

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. Лейпунского

ФЭИ – 3300

В. В. Коробейников, В. В. Колесов, А. В. Михалёв, Л. П. Пупко

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ И
ГЕТЕРОГЕННЫХ ЭФФЕКТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ВЫЖИГАНИЯ МИНОРНЫХ АКТИНИДОВ**

Обнинск – 2022

В.В. Коробейников¹, В.В. Колесов², А.В. Михалёв², Л.П. Пупко¹

¹ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск

² Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Исследования спектральных и гетерогенных эффектов для повышения эффективности выжигания минорных актинидов : Препринт ФЭИ–3300 / Обнинск, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2022. 38 с.

Ключевые слова: трансмутация, выжигание минорных актинидов, отработавшее топливо, радиоактивность, биологическая опасность, хранение отработавшего топлива, спектр нейтронов, гетерогенность.

Проведены теоретические исследования спектральных и гетерогенных эффектов для повышения эффективности выжигания минорных актинидов в реакторе на быстрых нейтронах типа БН-600. В рамках исследований решены следующие задачи:

- Проведены расчёты активных зон быстрых реакторов с топливом $U^{238}+Am^{241}$ и $Th^{232}+Am^{241}$ для выжигания Am-241;
- Оценено влияние спектральных эффектов на разные варианты выжигания Am-241 в реакторе типа БН-600;
- Рассчитаны эффекты гетерогенности при выжигании Am-241 в реакторе на быстрых нейтронах с уран-ториевым топливом;
- Проведено моделирование выжигания минорных актинидов при разных способах их размещения в реакторе типа БН-600 показало наиболее эффективные пути утилизации минорных актинидов;
- Исследована эффективность выжигания Am-241 в быстро-тепловой системе на основе реактора типа БН-600.

Theoretical studies of spectral and heterogeneous effects have been carried out to improve the efficiency of burning minor actinides in a fast neutron reactor of the BN-600 type. As part of the research, the following tasks were solved:

- Calculations of cores of fast reactors with fuel $U^{238}+Am^{241}$ and $Th^{232}+Am^{241}$ for burning Am-241;
- The influence of spectral effects on different options for burning Am-241 in a BN-600 reactor was evaluated;
- Calculated the effects of heterogeneity in the burning of Am-241 in a fast neutron reactor with uranium-thorium fuel;
- Simulation of the burning of minor actinides with different ways of their placement in a BN-600 reactor showed the most effective ways of utilizing minor actinides;
- The efficiency of burning Am-241 in a fast-thermal system based on a BN-600 type reactor was studied.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ | 4 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| 1. Исследование композиций активных зон быстрых реакторов с топливом $U^{238} + Am^{241}$ и $Th^{232} + Am^{241}$ для выжигания и трансмутации Am-241 | 6 |
| 1.1 Композиция в ЗБО из $U^{238} + Am^{241}$ | 6 |
| 1.2 Композиция в ЗБО из $Th^{232} + Am^{241}$ | 9 |
| 1.3 Сравнение от времени облучения изменения концентраций нуклидов с наибольшим вкладом в композициях $U^{238} + Am^{241}$, $Th^{232} + Am^{241}$ | 11 |
| 2 Сравнение спектральных характеристик разных вариантов выжигания Am-241 в реакторе типа БН-600 | 13 |
| 3 Исследования эффектов гетерогенности при трансмутации Am-241 в реакторе на быстрых нейтронах с уран-ториевым топливом | 20 |
| 4 Расчётное моделирование выжигания минорных актинидов при разных способах их размещения в реакторе типа БН-600..... | 21 |
| 5 Исследование эффективности трансмутации Am-241 в быстротепловой системе на основе реактора типа БН-600 | 23 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 34 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 36 |

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 |
| ЗМО | – зона малого обогащения |
| ЗСО | – зона среднего обогащения |
| ЗБО | – зона большого обогащения |
| МА | – минорные актиниды |
| МОКС-топливо | – ядерное топливо из смеси оксидов плутония и обедненного урана |
| ОЯТ | – отработавшее (облученное) ядерное топливо |
| РБН | – реакторы на быстрых нейтронах |
| ТВС | – тепловыделяющая сборка |
| ЯЭ | – ядерная энергетика |
| ЯЭС | – ядерная энергетическая система |

ВВЕДЕНИЕ

Главной проблемой атомной энергетики на сегодняшний день является утилизация ядерных отходов. В работающих ядерных реакторах накапливаются так называемые минорные актиниды — долгоживущие радиоактивные изотопы америция, кюрия, нептуния. В настоящее время во всем мире обращение с минорными актинидами, как правило, сводится либо к их отправке в хранилища в составе отработанного ядерного топлива, либо к их захоронению в долгосрочных могильниках вместе с продуктами деления. Для существующей и перспективной крупномасштабной ядерной энергетики рассматриваются различные варианты трансмутационного топливного цикла, существенно снижающие опасность минорных актинидов [1] — [26]. Однако в настоящее время долгосрочная стратегия обращения с МА не выбрана ни в одной стране мира. Решение отмеченной выше проблемы пока широко рассматривается только на уровне математического моделирования с использованием современных программных комплексов и доступных ядерных данных. Экспериментальное обоснование выдвигаемых подходов к утилизации МА находится на лабораторном уровне.

Теоретически подходы к решению проблемы МА сводятся к исследованиям эффективности трансмутации в ядерных реакторах разных типов. И в этом направлении единства и согласия не наблюдается. Авторы данной работы являются сторонниками системного подхода к сокращению скорости накопления МА с учётом стратегии развития ядерной энергетики в России и Мире. В работах [25], [27] рассматриваются сценарные исследования и исследуются возможные темпы накопления МА.

В работах [24], [26] приводятся результаты исследований возможности разработки новой активной зоны реактора на быстрых нейтронах, позволяющей обходиться без традиционных видов ядерного топлива (урана или/и плутония) для решения задачи трансмутации минорных актинидов, представляющих основную опасность на значительном временном интервале, что является важной и актуальной задачей. Теоретически это оказывается возможным благодаря тому, что практически все МА имеют конечную критическую массу. Однако при практической реализации таких реакторов возникают проблемы с низкой долей запаздывающих нейтронов, что ухудшает возможность обеспечения безопасности таких реакторов. Отметим — ухудшает, но не закрывает! Другая проблема состоит в том, что для загрузки таких реакторов требуется сразу большое количество минорных актинидов. Третья, но не последняя проблема — это необходимость разработки специальных приёмов загрузки-выгрузки таких реакторов из-за высокого тепловыделения МА.

В данной работе проведён ряд исследований, направленных на снижение перечисленных выше проблем трансмутации или, по крайней мере, на их смягчение. В работе приведены результаты решения следующих задач:

1. Исследование композиций активных зон быстрых реакторов с топливом $U^{238} + Am^{241}$ и $Th^{232} + Am^{241}$ для выжигания и трансмутации Am-241.
2. Сравнение спектральных характеристик разных вариантов выжигания Am-241 в реакторе типа БН-600.
3. Исследования эффектов гетерогенности при выжигании Am-241 в реакторе на быстрых нейтронах с уран-ториевым топливом.
4. Расчётное моделирование выжигания минорных актинидов при разных способах их размещения в реакторе типа БН-600.
5. Исследование эффективности трансмутации Am-241 в быстро-тепловой системе на основе реактора типа БН-600.

1. Исследование композиций активных зон быстрых реакторов с топливом $U^{238} + Am^{241}$ и $Th^{232} + Am^{241}$ для выжигания и трансмутации Am-241

Для исследований использовалась модель реактора типа БН-600, приведённая в [28]. В первом варианте данной модели UOX-топливо заменялось смесью Am-241 с U-238. Во втором — смесью Am-241 с Th-232.

1.1 Композиция в ЗБО из $U^{238} + Am^{241}$

В таблице 1 приведены результаты изменения нуклидного состава от времени облучения композиции ЗБО, в которой вместо уранового топлива использовалась смесь U-238 и Am-241. В таблице 1 выделены нуклиды с наибольшим вкладом в полное распределение. На рисунке 1 приведены изменения ядерных плотностей U-238 и Am-241.

Из результатов следует, что ядерная плотность Am-241 сокращается достаточно эффективно. Темп сокращения U-238 существенно ниже.

На рисунке 2 приведены результаты изменения эффективного коэффициента размножения от времени облучения при замене UOX-топлива на смесь нуклидов U-238 и Am-241.

Из результатов следует «устойчивость» запаса реактивности, или точнее потенциала выжигания Am-241 с сохранением запаса реактивности на длительный временной интервал. Из результатов, приведённых на рисунке 2 видно, что в начале облучения $K_{эф}$ растёт, а затем падает. Это объясняется воспроизводством плутония из урана-238, а также появлением в результате захвата нейтронов в Am-241 нуклидов, обладающих большей вероятностью деления во всей области энергии по сравнению с Am-241.

Таблица 1. Изменение концентраций нуклидов от времени облучения композиции ЗБО из $U^{238} + Am^{241}$

