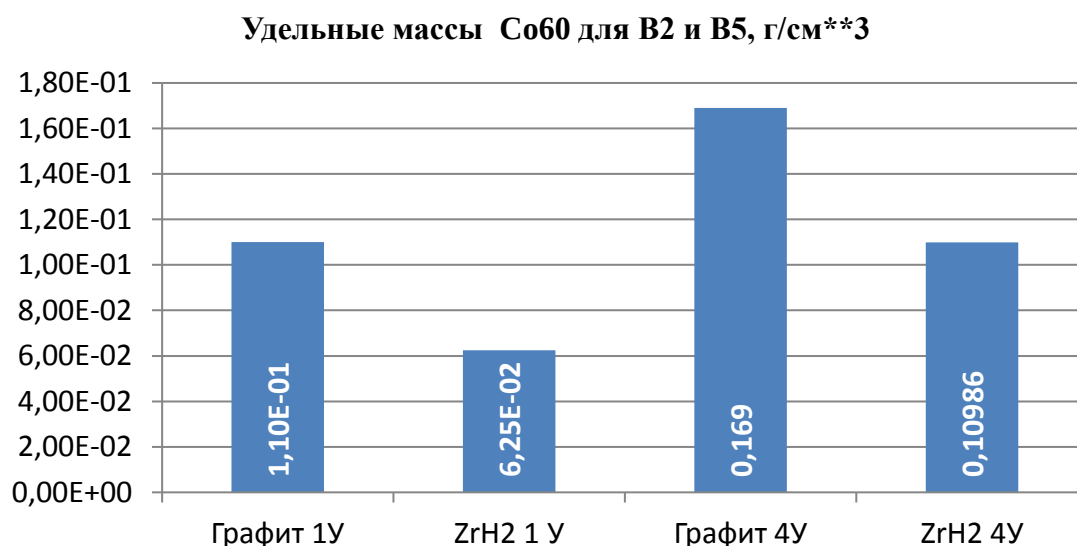


Рис. 7. Сравнение удельных масс Со-60 для вариантов В2 и В5

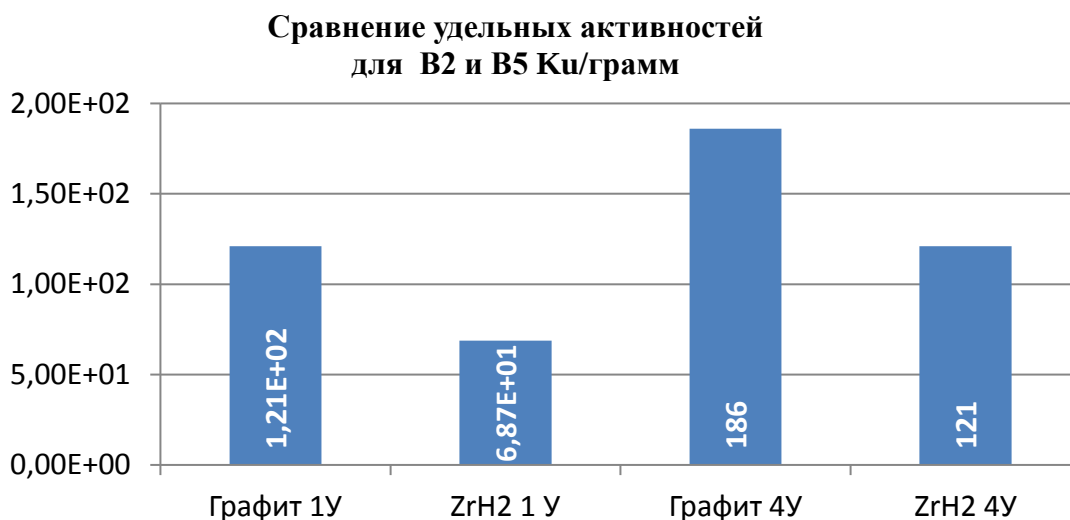


Рис. 8. Сравнение удельных активностей Со-60 для вариантов 2 и 5

На рисунке 9 приведены распределения потока нейтронов по энергии в Со-59, из которого нарабатывается Со-60 в варианте В2, при использовании в качестве замедлителя графита или гидрида циркония. На рисунке 10 приведены значения скоростей захвата в Со-59 при использовании различных замедлителей.



Рис. 9. Плотности нейтронных потоков в Со-59 для варианта В2

Из результатов видно, что плотность потока нейтронов в области энергий с энергетической группы 6 по группу 24 в случае использования графита в качестве замедлителя существенно выше, чем при использовании гидрида циркония. Однако с группы 1 по 4 поток выше в гидриде циркония.