| Изотоп | Лет | | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 |
| U232 | | 1,44E-10 | 2,51E-10 | 1,71E-09 | 3,00E-09 | 4,30E-09 | 4,75E-09 | 4,61E-09 |
| U23 | | 5,05E-10 | 9,33E-10 | 1,21E-08 | 2,76E-08 | 4,47E-08 | 5,74E-08 | 6,34E-08 |
| U234 | | 2,00E-05 | 3,11E-05 | 1,49E-04 | 2,31E-04 | 3,05E-04 | 3,58E-04 | 3,83E-04 |
| U235 | | 1,77E-07 | 3,36E-07 | 5,05E-06 | 1,27E-05 | 2,39E-05 | 3,66E-05 | 4,87E-05 |
| U236 | | 7,55E-08 | 8,90E-08 | 3,50E-07 | 9,46E-07 | 2,33E-06 | 4,85E-06 | 8,78E-06 |
| U237 | | 4,19E-08 | 4,06E-08 | 6,73E-08 | 8,01E-08 | 7,85E-08 | 7,23E-08 | 6,90E-08 |
| U238 | 1,83E-02 | 1,78E-02 | 1,77E-02 | 1,69E-02 | 1,61E-02 | 1,52E-02 | 1,43E-02 | 1,33E-02 |
| U239 | | 4,28E-09 | 4,26E-09 | 7,41E-09 | 9,64E-09 | 1,10E-08 | 1,19E-08 | 1,30E-08 |
| U240 | | 7,34E-14 | 7,31E-14 | 2,31E-13 | 4,12E-13 | 5,70E-13 | 7,28E-13 | 9,39E-13 |
| U241 | | 2,76E-21 | 2,75E-21 | 1,60E-20 | 3,90E-20 | 6,59E-20 | 9,88E-20 | 1,52E-19 |
| Np235 | | 1,12E-11 | 1,24E-11 | 4,46E-11 | 6,13E-11 | 5,97E-11 | 5,41E-11 | 4,26E-11 |
| Np236 | | 4,29E-09 | 6,14E-09 | 2,81E-08 | 4,31E-08 | 4,96E-08 | 4,63E-08 | 3,76E-08 |
| Np237 | | 1,24E-04 | 1,50E-04 | 2,70E-04 | 2,80E-04 | 2,58E-04 | 2,18E-04 | 1,72E-04 |
| Np238 | | 1,98E-08 | 2,40E-08 | 7,86E-08 | 1,12E-07 | 1,24E-07 | 1,23E-07 | 1,14E-07 |
| Np239 | | 6,19E-07 | 6,16E-07 | 1,07E-06 | 1,39E-06 | 1,59E-06 | 1,72E-06 | 1,88E-06 |
| Pu236 | | 4,43E-10 | 5,45E-10 | 2,08E-09 | 3,22E-09 | 3,73E-09 | 3,63E-09 | 3,11E-09 |
| Pu237 | | 5,23E-09 | 6,23E-09 | 2,12E-08 | 3,11E-08 | 3,30E-08 | 2,96E-08 | 2,43E-08 |
| Pu238 | | 1,32E-03 | 1,59E-03 | 3,13E-03 | 3,70E-03 | 3,81E-03 | 3,52E-03 | 2,96E-03 |
| Pu239 | | 3,03E-04 | 3,64E-04 | 8,69E-04 | 1,22E-03 | 1,51E-03 | 1,71E-03 | 1,80E-03 |
| Pu240 | | 4,24E-06 | 5,91E-06 | 3,28E-05 | 7,16E-05 | 1,31E-04 | 2,09E-04 | 2,99E-04 |
| Pu241 | | 7,08E-08 | 1,07E-07 | 9,80E-07 | 2,82E-06 | 6,50E-06 | 1,25E-05 | 2,10E-05 |
| Pu242 | | 3,27E-04 | 3,87E-04 | 8,20E-04 | 1,06E-03 | 1,21E-03 | 1,26E-03 | 1,23E-03 |
| Pu243 | | 1,41E-09 | 1,67E-09 | 6,51E-09 | 1,15E-08 | 1,61E-08 | 1,97E-08 | 2,29E-08 |
| Pu244 | | 9,87E-11 | 1,66E-10 | 2,28E-09 | 7,21E-09 | 1,74E-08 | 3,39E-08 | 5,73E-08 |
| Am241 | 2,12E-02 | 1,80E-02 | 1,73E-02 | 1,26E-02 | 9,40E-03 | 6,57E-03 | 4,36E-03 | 2,74E-03 |
| Am242 | | 1,05E-06 | 1,01E-06 | 1,33E-06 | 1,36E-06 | 1,15E-06 | 8,85E-07 | 6,52E-07 |
| Am342 | | 1,51E-04 | 1,74E-04 | 2,91E-04 | 3,05E-04 | 2,72E-04 | 2,15E-04 | 1,53E-04 |
| Am243 | | 6,63E-06 | 9,43E-06 | 4,95E-05 | 9,53E-05 | 1,50E-04 | 2,00E-04 | 2,40E-04 |
| Am244 | | 1,40E-11 | 2,00E-11 | 1,90E-10 | 5,00E-10 | 9,52E-10 | 1,49E-09 | 2,10E-09 |
| Am344 | | 9,01E-12 | 1,28E-11 | 1,22E-10 | 3,22E-10 | 6,12E-10 | 9,57E-10 | 1,35E-09 |
| Cm240 | | 1,97E-12 | 1,21E-12 | 3,28E-12 | 4,28E-12 | 2,92E-12 | 3,18E-12 | 1,84E-12 |
| Cm241 | | 2,05E-10 | 1,91E-10 | 4,03E-10 | 5,23E-10 | 4,59E-10 | 3,48E-10 | 2,49E-10 |
| Cm242 | | 2,17E-04 | 2,07E-04 | 2,61E-04 | 2,71E-04 | 2,32E-04 | 1,81E-04 | 1,34E-04 |
| Cm243 | | 4,15E-06 | 4,77E-06 | 9,66E-06 | 1,37E-05 | 1,59E-05 | 1,57E-05 | 1,38E-05 |
| Cm244 | | 2,25E-07 | 3,80E-07 | 4,87E-06 | 1,46E-05 | 3,32E-05 | 6,03E-05 | 9,42E-05 |
| Cm245 | | 2,96E-09 | 6,01E-09 | 1,91E-07 | 8,63E-07 | 2,71E-06 | 6,38E-06 | 1,23E-05 |

Продолжение табл. 1

| Изотоп | Лет | | | | | | | |
|--------|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | 24 | 28 |
| Cm246 | | 2,12E-11 | 5,25E-11 | 4,50E-09 | 3,27E-08 | 1,54E-07 | 5,15E-07 | 1,35E-06 |
| Cm247 | | 1,01E-13 | 3,05E-13 | 6,72E-11 | 7,47E-10 | 4,98E-09 | 2,20E-08 | 7,33E-08 |
| Cm248 | | 5,06E-16 | 1,85E-15 | 1,11E-12 | 1,98E-11 | 1,98E-10 | 1,23E-09 | 5,60E-09 |
| Cm249 | | 2,53E-22 | 9,23E-22 | 1,02E-18 | 2,47E-17 | 2,99E-16 | 2,23E-15 | 1,20E-14 |
| Cm250 | | 1,72E-25 | 7,67E-25 | 2,12E-21 | 8,69E-20 | 1,64E-18 | 1,76E-17 | 1,33E-16 |

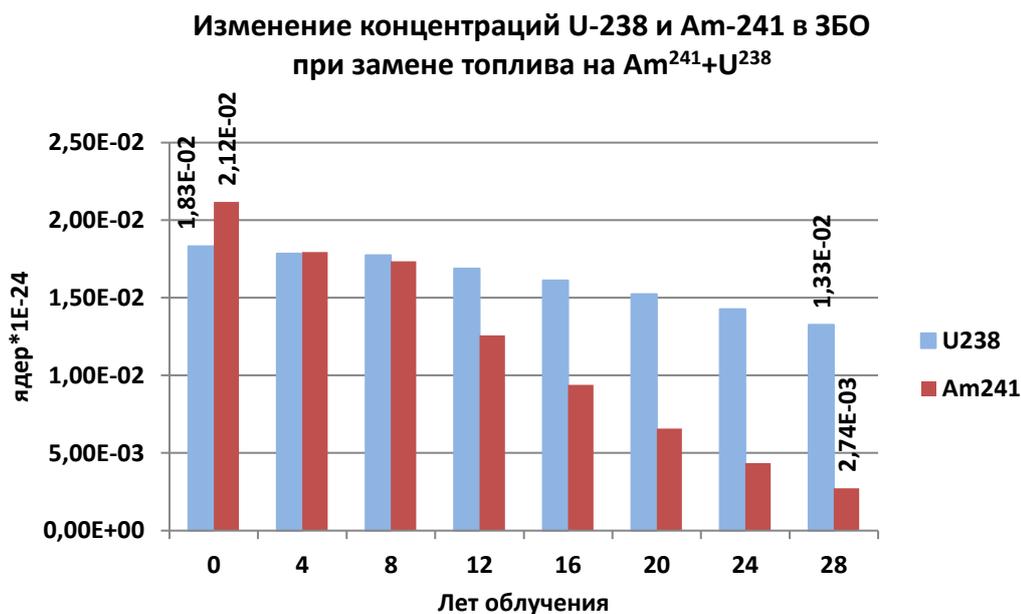


Рис. 1. Изменение концентраций U-238 и Am-241 от времени облучения

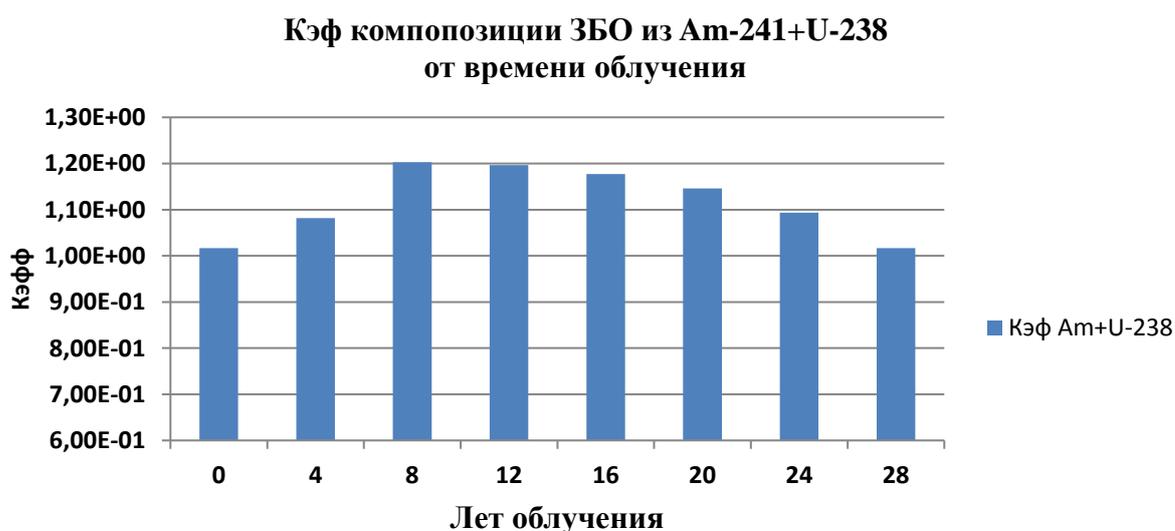


Рис. 2. Изменение Кэф U-238 и Am-241 от времени облучения в системе из U²³⁸ + Am²⁴¹

1.2 Композиция в ЗБО из $\text{Th}^{232} + \text{Am}^{241}$

В данной модели исходное УОХ-топливо замещено смесью Th-232 и Am-241. Торий использовали по двум причинам:

1) в отличие от U-238, торию «далеко» до наработки МА при захвате нейтронов;

2) торий после захвата нейтрона переходит в U-233, который даёт дополнительные нейтроны для трансмутации Am-241.

В таблице 2 приведены результаты изменения нуклидного состава для данной композиции от времени. Выделены нуклиды с наибольшим вкладом в полное распределение.

На рисунке 3 приведены результаты изменения эффективного коэффициента размножения от времени облучения при замене УОХ-топлива на смесь нуклидов Th-232 и Am-241.

Таблица 2. Изменение концентраций нуклидов от времени облучения композиции ЗБО из Th-232 и Am-241

| Изотоп | 0 лет | 4 года | 8 лет | 12 лет | 16 лет | 20 лет | 22 года |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Th227 | | 8,20E-13 | 2,72E-12 | 5,42E-12 | 8,61E-12 | 1,15E-11 | 1,27E-11 |
| Th228 | | 8,15E-09 | 3,70E-08 | 8,75E-08 | 1,55E-07 | 2,23E-07 | 2,51E-07 |
| Th229 | | 2,23E-09 | 7,72E-09 | 1,58E-08 | 2,62E-08 | 3,79E-08 | 4,39E-08 |
| Th230 | | 9,18E-08 | 1,70E-07 | 2,65E-07 | 3,71E-07 | 4,74E-07 | 5,23E-07 |
| Th232 | 1,16E-02 | 1,13E-02 | 1,10E-02 | 1,06E-02 | 1,01E-02 | 9,47E-03 | 9,15E-03 |
| Th233 | | 3,90E-09 | 4,70E-09 | 6,33E-09 | 7,65E-09 | 8,82E-09 | 9,47E-09 |
| Th234 | | 2,46E-12 | 3,68E-12 | 6,95E-12 | 1,08E-11 | 1,54E-11 | 1,85E-11 |
| Pa231 | | 7,53E-06 | 1,21E-05 | 1,58E-05 | 1,76E-05 | 1,72E-05 | 1,62E-05 |
| Pa232 | | 1,86E-09 | 3,71E-09 | 6,77E-09 | 9,67E-09 | 1,17E-08 | 1,23E-08 |
| Pa233 | | 6,79E-06 | 8,17E-06 | 1,10E-05 | 1,33E-05 | 1,53E-05 | 1,64E-05 |
| U232 | | 7,70E-07 | 2,37E-06 | 4,83E-06 | 7,69E-06 | 1,00E-05 | 1,08E-05 |
| U233 | | 2,37E-04 | 4,09E-04 | 5,64E-04 | 6,82E-04 | 7,54E-04 | 7,73E-04 |
| U234 | | 2,49E-05 | 9,20E-05 | 1,84E-04 | 2,85E-04 | 3,76E-04 | 4,13E-04 |
| U235 | | 2,47E-07 | 2,02E-06 | 7,29E-06 | 1,74E-05 | 3,19E-05 | 4,02E-05 |
| U236 | | 2,39E-09 | 3,92E-08 | 2,60E-07 | 1,04E-06 | 2,95E-06 | 4,54E-06 |
| U237 | | 3,90E-13 | 7,85E-12 | 7,28E-11 | 3,71E-10 | 1,30E-09 | 2,22E-09 |
| U238 | | 1,49E-09 | 5,18E-09 | 1,06E-08 | 1,74E-08 | 2,47E-08 | 2,84E-08 |
| U239 | | 4,69E-16 | 2,03E-15 | 5,81E-15 | 1,22E-14 | 2,12E-14 | 2,71E-14 |
| U240 | | 1,31E-20 | 7,36E-20 | 2,92E-19 | 7,94E-19 | 1,73E-18 | 2,45E-18 |
| U241 | | 6,24E-28 | 4,34E-27 | 2,42E-26 | 8,44E-26 | 2,29E-25 | 3,64E-25 |
| Np235 | | 1,20E-11 | 2,66E-11 | 4,65E-11 | 5,23E-11 | 4,47E-11 | 4,40E-11 |
| Np236 | | 5,42E-09 | 1,65E-08 | 3,05E-08 | 4,03E-08 | 4,09E-08 | 3,82E-08 |
| Np237 | | 1,13E-04 | 1,88E-04 | 2,23E-04 | 2,19E-04 | 1,89E-04 | 1,69E-04 |

Продолжение табл. 2

| Изотоп | 0 лет | 4 года | 8 лет | 12 лет | 16 лет | 20 лет | 22 года |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Np238 | | 2,25E-08 | 4,66E-08 | 7,70E-08 | 9,65E-08 | 1,03E-07 | 1,03E-07 |
| Np239 | | 8,15E-12 | 2,71E-11 | 6,11E-11 | 1,08E-10 | 1,58E-10 | 1,82E-10 |
| Pu236 | | 5,78E-10 | 1,51E-09 | 2,77E-09 | 3,61E-09 | 3,58E-09 | 3,58E-09 |
| Pu237 | | 8,35E-09 | 1,68E-08 | 2,69E-08 | 3,39E-08 | 3,31E-08 | 3,10E-08 |
| Pu238 | | 1,47E-03 | 2,56E-03 | 3,34E-03 | 3,70E-03 | 3,60E-03 | 3,39E-03 |
| Pu239 | | 2,25E-05 | 8,48E-05 | 1,88E-04 | 3,13E-04 | 4,23E-04 | 4,62E-04 |
| Pu240 | | 1,29E-06 | 3,40E-06 | 8,98E-06 | 2,14E-05 | 4,31E-05 | 5,75E-05 |
| Pu241 | | 6,44E-08 | 2,06E-07 | 5,17E-07 | 1,20E-06 | 2,55E-06 | 3,61E-06 |
| Pu242 | | 3,70E-04 | 6,48E-04 | 9,08E-04 | 1,11E-03 | 1,21E-03 | 1,23E-03 |
| Pu243 | | 2,02E-09 | 4,38E-09 | 8,63E-09 | 1,35E-08 | 1,84E-08 | 2,08E-08 |
| Pu244 | | 1,52E-10 | 9,84E-10 | 3,77E-09 | 1,07E-08 | 2,38E-08 | 3,33E-08 |
| Am241 | 2,12E-02 | 1,74E-02 | 1,43E-02 | 1,11E-02 | 7,95E-03 | 5,33E-03 | 4,25E-03 |
| Am242 | | 1,26E-06 | 1,29E-06 | 1,39E-06 | 1,27E-06 | 1,05E-06 | 9,29E-07 |
| Am242m | | 1,68E-04 | 2,55E-04 | 2,98E-04 | 2,89E-04 | 2,41E-04 | 2,10E-04 |
| Am243 | | 8,71E-06 | 2,93E-05 | 6,57E-05 | 1,16E-04 | 1,71E-04 | 1,96E-04 |
| Am244 | | 2,30E-11 | 9,60E-11 | 3,00E-10 | 6,77E-10 | 1,23E-09 | 1,57E-09 |
| Am245 | | 1,48E-11 | 6,17E-11 | 1,93E-10 | 4,35E-10 | 7,89E-10 | 1,01E-09 |
| Cm240 | | 2,18E-12 | 2,40E-12 | 4,41E-12 | 3,75E-12 | 2,60E-12 | 2,97E-12 |
| Cm241 | | 3,51E-10 | 3,84E-10 | 5,04E-10 | 5,40E-10 | 4,43E-10 | 3,91E-10 |
| Cm242 | | 2,59E-04 | 2,55E-04 | 2,74E-04 | 2,56E-04 | 2,12E-04 | 1,88E-04 |
| Cm243 | | 5,34E-06 | 8,70E-06 | 1,23E-05 | 1,53E-05 | 1,64E-05 | 1,61E-05 |
| Cm244 | | 3,43E-07 | 2,17E-06 | 7,91E-06 | 2,11E-05 | 4,41E-05 | 5,93E-05 |
| Cm245 | | 5,20E-09 | 6,39E-08 | 3,74E-07 | 1,45E-06 | 4,10E-06 | 6,28E-06 |
| Cm246 | | 4,33E-11 | 1,09E-09 | 1,09E-08 | 6,63E-08 | 2,76E-07 | 5,06E-07 |
| Cm247 | | 2,42E-13 | 1,20E-11 | 1,97E-10 | 1,79E-09 | 1,03E-08 | 2,18E-08 |
| Cm248 | | 1,41E-15 | 1,42E-13 | 3,98E-12 | 5,67E-11 | 4,82E-10 | 1,22E-09 |
| Cm249 | | 8,77E-22 | 1,12E-19 | 4,42E-18 | 8,07E-17 | 8,51E-16 | 2,39E-15 |
| Cm250 | | 6,87E-25 | 1,74E-22 | 1,17E-20 | 3,46E-19 | 5,59E-18 | 1,91E-17 |

Для данной системы с составом $\text{Th}^{232} + \text{Am}^{241}$ вместо UOX так же, как и для смеси $\text{U}^{238} + \text{Am}^{241}$, следует «устойчивость» $K_{эф}$ для длительного облучения с сохранением запаса реактивности на временной интервал. Возрастание $K_{эф}$ для обеих смесей объясняется появлением нуклидов с более высоким сечением деления по сравнению с исходным составом.

На рисунке 4 приведены изменения ядерных плотностей Th-232 и Am-241 от времени облучения. Из результатов следует, что ядерная плотность Am-241 сокращается достаточно эффективно. Темп сокращения Th-232 существенно ниже.

Кэфф композиции ЗБО из Am²⁴¹+Th²³² от времени облучения

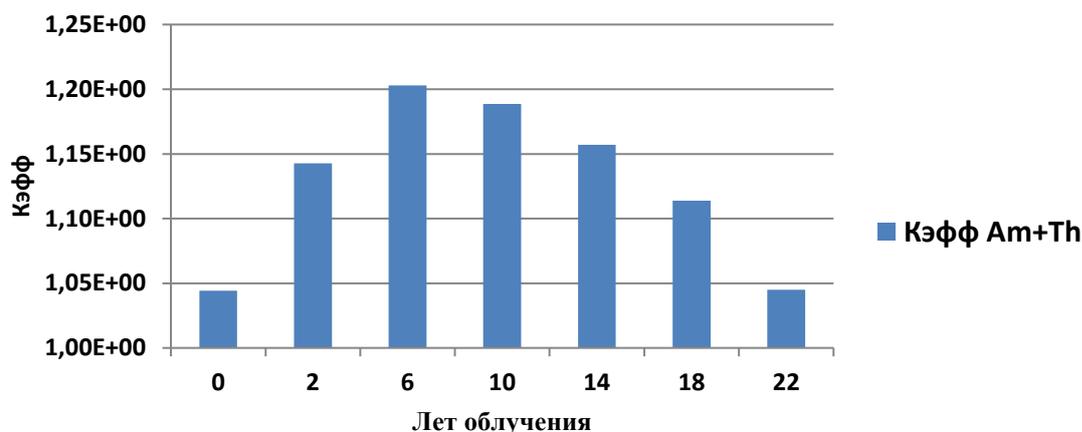


Рис. 3. Изменение $K_{эф}$ для системы ЗБО с $Th^{232} + Am^{241}$ топливом от времени облучения

Изменение концентраций Th-232 и Am-241 в композиции из Th-232 + Am-241

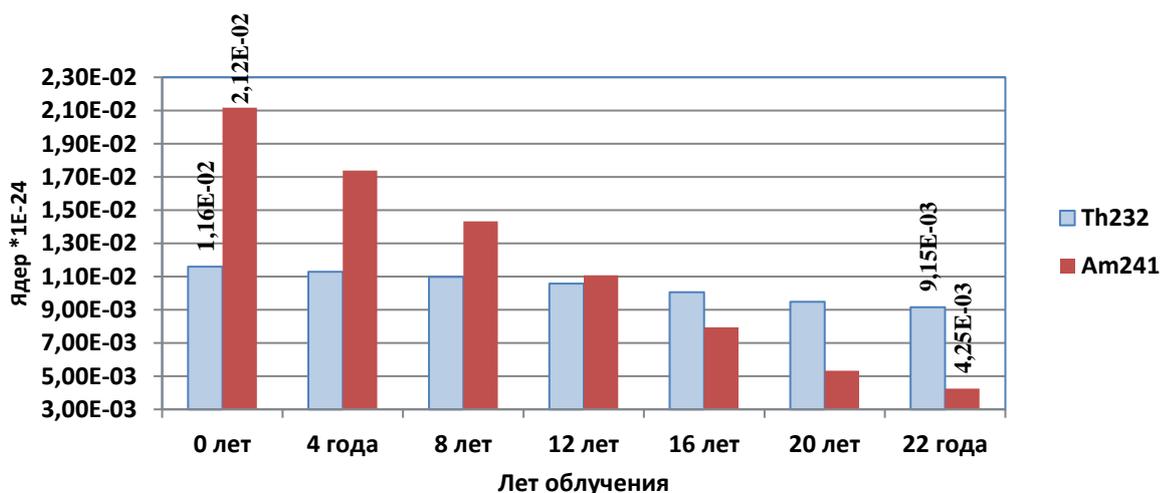


Рис. 4. Изменение концентраций Th-232 и Am-241

1.3 Сравнение от времени облучения изменения концентраций нуклидов с наибольшим вкладом в композициях $U^{238} + Am^{241}$, $Th^{232} + Am^{241}$

На рисунках 5 — 7 приведены изменения ядерных плотностей нуклидов от времени облучения, имеющих наибольшую плотность по сравнению с остальными, содержащихся в таблицах 1 и 2.

Сравнение темпов выгорания Am-241 для разных композиций

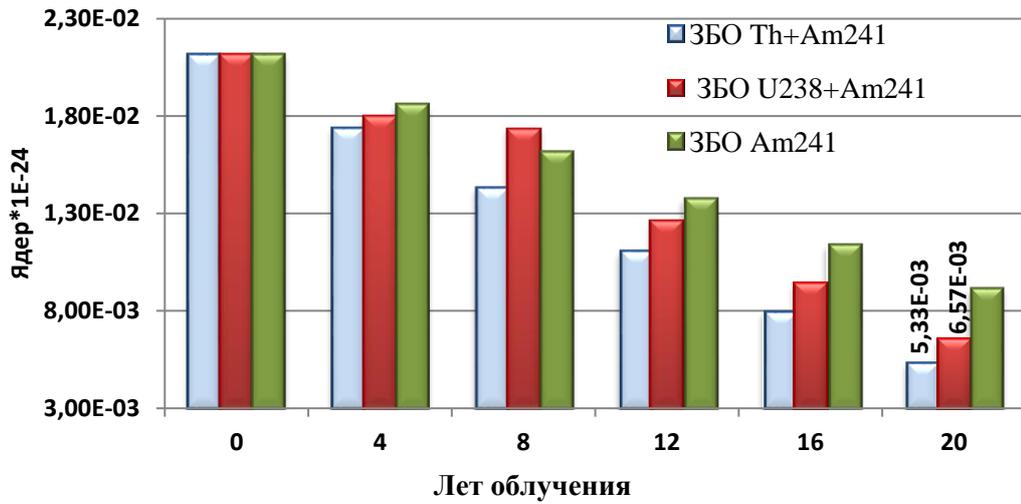


Рис. 5. Сравнение темпов выгорания Am-241 для разных топливных композиций реактора типа БН-600

Из результатов видно, что подмешивание урана или тория увеличивает темп выгорания Am-241 по сравнению с полной загрузкой Am-241 ЗБО реактора типа БН-600. Более существенное влияние на темп выжигания Am-241 проявляется в топливной композиции америция с Th-232. Что, возможно, объясняется более низкой возможностью Th-232 перейти в Am-241 в результате нуклидных превращений по сравнению с U-238.