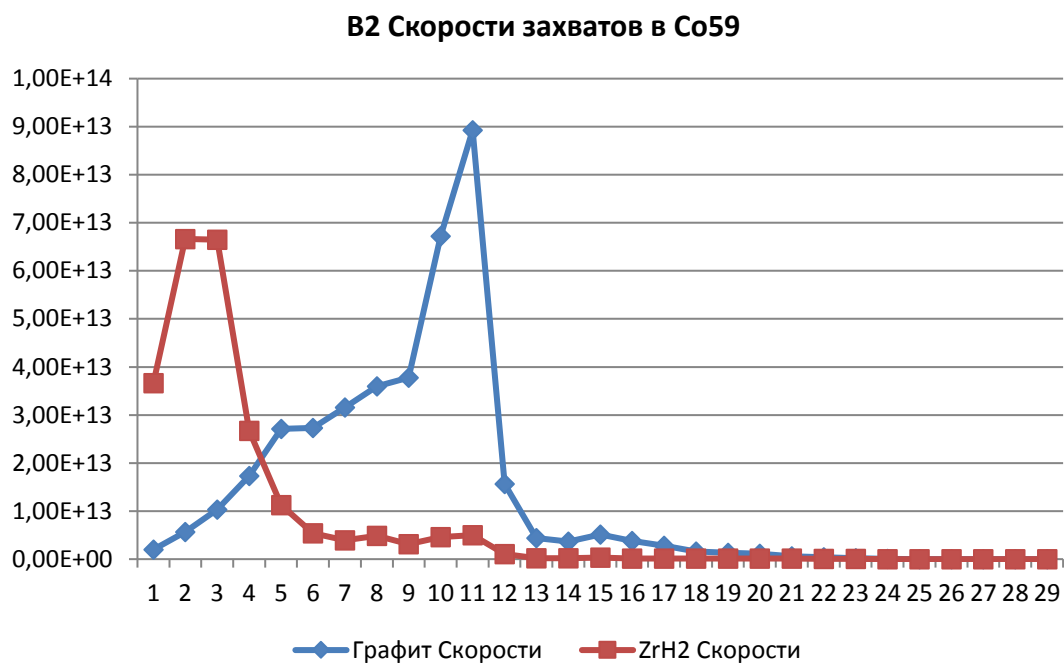


Рис. 10. Скорости захватов в Co-59 для варианта B2

Из сравнения скоростей захвата на рисунке 10 видно, что скорость захвата в области низких энергий (группы 1–4) в случае использования в качестве замедлителя нейтронов ZrH_2 значительно выше, чем при использовании графита. Рассмотрим теперь детальную зависимость сечения захвата нейтронов в Co-59 от энергии нейтронов.