На рисунке 6 приведены результаты расчёта накопления Pu-238 в зависимости от времени облучения. На рисунке 7 приведены результаты сравнения накопления Cm-242 для двух систем — $U^{238} + Am^{241}$ и $Th^{232} + Am^{241}$.

Изменение концентрации Pu-238

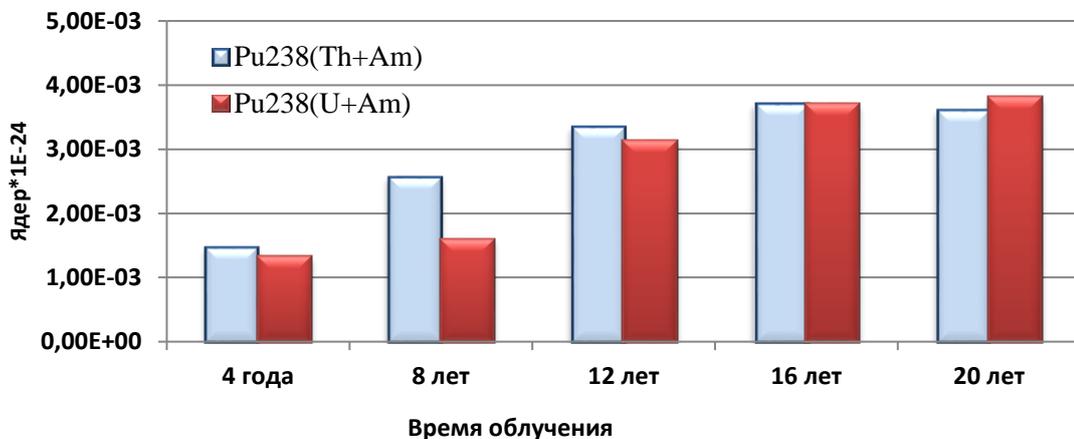


Рис. 6. Изменение ядерной плотности Pu-238 от времени облучения

Из рисунков 6 и 7 следуют довольно близкие результаты для систем с добавлением U-238, либо Th-232 по накоплению Pu-238 и Cm-242.

На рисунке 8 показано накопление U-232. В варианте с добавлением Th-232, U-232 накапливается на четыре порядка больше, чем в варианте с U-238, что достаточно очевидно.

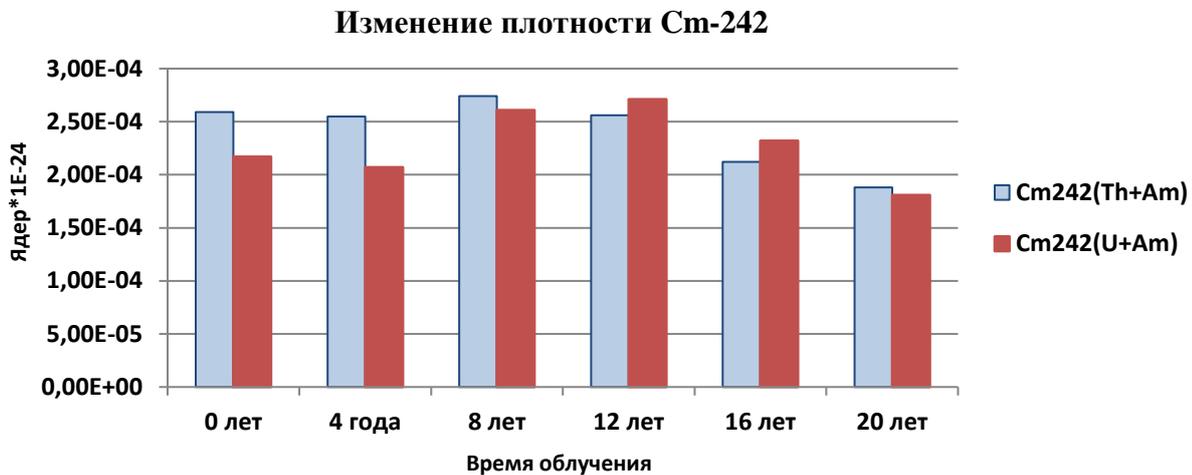


Рис. 7. Изменение ядерной плотности Cm-242 от времени облучения

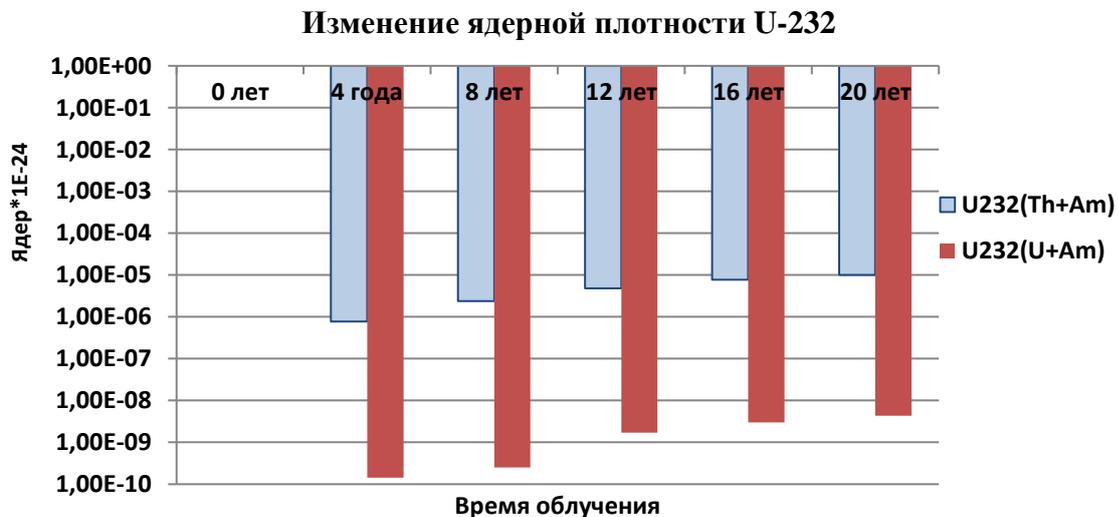


Рис. 8. Изменение ядерной плотности U-232 от времени облучения

2 Сравнение спектральных характеристик разных вариантов выжигания Am-241 в реакторе типа БН-600

На рисунке 9 приведена зависимость от энергии сечений захвата и деления нейтронов. Из рисунка видно, что эффективность деления и захвата нейтронов ядрами Am-241 существенно зависит от энергии нейтрона. В широкой области энергий вероятность захвата нейтронов существенно выше

вероятности деления. И только при энергиях выше примерно 0,8 МэВ сечения деления становятся выше сечения захвата. Таким образом, чем выше средняя энергия нейтронов в спектре реактора, тем выше вероятность деления америция, что является желательным при его выжигании.

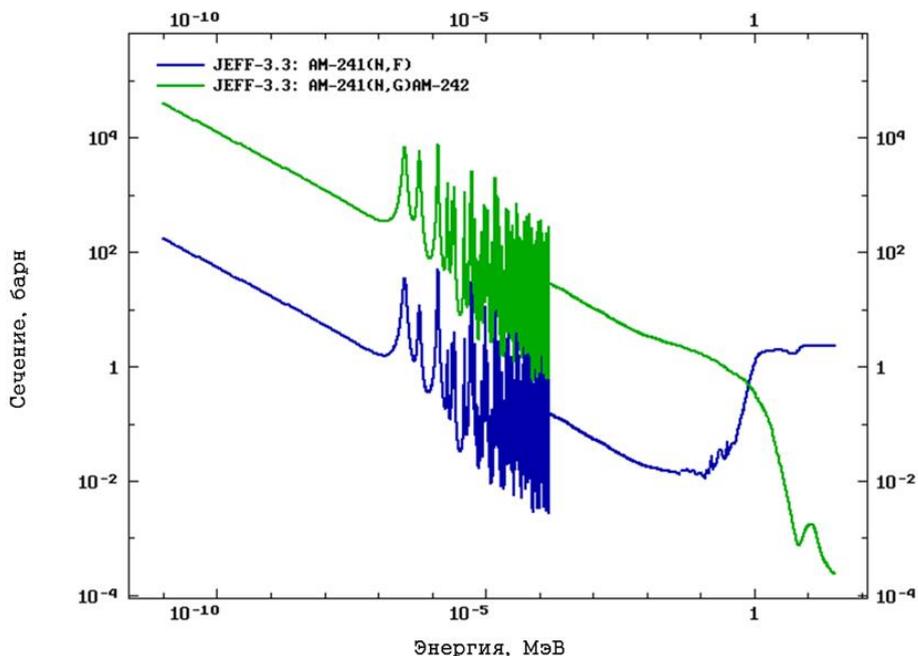


Рис. 9. Зависимость сечения деления и сечения захвата Am-241 от энергии

Кроме того, Am-241 имеет небольшую критическую массу, что позволяет использовать его в качестве топлива в ядерном реакторе. Исследования такой возможности приведены в работах [23], [24], [26].

Привлекательными для выжигания Am-241 в связи с этим являются реакторы на быстрых нейтронах. Для исследований влияния спектральных характеристик на эффективность выжигания Am-241 рассматривались следующие варианты загрузки реактора на быстрых нейтронах типа БН-600:

1. ЗМО1Am — в ЗМО реактора типа БН-600 содержится одна ТВС с Am-241 в центре зоны. Остальные ТВС загружены оксид-урановым топливом (UOX).

2. UOX — полная загрузка оксидом урана зон реактора типа БН-600.

3. ЗМО7Am — в ЗМО реактора типа БН-600 семь ТВС с Am в центре зоны, остальные загружены UOX-топливом.

4. ЗБОAm — ЗБО реактора типа БН-600 полностью загружена Am.

5. ЗМОAm — ЗМО реактора типа БН-600 полностью загружена Am.

6. ЗБОTh — ЗБО реактора типа БН-600 полностью загружена смесью Th+Am.

7. ЗМОTh — ЗМО реактора типа БН-600 полностью загружена смесью Th+Am.

8. ЗБОУ238 — ЗБО реактора типа БН-600 полностью загружена $U^{238} + Am$.

9. ЗМОУ238 — ЗМО реактора типа БН-600 полностью загружена $U^{238} + Am$.

10. ЗБОМА — ЗБО реактора типа БН-600 полностью загружена МА.

11. ЗМОМА — ЗМО реактора типа БН-600 полностью загружена МА.

Рассчитывались следующие средние спектральные характеристики:

E_{av} — средняя по спектру нейтронов энергия;

F_{is} — среднее по спектру нейтронов сечение деления в Am-241;

C_{ap} — среднее по спектру нейтронов сечение захвата в Am-241;

P_{fis} — средняя по спектру нейтронов вероятность деления при поглощении в Am-241;

ALFA — среднее по спектру нейтронов отношение сечения захвата к сечению деления.

На рисунке 10 приведены результаты расчёта спектров систем, содержащих одну или семь ТВС, загруженных Am-241 в металлической форме. Спектры рассчитаны для сборок, содержащих Am-241. Из результатов видно, что спектр семи сборок более «жёсткий», чем для одной.

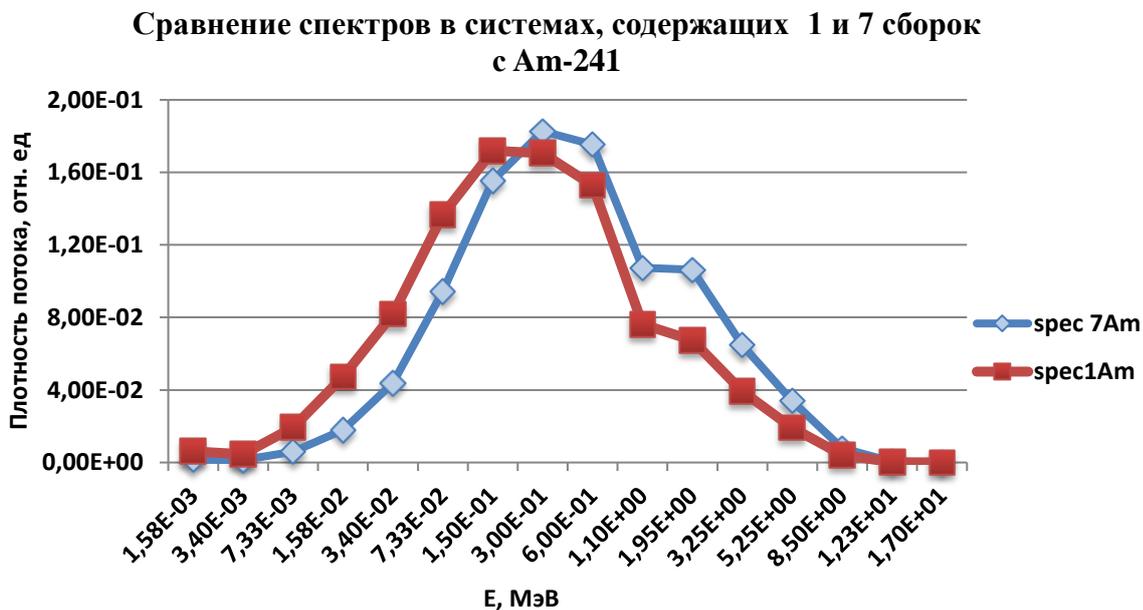


Рис. 10. Сравнение энергетических спектров для одной и семи сборок с Am-241 в ЗМО реактора типа БН-600

На рисунке 11 приведены результаты расчёта спектров систем, содержащих семь ТВС с Am241 и полностью загруженных Am241 зоны ЗМО. Спектры рассчитаны для сборок, содержащих Am-241. Из результатов следует, что при семи ТВС с Am и полной загрузке Am-241 разница в

спектрах невелика. Это важный результат. В системах, содержащей семь сборок с америцием и полностью им загруженных, скорость превращения Am-241 в осколки будет практически одинаковой!

На рисунке 12 приведены средние энергии нейтронов на спектрах одиннадцати описанных выше систем для исследований влияния спектральных характеристик на эффективность выжигания Am-241 с различными вариантами загрузки реактора типа БН-600.

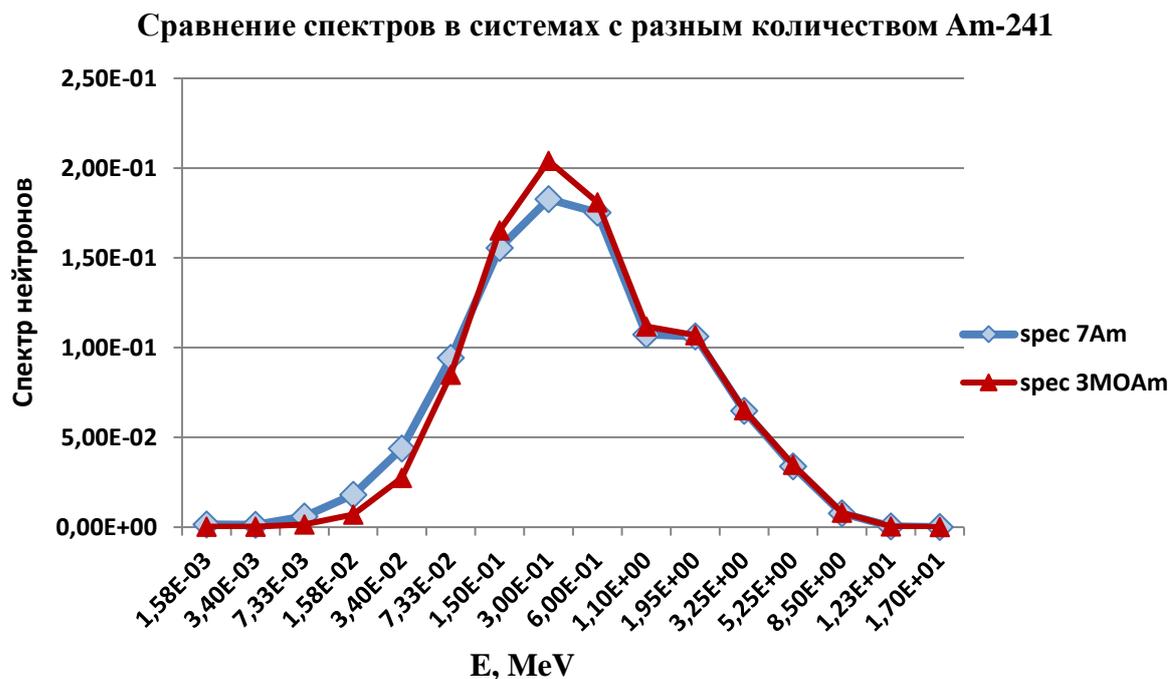


Рис. 11. Сравнение энергетических спектров для ЗМО реактора типа БН-600

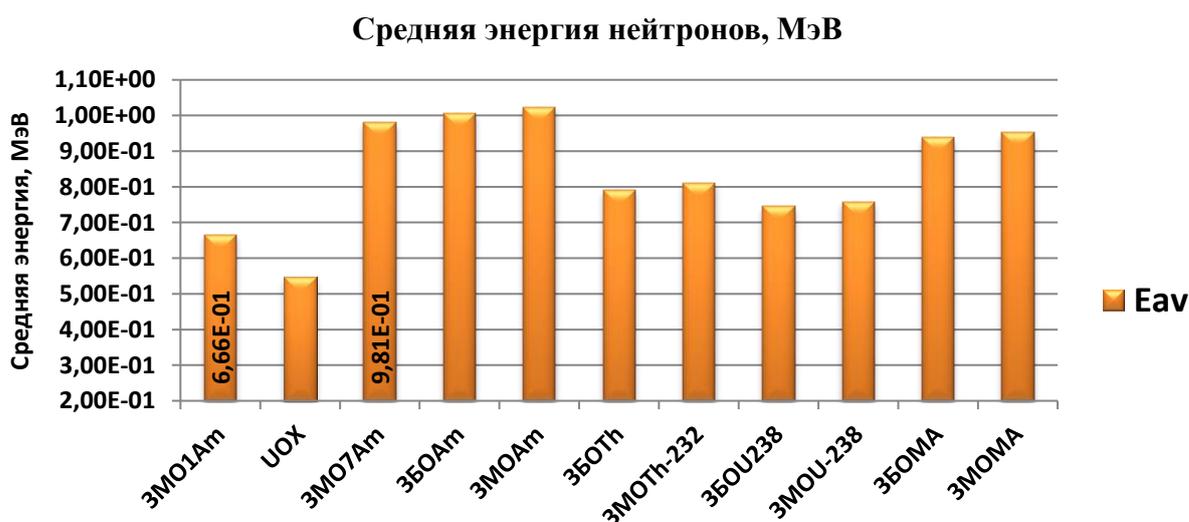


Рис. 12. Средняя по спектру энергия нейтрона при разных условиях облучения

Из результатов следует, что наибольшая средняя энергия оказалась в системах, загруженных Am-241, набором МА из ОЯТ ВВЭР, а также в системах, загруженных смесями $Am^{241} + Th^{232}$ и $Am^{241} + U^{238}$. Практически такую же среднюю энергию имеет система с семью ТВС с Am-241 (ЗМО7Am). Спектр в «семерике» ТВС с Am-241 имеет аналогичную структуру системе с ЗМО, полностью загруженной Am-241 (ЗМОAm) поэтому значения средних энергий в них практически одинаковые. Напомним, что чем выше средняя энергия в спектре, тем больше Am-241 после облучения превратится в осколки. То есть тем успешнее будет выжигание Am-241.

На рисунке 13 приведено среднее на спектре сечение деления америция-241. По виду зависимости на графиках рис. 12 и 13 совпадают, что и понятно из рисунка 9 с зависимостью сечений захвата и деления для Am-241. Чем выше средняя энергия нейтрона при взаимодействии с Am-241, тем выше и сечение деления. Что и обеспечит наиболее эффективное выжигание.

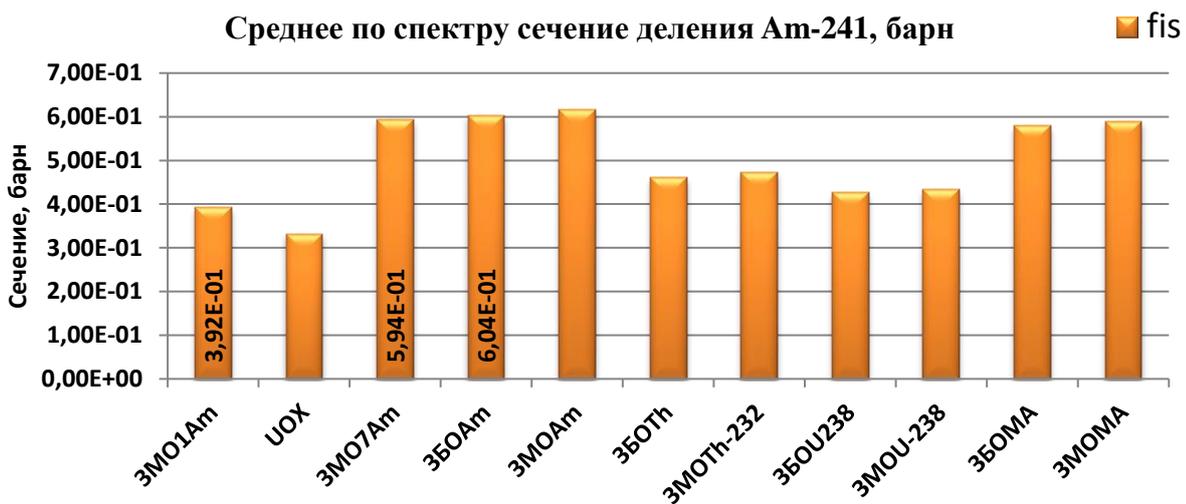


Рис. 13. Среднее по спектру сечение деления Am-241 при разных условиях его облучения

На рисунке 14 приведено среднее на спектре нейтронов сечение поглощения. Здесь более выгодным является низкое сечение захвата нейтронов при взаимодействии с Am-241. По крайней мере это так, если мы рассматриваем реактор на быстрых нейтронах без устройств, специально смягчающих спектр нейтронов.

На рисунке 15 приведено среднее на спектре нейтронов — параметр ALFA. ALFA — хорошо известная величина, равная отношению сечения захвата к сечению деления. Чем значение ALFA ниже, тем больше нейтронов вызывает деление Am-241.