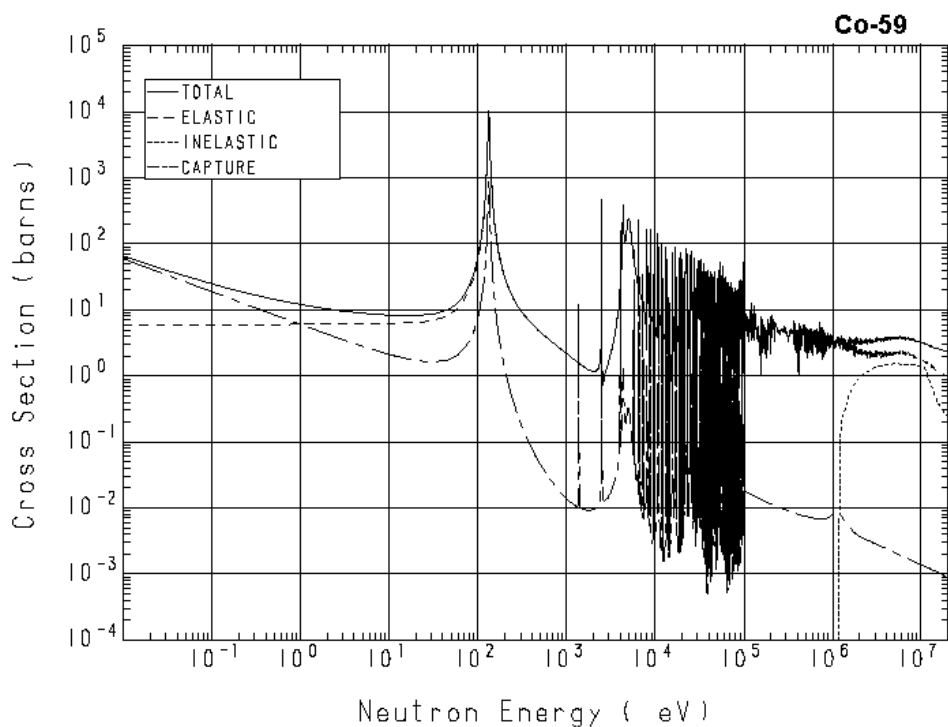


Рис.11. Зависимость сечений Co-59 от энергии нейтронов

На рисунке 11 с детальным описанием нейтронных сечений показано, что при формировании спектра в Со-59 важно не только замедлить быстрые нейтроны, но и обеспечить высокий поток нейтронов в тепловой резонансной области энергий нейтронов. Из результатов, приведённых на рисунке 10, видно, что поток нейтронов в случае использования ZrH_2 «перезамедлен». В нём недостаточно «учтена» промежуточная область энергии нейтронов, в которой сосредоточены резонансы.

В таблице 3 приведены результаты наработки Со-60 при разных количествах устройств, размещённых в ЗБО (рис. 1—3).

Таблица 3. Результаты расчёта наработки Со-60, варианты В2—В6

Вариант	Число устройств	Удельная масса Со-60, г/см ³	Уд. активность, Ки/грамм	Масса Со-60, г
В2	1 У	0,11	121	5,10E+02
В3	2 У	0,125	138	1,16E+03
В4	3 У	0,136	149	1,89E+03
В5	4 У	0,169	186	3,14E+03
В6	6 У	0,165	182	4,59E+03

На рисунке 12 приведены результаты расчётов удельной активности Со-60 на одно устройство для вариантов с размещением ОУ в ЗБО для вариантов В2—В6. На рисунке 13 для тех же вариантов приведена удельная масса наработанного Со-60 также на одно устройство. На рисунке 14 приведена полная масса наработки Со-60 в вариантах В2—В4.

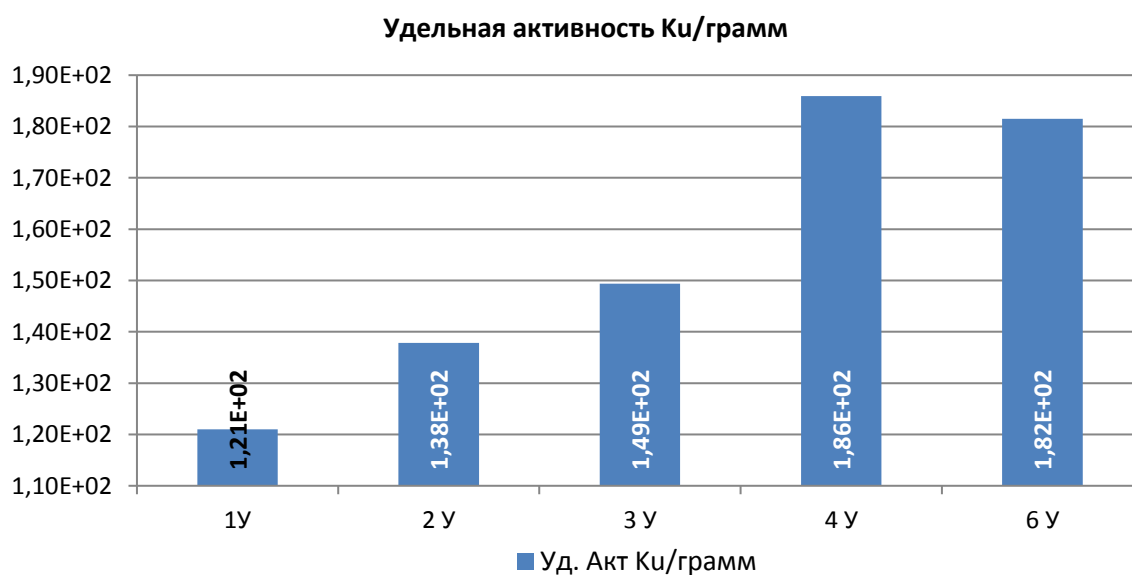


Рис. 12. Удельная активность Со-60 в вариантах В2—В6 на одно устройство

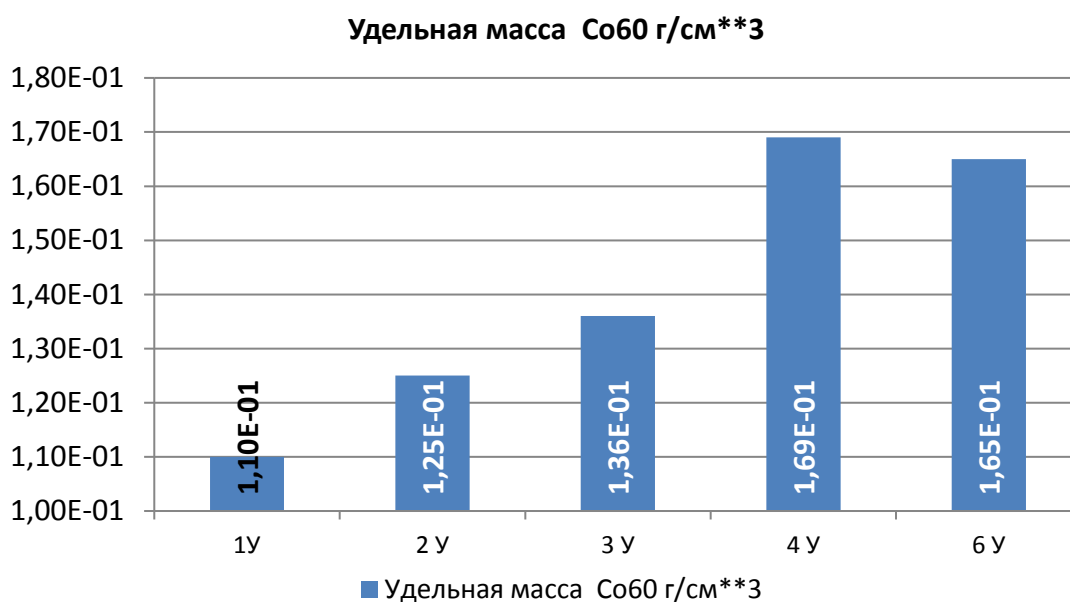


Рис.13. Удельная масса Со-60 в вариантах В2–В6 на одно устройство

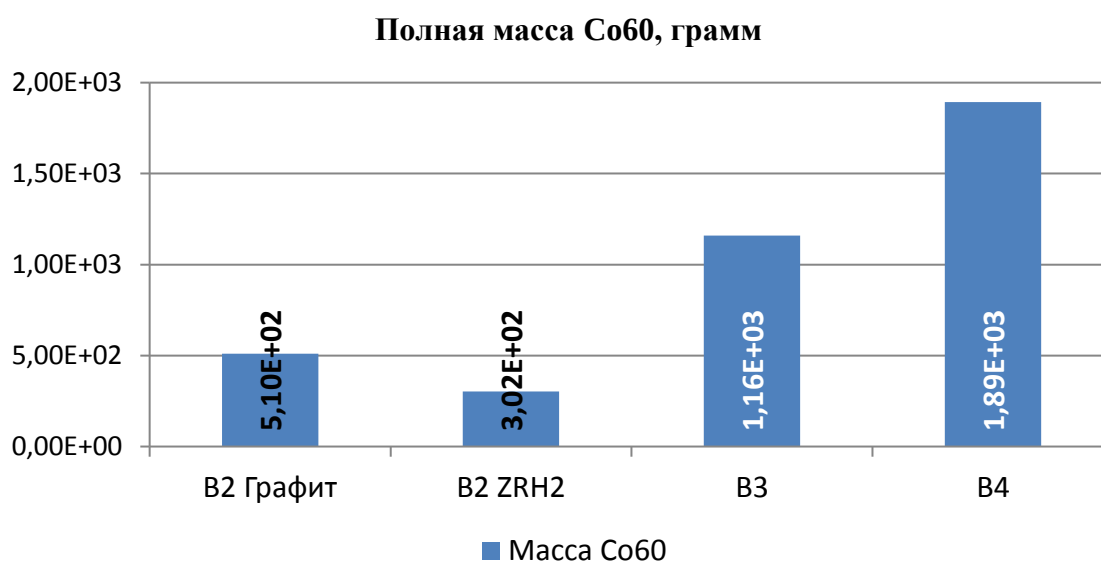


Рис. 14. Полная масса Со-60 в вариантах В2–В4

Из результатов, приведённых в таблице 3 и на рисунках 12–14, следует, что при увеличении числа устройств по наработке Со-60 увеличивается не только полная масса Со-60, но и удельная масса на одно устройство. Объяснение данного факта не является очевидным.