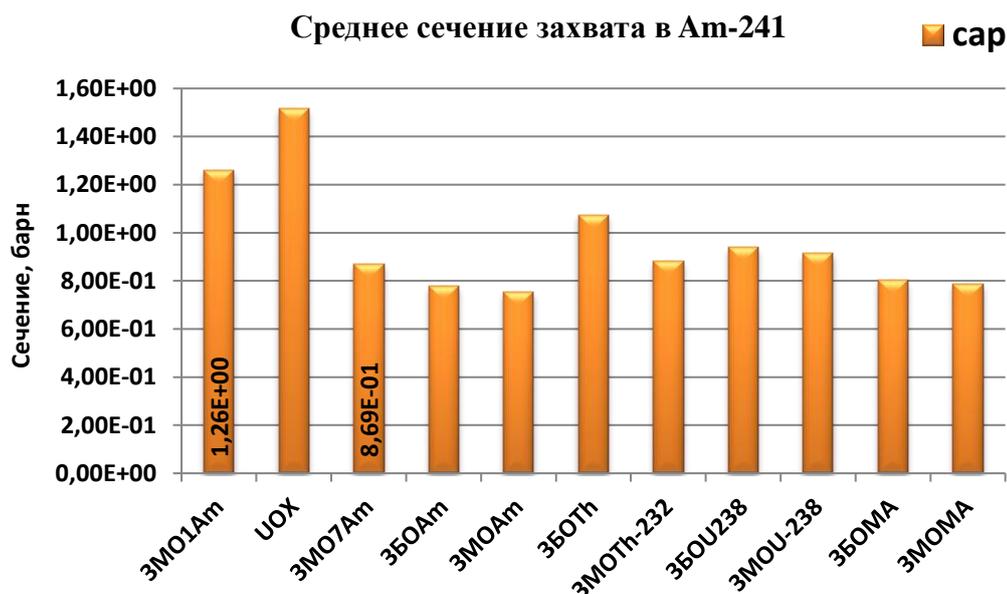


Рис. 14. Среднее по спектру сечение захвата нейтронов при разных условиях облучения в Am-241

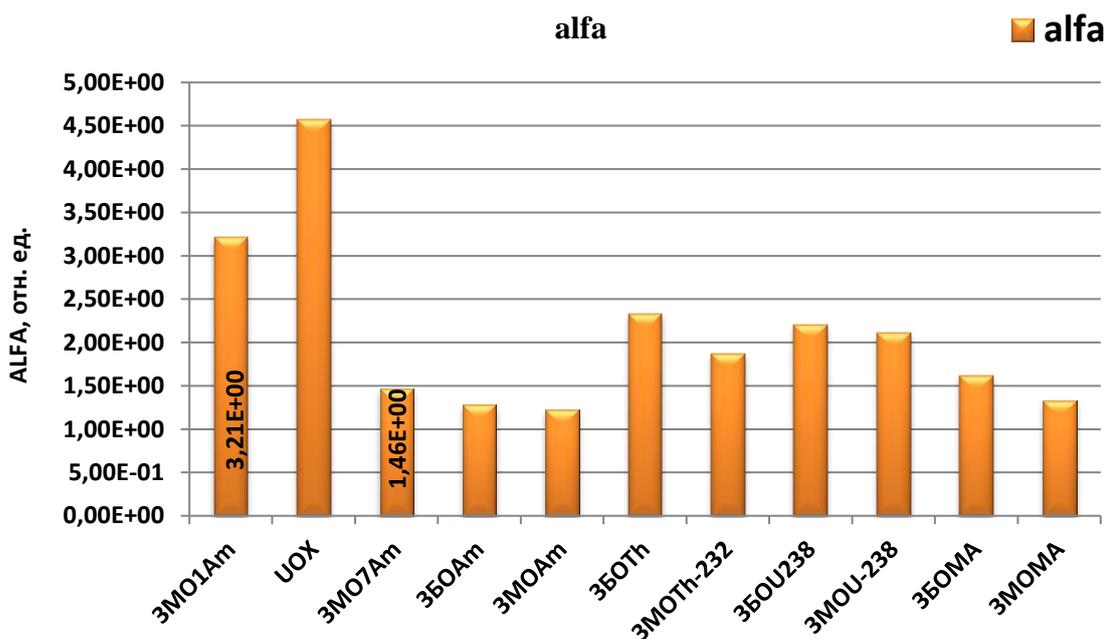


Рис. 15. Среднее по спектру отношение сечения захвата к сечению деления при разных условиях облучения

На рисунке 16 приведена вероятность деления Am-241 (pfis) при поглощении нейтронов. Чем выше эта величина, тем больше америция превратится в осколки, что можно считать «идеальным» вариантом его выжигания.

В таблице 3 собраны численные значения параметров, приведённых на рисунках 12 — 16.



Рис.16. Средняя по спектру вероятность деления Am-241 при разных условиях облучения

Таблица 3. Спектральные средние характеристики при облучении в системах с различными типами загрузки

| Система/зона | Eav | fis | cap | pfis | alfa |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ЗМО1Am | 6,66E-01 | 3,92E-01 | 1,26E+00 | 2,37E-01 | 3,21E+00 |
| ЗМО7Am | 9,81E-01 | 5,94E-01 | 8,69E-01 | 4,06E-01 | 1,46E+00 |
| ЗБОУAm | 1,01E+00 | 6,04E-01 | 7,78E-01 | 4,37E-01 | 1,29E+00 |
| ЗБОУА | 9,39E-01 | 5,80E-01 | 8,03E-01 | 3,82E-01 | 1,62E+00 |
| ЗБОУTh | 7,93E-01 | 4,61E-01 | 1,07E+00 | 3,00E-01 | 2,33E+00 |
| ЗБОУ238 | 7,46E-01 | 4,27E-01 | 9,40E-01 | 3,12E-01 | 2,20E+00 |
| UOX | 5,48E-01 | 3,32E-01 | 1,52E+00 | 1,80E-01 | 4,57E+00 |
| ЗМОАm | 1,02E+00 | 6,16E-01 | 7,54E-01 | 4,50E-01 | 1,22E+00 |
| ЗМОМА | 9,53E-01 | 5,89E-01 | 7,85E-01 | 4,29E-01 | 1,33E+00 |
| ЗМОU-238 | 7,57E-01 | 4,33E-01 | 9,16E-01 | 3,21E-01 | 2,11E+00 |
| ЗМОTh-232 | 8,11E-01 | 4,74E-01 | 8,83E-01 | 3,49E-01 | 1,87E+00 |

Если сравнить распределение средней энергии и средние сечения деления, то поведение этих характеристик аналогичны друг другу. Особенно интересным является тот факт, что для «семерика» и полной загрузки америцием результаты практически эквивалентны. То есть, «семерик» ведёт себя так же, как и вся зона, если её загрузить полностью Am. Другими словами, относительный темп перевода Am-241 подобен варианту полной загрузки зоны реактора америцием-241. Если же америцием загружена одна ТВС, то спектр оказывается подобен UOX-загрузке. Темп перевода в осколки в этом случае Am-241 будет, естественно, ниже.

На рисунке 17 для наглядности приведены сразу все значения рассмотренных выше параметров эффективности выжигания Am-241 на одном графике.



Рис. 17. Полный набор критериев для сравнения разных условий облучения

3 Исследования эффектов гетерогенности при трансмутации Am-241 в реакторе на быстрых нейтронах с уран-ториевым топливом

Исследовались два варианта модели быстрого реактора малой мощности типа РБЕЦ [29] с оксидным топливом с добавлением одинакового количества по массе оксида америция.

В варианте № 1 оксид америция гомогенно примешивался к уран-ториевому топливу активной зоны реактора (U-Th цикл gom).

Вариант № 2 — гетерогенный с разбиением активной зоны на две подзоны: одна с оксидом америция, другая с уран-ториевым оксидным топливом (U-Th цикл get). Активная зона разбивалась на два равных объема, и америций из внешней зоны переносился во внутреннюю, а уран-ториевое топливо наоборот — во внешнюю. По массе урана-235 и тория-232 вариант № 2 совпадал с вариантом № 1.

В таблице 4 приведены средние на спектрах вариантов 1 и 2 характеристики, подобные приведённым в предыдущем разделе. Характеристики гетерогенного варианта размещения обеспечивают лучшее выжигание Am-241 по сравнению с гомогенным размещением Am-241. Эти выводы показаны на рисунке 18 и демонстрируют изменение массы Am-241 в этих двух вариантах его выжигания.

Из результатов видно, что выжигание америция имеет более высокий темп для зоны с гетерогенным размещением америция. Таким образом,

гетерогенное размещение Am-241 позволяет улучшить процесс его выжигания.

Таблица 4. Интегральные по спектру характеристики активных зон реактора малой мощности типа РБЕЦ

| Характеристика | U-Th цикл gom | U-Th цикл get |
|-----------------|---------------|---------------|
| E_{sp} | 3,28E-01 | 3,83E-01 |
| σ_{fis} | 3,64E-01 | 4,43E-01 |
| σ_{capt} | 1,09E+00 | 9,84E-01 |
| α | 2,99E+00 | 2,22E+00 |
| P_{fis} | 2,51E-01 | 3,10E-01 |

Сравнение вариантов с гомогенным и гетерогенным размещением Am-241

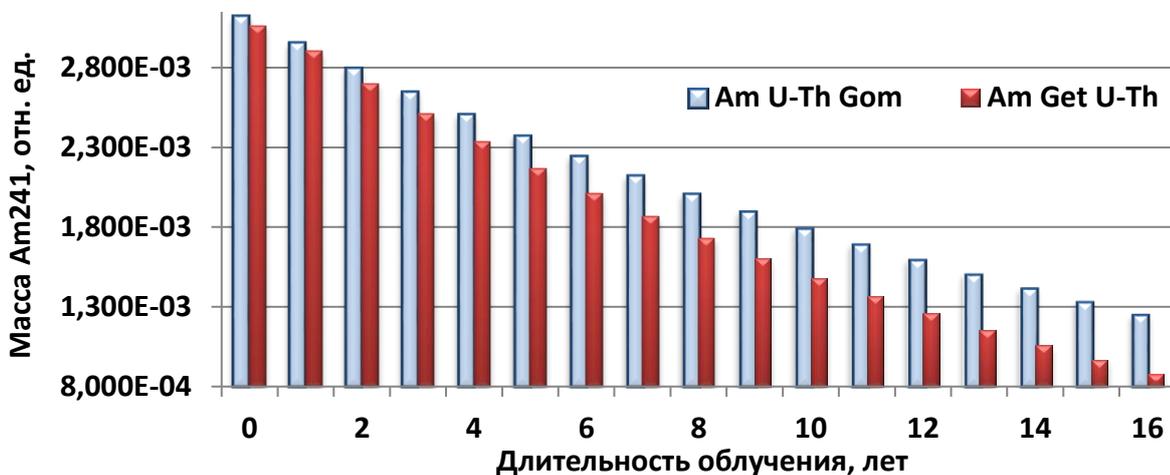


Рис. 18. Изменение массы Am-241 в разных вариантах выжигания и трансмутации

4 Расчётное моделирование выжигания минорных актинидов при разных способах их размещения в реакторе типа БН-600

Проведены исследования по выжиганию минорных актинидов (МА) в реакторе, который вместо традиционных видов ядерного топлива — урана или/и плутония — использует полный набор МА, извлекаемых из ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах. Преимущества реализации такого подхода к трансмутации МА состоят в том, что при таком подходе происходит утилизация долгоживущих отходов и при этом производится энергия, которую можно использовать, например, для производства электричества. Кроме того, если использовать, например, реактор с урановым или МОХ-топливом для трансмутации, то кроме выжигания «чужих» минорных актинидов, он дополнительно наработает «свои». В случае топлива из одних минорных актинидов будут выжигаться только «свои».

На рисунках 19 и 20 приведены результаты зависимости изменения ядерных плотностей нуклидов от времени, вносящих наибольший вклад в состав МА в ЗБО при условии, что в первом случае МА в металлической форме находятся только в ЗБО, в других зонах UOX, а во втором варианте МА во всех зонах.