Рассмотрим теперь более детально влияние спектральных условий и величин полного потока на изменение объёма наработки Со-60.

4 Анализ зависимости наработки Со-60 от спектра и плотности потока

В данном разделе проведён анализ результатов исследований наработки Со-60 в разных вариантах количества и размещения облучательных устройств. Рассматривались варианты с одним и четырьмя устройствами для наработки Со-60. В таблице 4 и на рисунках 15 и 16 приведены распределения потоков нейтронов и скоростей захватов при размещении одного и четырёх ОУ при наработке Со-60. В обоих вариантах рассматриваются потоки и скорости захвата, приходящиеся на одно устройство.

Таблица 4. Распределение плотностей потока и скоростей наработки Со-60

Группа	Плотность потока нейтронов		Скорость наработки Со-60	
	1У	4У	1У	4У
1	8,84E+10	1,41E+11	1,97E+12	3,29E+12
2	3,72E+11	5,19E+11	5,64E+12	7,71E+12
3	1,01E+12	1,72E+12	1,03E+13	1,77E+13
4	2,39E+12	3,75E+12	1,73E+13	2,68E+13
5	5,45E+12	6,37E+12	2,71E+13	3,15E+13
6	7,92E+12	1,18E+13	2,73E+13	4,04E+13
7	1,27E+13	2,01E+13	3,15E+13	4,93E+13
8	1,92E+13	3,04E+13	3,59E+13	5,69E+13
9	2,24E+13	3,84E+13	3,78E+13	6,49E+13
10	2,29E+13	3,54E+13	6,72E+13	1,03E+14
11	1,29E+13	2,00E+13	8,93E+13	1,40E+14
12	6,13E+13	9,87E+13	1,57E+13	2,43E+13
13	9,08E+13	1,52E+14	4,36E+12	7,23E+12
14	1,12E+14	1,85E+14	3,66E+12	6,06E+12
15	4,56E+13	7,66E+13	5,13E+12	8,06E+12
16	4,58E+13	7,40E+13	3,76E+12	5,89E+12
17	1,01E+14	1,63E+14	2,76E+12	4,03E+12
18	7,57E+13	1,22E+14	1,58E+12	2,48E+12
19	8,41E+13	1,43E+14	1,31E+12	2,19E+12
20	6,92E+13	1,21E+14	1,10E+12	1,92E+12
21	6,10E+13	1,04E+14	6,02E+11	1,03E+12
22	5,09E+13	8,09E+13	3,67E+11	5,83E+11
23	2,70E+13	4,35E+13	1,67E+11	2,69E+11
24	1,60E+13	2,36E+13	5,74E+10	8,55E+10
25	4,27E+12	6,75E+12	9,60E+09	1,51E+10
26	1,50E+12	3,61E+12	2,04E+09	4,97E+09
27	2,21E+11	6,17E+11	1,77E+08	5,04E+08
28	0,00E+00	4,44E+10	0,00E+00	3,04E+07
29	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

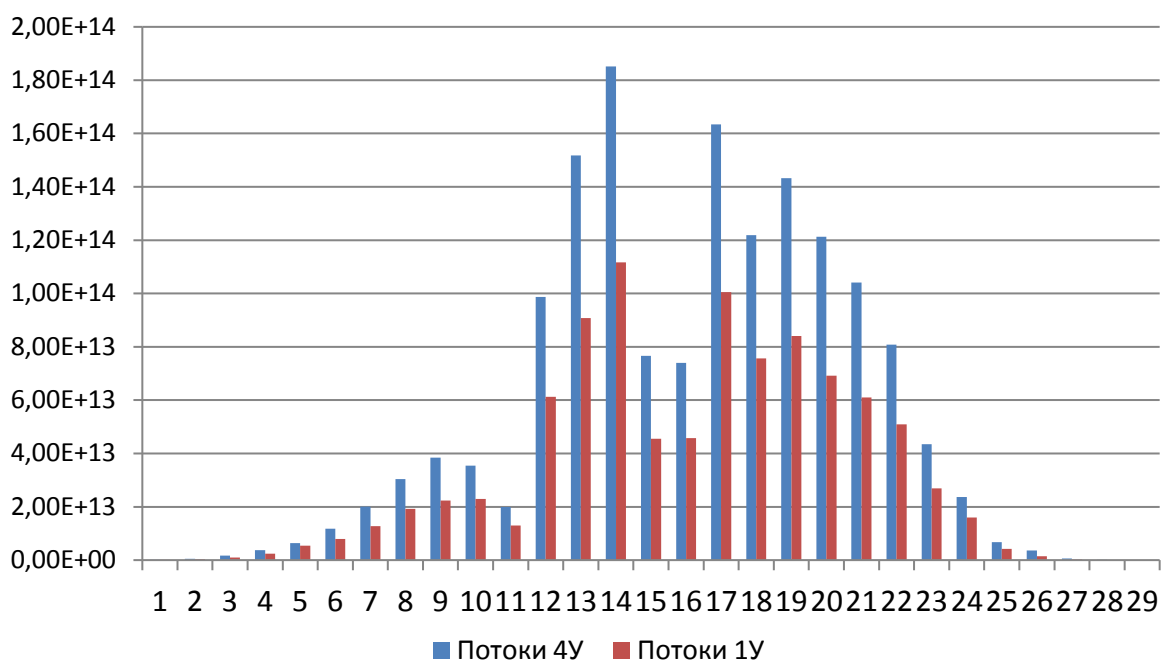


Рис. 15. Распределение плотности потока при размещении 1 и 4 ОУ

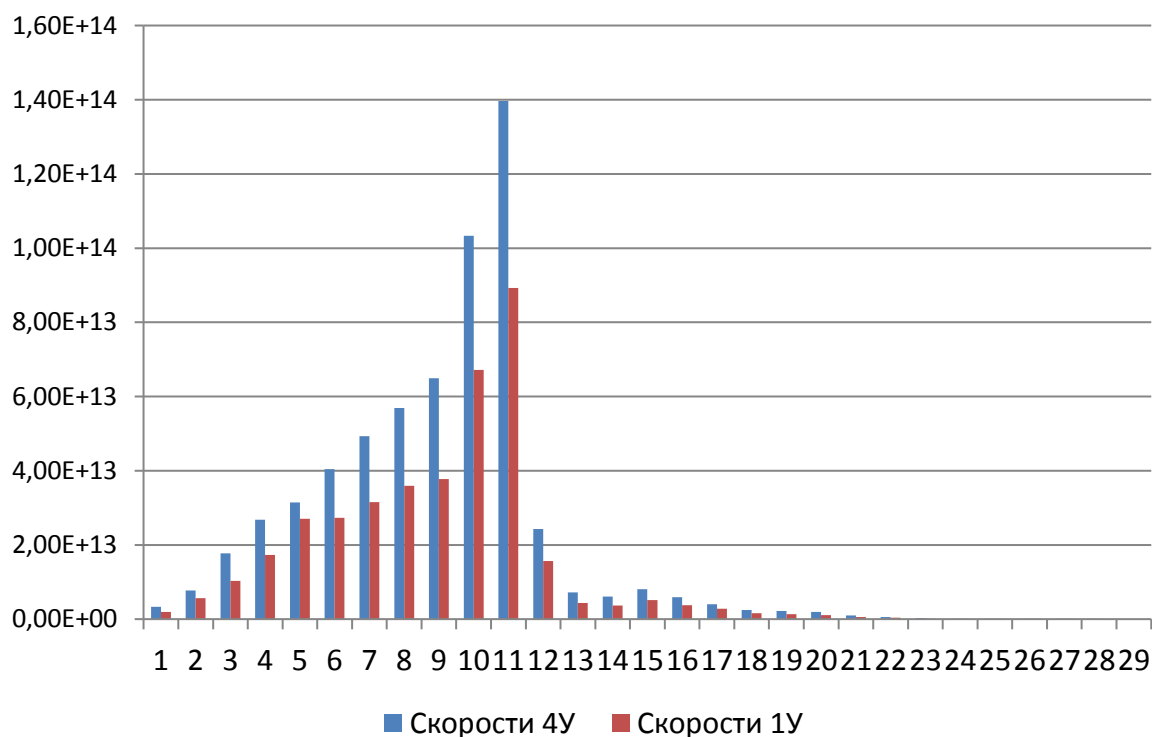


Рис. 16 . Распределение скоростей захвата на Со-59 при размещении одного или четырёх ОУ

В таблице 5 и на рисунках 17 и 18 приведены соответственно спектры потока нейтронов и спектры скоростей реакций.

Сравнение наработки Со-60 на одно облучательное от числа устройств показало, что спектр нейтронов практически не зависит от числа устройств. Разница в наработке Со-60 от числа устройств зависит от потока нейтронов и числа захватов. А они в данном исследовании разные.