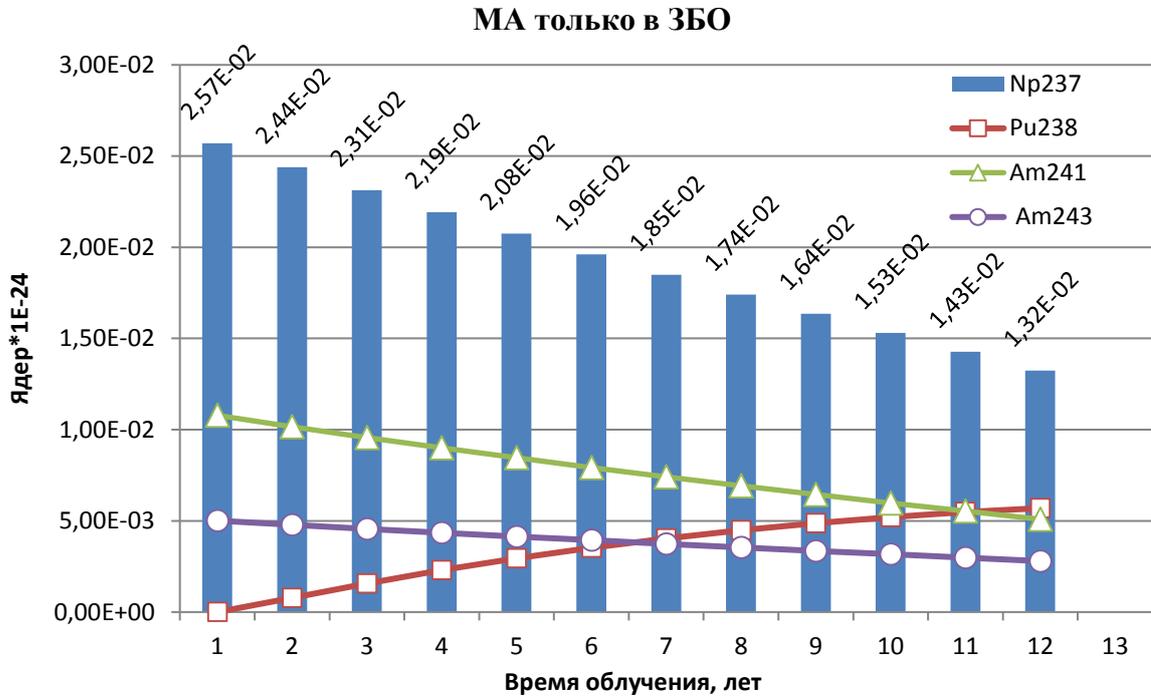


Рис. 19. Изменение ядерных концентраций нуклидов МА в ЗБО при условии их нахождения только в ЗБО

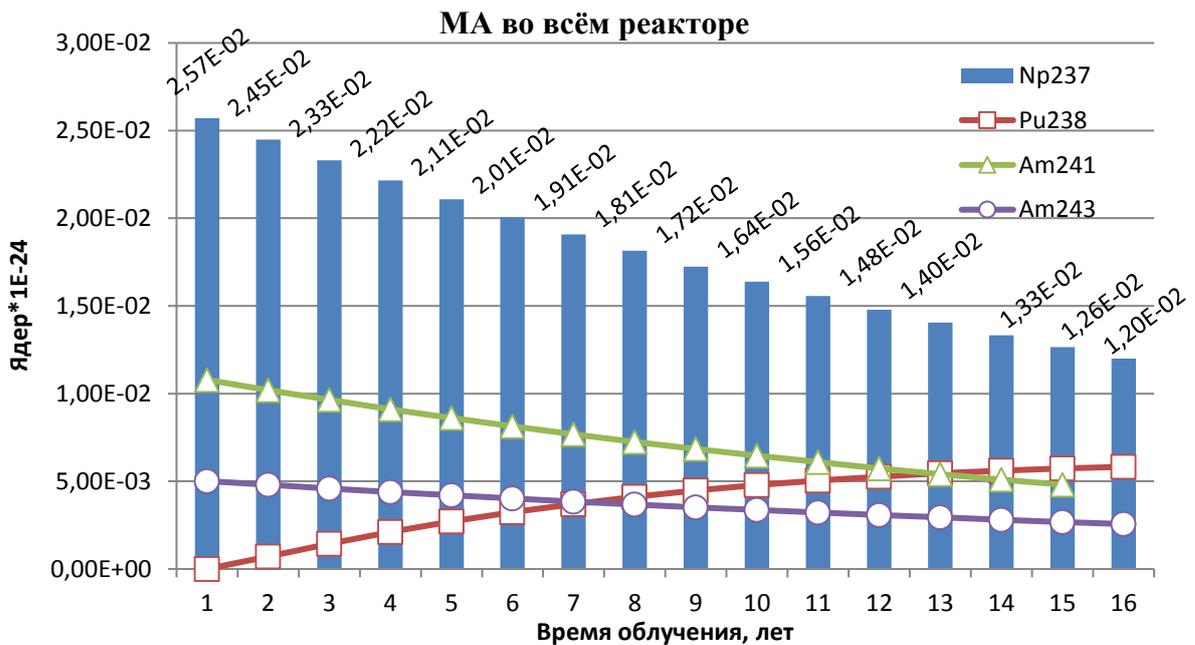


Рис. 20. Изменение ядерных концентраций нуклидов МА в ЗБО при условии их нахождения во всех зонах

Результаты показывают очень близкие значения для обоих вариантов, что, по-видимому, связано с тем, что для обоих случаев на спектр, установившийся в ЗБО, слабо влияет окружение других зон, содержащих разные составы.

5 Исследование эффективности трансмутации Am-241 в быстротепловой системе на основе реактора типа БН-600

На рисунках 21 — 27 приведены энергетические зависимости сечений захвата и деления для ряда нуклидов, влияющих на процесс трансмутации Am-241.

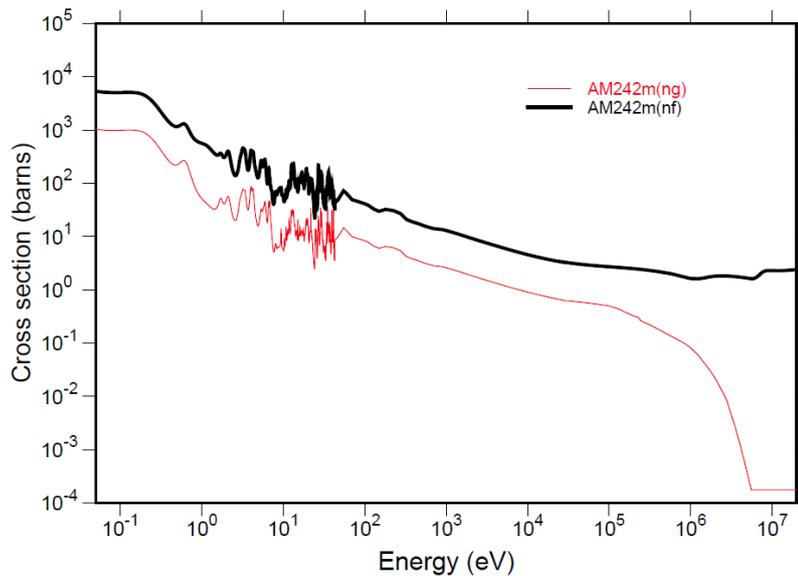


Рис. 21. Зависимость сечения деления (σ_f) и сечения захвата (σ_c) Am-242m от энергии

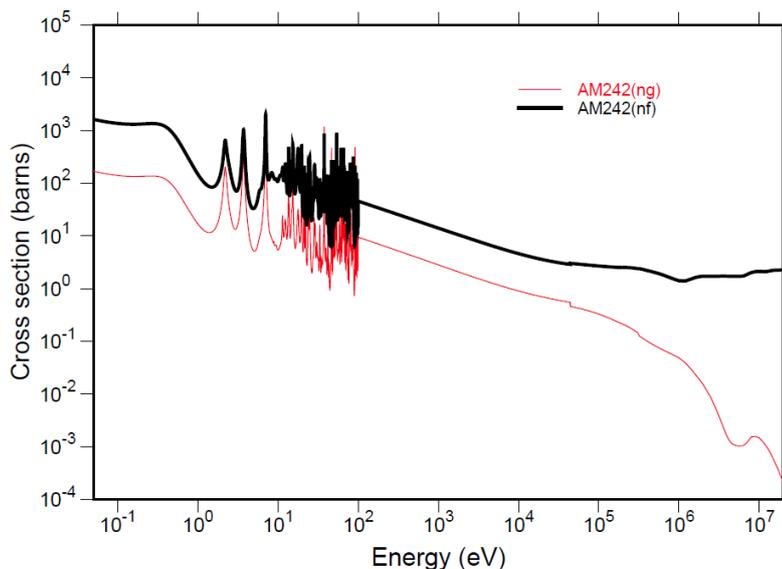


Рис. 22. Зависимость сечения деления (σ_f) и сечения захвата (σ_c) Am-242 от энергии

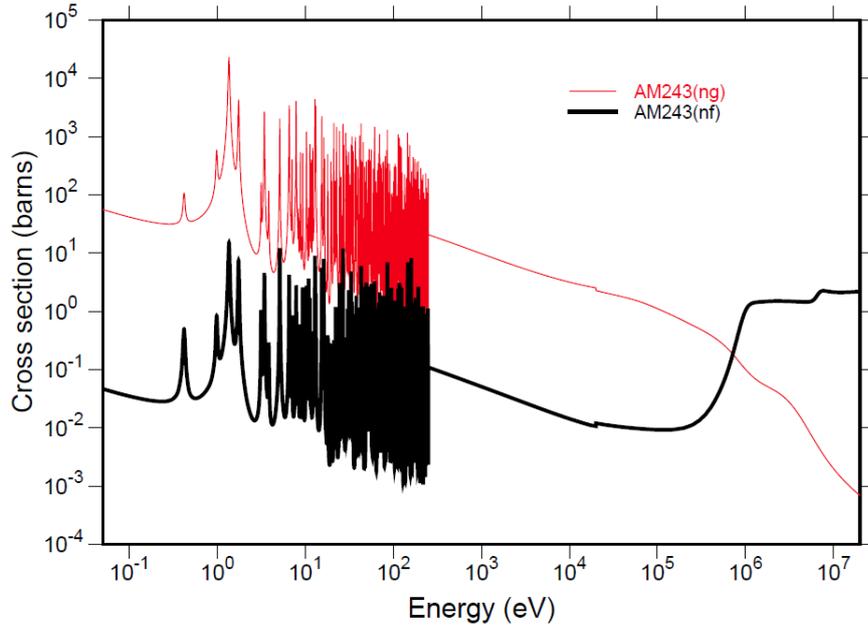


Рис. 23. Зависимость сечения деления (σ_f) и сечения захвата (σ_c) Am-243 от энергии

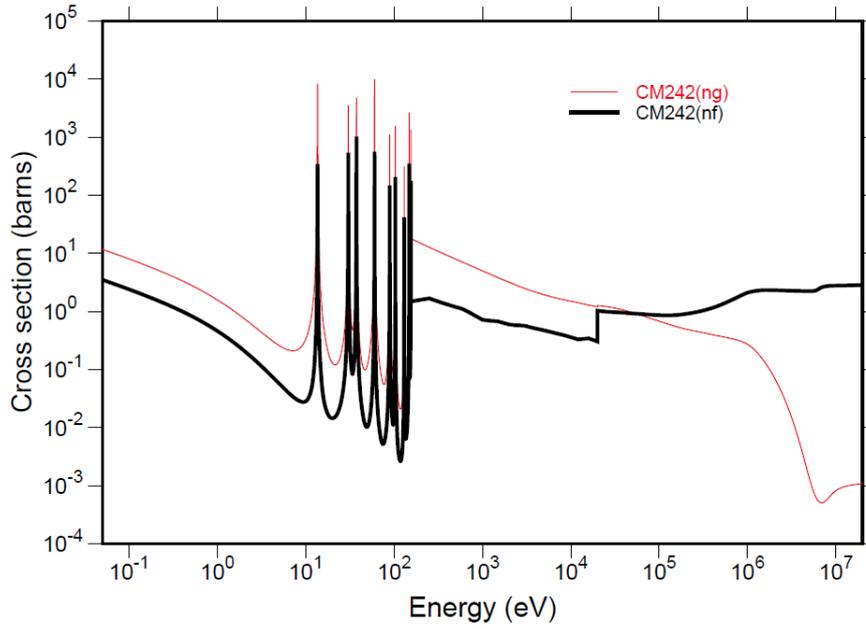


Рис. 24. Зависимость сечения деления (σ_f) и сечения захвата (σ_c) Cm-242 от энергии