Таблица 5. Распределение спектров потока

№	Спектры 4У	Спектры1У
1	9,01E-05	9,27E-05
2	3,31E-04	3,90E-04
3	1,10E-03	1,06E-03
4	2,39E-03	2,51E-03
5	4,06E-03	5,72E-03
6	7,52E-03	8,31E-03
7	1,28E-02	1,34E-02
8	1,94E-02	2,02E-02
9	2,45E-02	2,35E-02
10	2,26E-02	2,40E-02
11	1,27E-02	1,36E-02
12	6,30E-02	6,43E-02
13	9,68E-02	9,53E-02
14	1,18E-01	1,17E-01
15	4,88E-02	4,78E-02
16	4,72E-02	4,80E-02
17	1,04E-01	1,06E-01
18	7,78E-02	7,94E-02
19	9,13E-02	8,82E-02
20	7,74E-02	7,26E-02
21	6,64E-02	6,40E-02
22	5,16E-02	5,35E-02
23	2,78E-02	2,83E-02
24	1,51E-02	1,68E-02
25	4,31E-03	4,48E-03
26	2,30E-03	1,57E-03
27	3,93E-04	2,32E-04
28	2,83E-05	0,00E+00
29	0,00E+00	0,00E+00

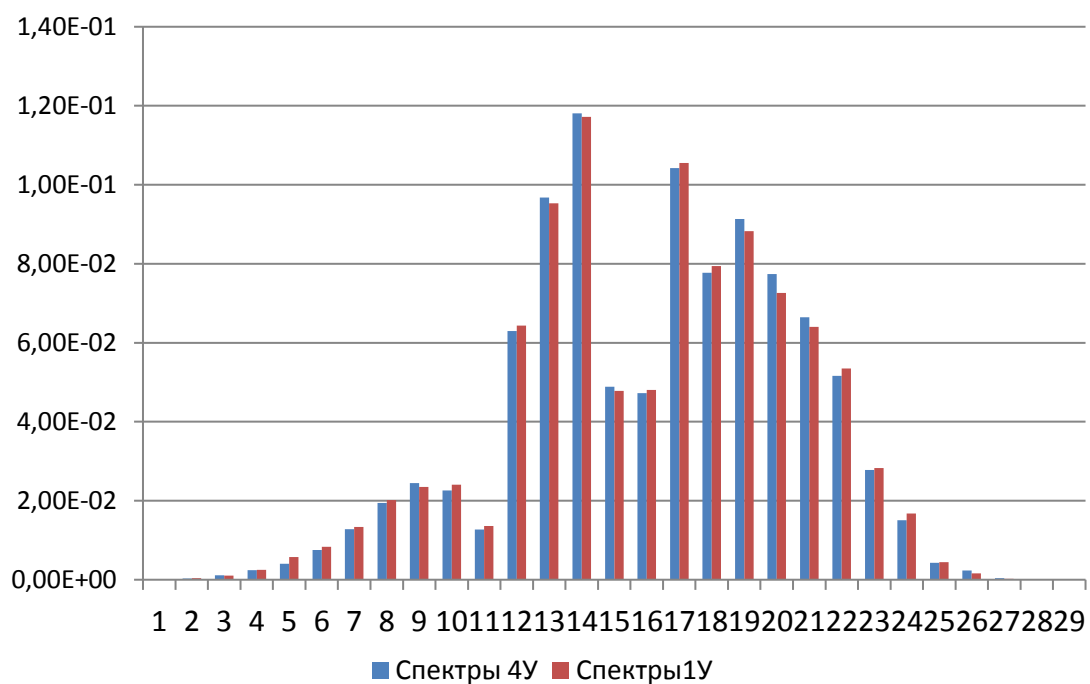


Рис. 17. Распределение спектров потока при размещении 1 и 4 ОУ

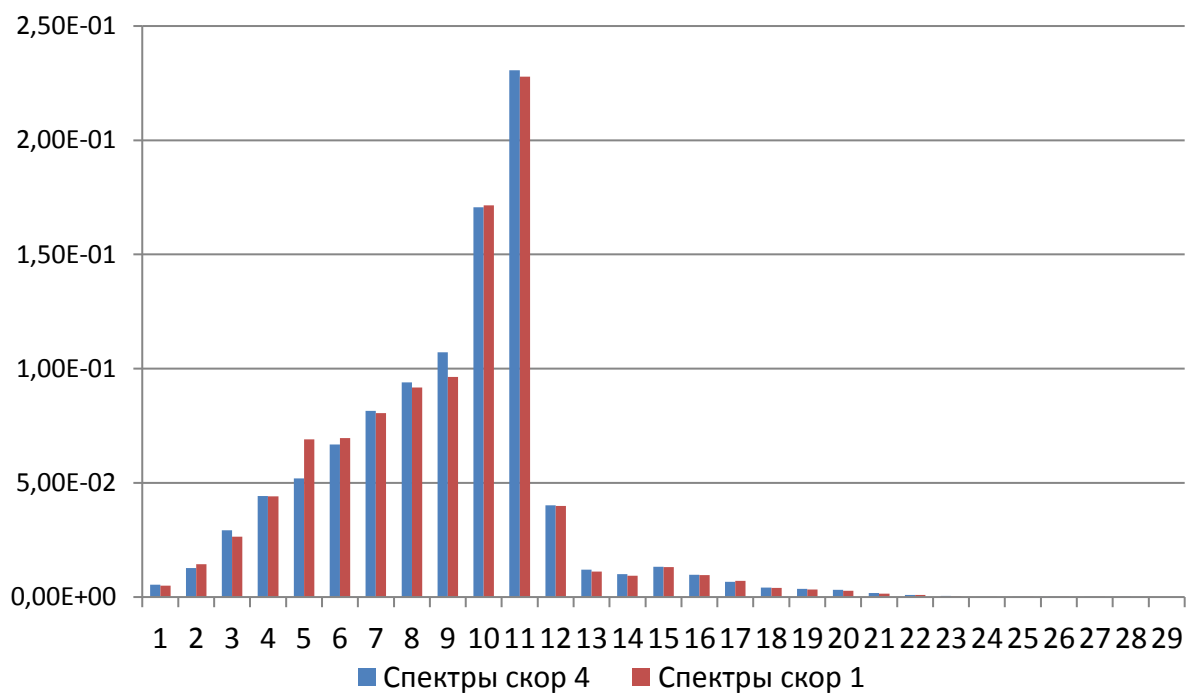


Рис. 18. Распределение спектров скоростей захвата на Co-59 при размещении 1 и 4 ОУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия исследований для наработки кобальта-60 в реакторе типа БН-800. В исследованиях были рассмотрены различные условия и варианты по размещению устройств облучения Со-59 и вид замедлителя нейтронов. Рассматривались два материала, выбранные в качестве замедлителя — графит и гидрид циркония.

Результаты показали:

- 1) удельная активность Со-60 существенно зависит от плотности нейтронного потока и спектральных условий облучения;
- 2) для получения Со-60 высокой удельной активности важно не только сформировать определённые спектральные условия, но и высокую интенсивность потока нейтронов;
- 3) значительное превосходство графита над гидридом циркония в сравниваемых вариантах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рисованный 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.
3. Дзугкоева 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. — URL: https://atomvestnik.ru/wp-content/uploads/2022/07/VA3_spreads.pdf (дата обращения 06.03.2025).
5. Isotope Production at the Hanford Site in Richland, Washington, report, June 1, 1999; Richland, Washington. — URL: <https://digital.library.unt.edu> (дата обращения 10.03.2025).
6. Шагинян Р.А., Коробейников В.В., Стогов В.Ю. Исследование зависимости эффективности наработки различных изотопов от энергетической структуры плотности нейтронного потока : Препринт-3302. — 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 // Proc. 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. — URL: <https://strana-rosatom.ru/2017/11/30/kobalt-60-tochki-rosta/> (дата обращения 06.03.2025).
9. Мальцев В.В., Карпенко А.И., Чернов И.А., Головин В.В. Опыт наработки ^{60}Co в БН-600 // Атомная энергия. — 1999. — Т. 86. — Вып. 3. — С. 216—219.
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 ^{60}Co в БН-350 // Атомная энергия. — 1994. — Т. 77. — Вып. 6. — С. 454—457.
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 РАН. —

2014. — Т. 16. — № 6. — С. 112—118. — URL: http://www.ssc.smr.ru/izv_2014_6.html (дата обращения 10.03.2025).
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 РАН. — 2013. — Т. 15. — № 4–5. — С. 1084—1090.
 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.
 17. Jaakko Leppanen, PSG2/SERPENT – A Continious Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. — Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015. — URL: http://montecarlo.vtt.fi/download/Serpent_manual.pdf (дата доступа 10.03.2025).

Подписано к печати 04.06.2025.

Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,64. Уч.-изд. л. 0,8.

Тираж 41 экз. Заказ № 134.

Отпечатано в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» методом прямого репродуцирования
с оригинала авторов.

249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.