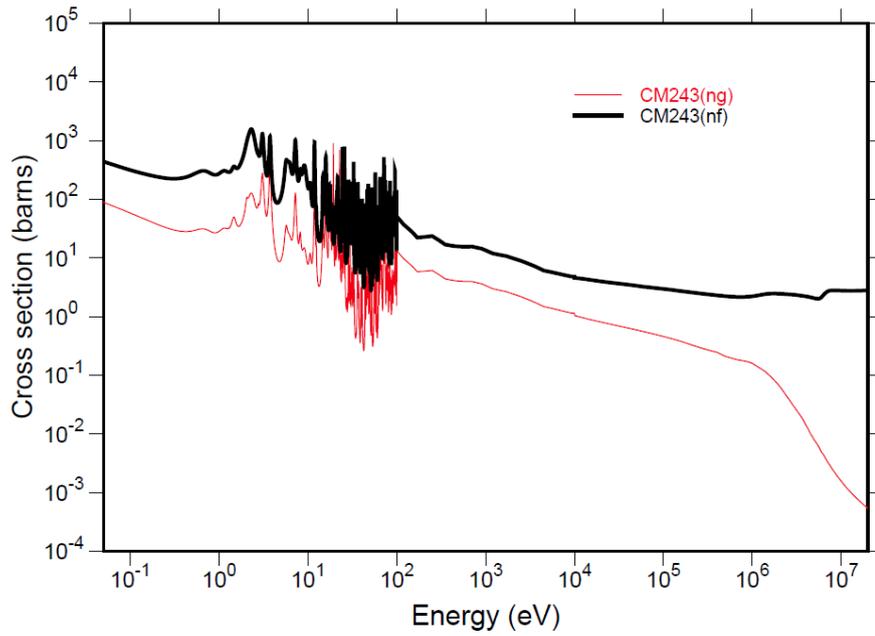


Рис. 25. Зависимость сечения деления (σ_f) и сечения захвата (σ_c) Cm-243 от энергии

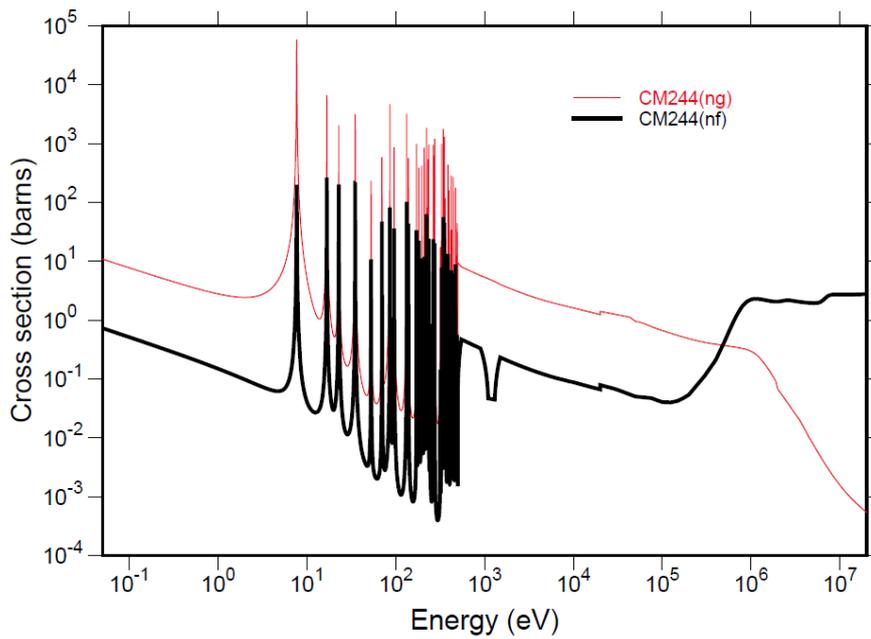


Рис.26. Зависимость сечения деления (σ_f) и сечения захвата (σ_c) Cm-244 от энергии

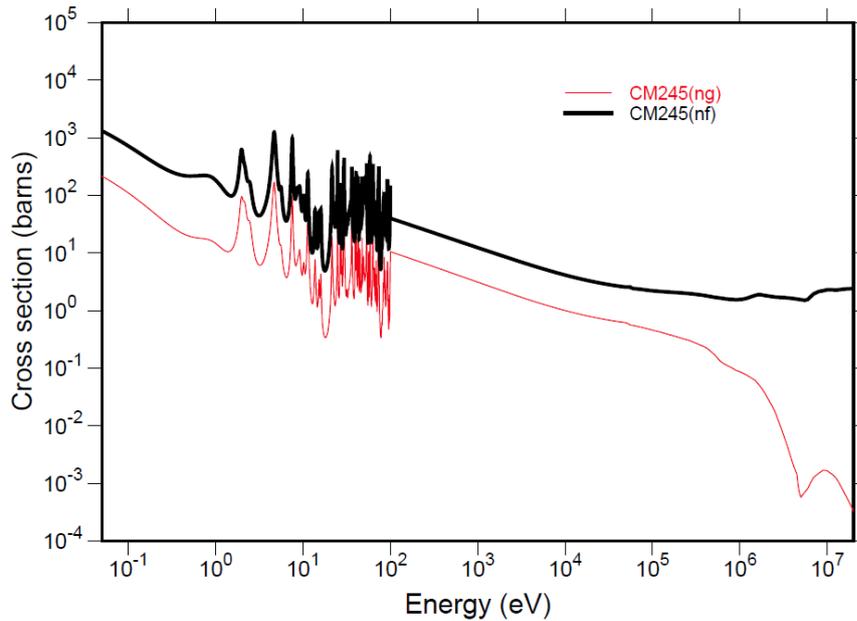


Рис. 27. Зависимость сечения деления (σ_f) и сечения захвата (σ_c) Cm-245 от энергии

Проведем анализ зависимостей сечений захвата и деления от энергии для нуклидов, образующихся при облучении Am-241, приведённых на рисунках 21 — 27 в соответствии со схемой нуклидных переходов. Результаты анализа показывают:

- сечение деления быстрыми нейтронами Am-241 существенно выше сечений захвата. Для других энергий сечения захвата выше сечений деления;
- подобная ситуация и для нуклидов Am-243, Cm-242 и Cm-244;
- для нуклидов Am-242m, Am-242, Cm-243 и Cm-245 сечение деления выше сечения захвата во всей области энергий и растут с уменьшением энергии.

В работе [22] показано, что локальная эффективность выжигания Am-241 в тепловом спектре выше, чем в быстром. Из результатов этой работы видно, что в тепловой области наблюдается образование большого количества тяжелых ядер — продуктов захвата на Am-241 и дочерних нуклидах. Это сопровождается делением ряда образующихся нуклидов, что обуславливает существенный выход продуктов деления в этой области. Это объясняется тем, что Am-241, после поглощения нейтрона, переходит в Am-242m с большим сечением деления в тепловом спектре нейтронов. Ряд других образующихся нуклидов: Am-242, Am-244, Cm-241, Cm-243, Cm-245, Cm-247 — также имеют достаточно высокие сечения деления в тепловой области. Таким образом, при трансмутации Am-241 в тепловой области не наблюдается значительного (по массе) накопления других МА.

Высокая эффективность трансмутации Am-241 в тепловой области не говорит о неременной предпочтительности использования тепловых реакторов для утилизации МА. Потому что в данном случае перевод америция в продукты деления происходит не напрямую (как в быстром спектре), а путем трансмутации Am-241 в делящиеся нуклиды, что требует наличия большого количества избыточных нейтронов в системе, которых в тепловых реакторах крайне мало.

В данной работе приведены результаты исследования эффективности трансмутации Am-241 в быстротепловых системах. В таком подходе проблема дефицита избыточных нейтронов решается с помощью зон с «быстрым» спектром. Исследуемая конструкция такой системы приведена на рисунке 28.

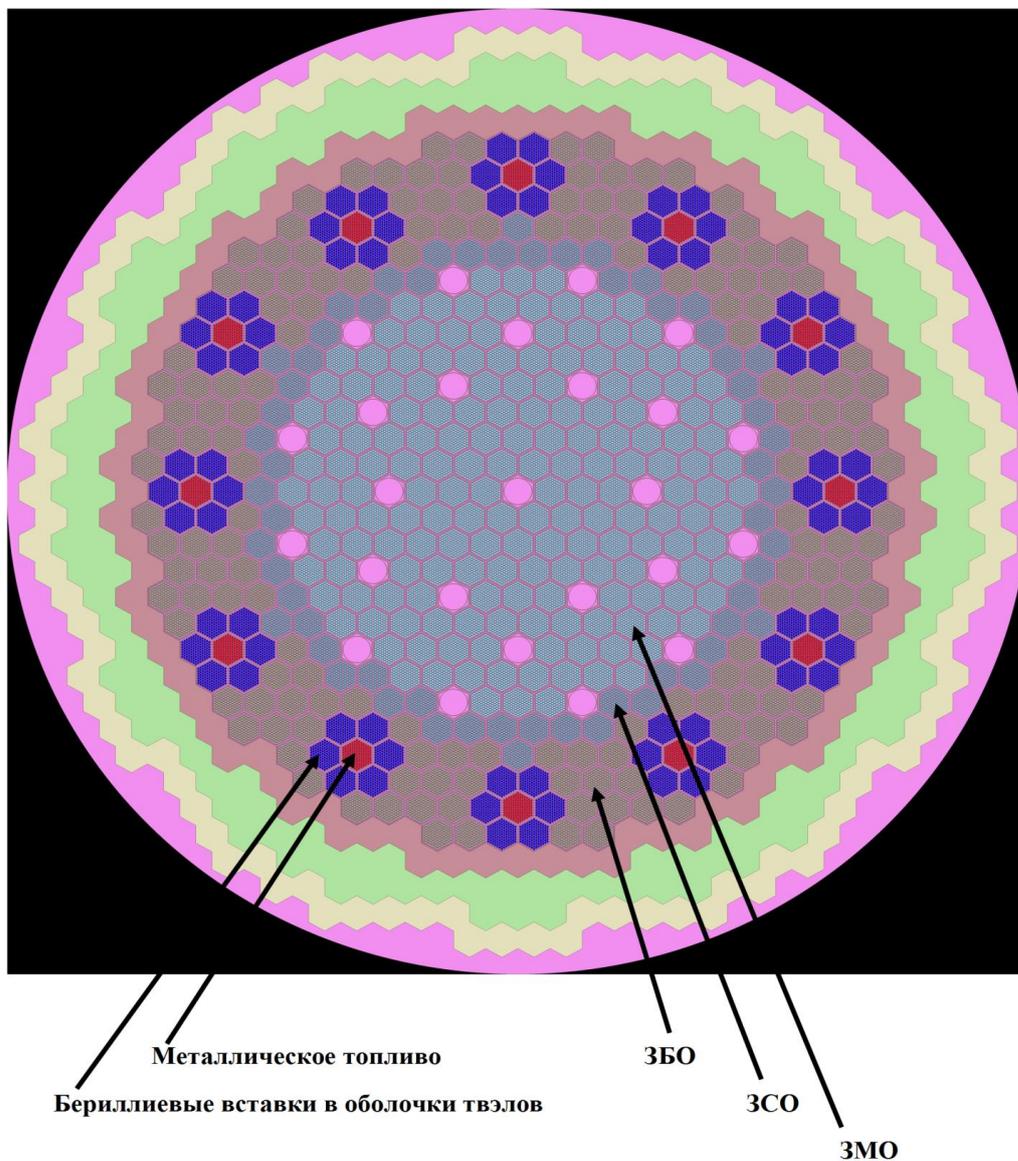


Рис. 28. Модель быстро-тепловой системы на основе реактора типа БН-600

Стандартная активная зона реактора БН-600 состоит из зон малого обогащения (ЗМО), зоны среднего обогащения (ЗСО) и зоны большого обогащения (ЗБО). ЗМО, ЗСО и ЗБО состоят из высокообогащенной двуокиси урана с обогащением соответственно 17%, 21% и 26%. Бланкеты тоже состоят из двуокиси урана, но с обогащением 3%.

В данном реакторе моделировалось выжигание минорных актинидов в быстро-тепловой системе. В ЗМО и ЗСО использовалось топливо в виде UO_2 . Сборки с минорными актинидами использовались только в ЗБО. Для моделирования смягчения спектра в такой системе часть сборок с Am-241 окружалась бериллием. В ЗБО и в ТВС, окруженных бериллием, загружались изотопы нептуния, америция и кюрия в металлическом виде. Состав металлического топлива приведен в таблице 5. ЗМО содержало 174 ТВС, ЗСО — 60 ТВС с двуокисью урана. ЗБО содержало 156 ТВС. Из них с минорными актинидами ТВС, окруженных бериллием, — 12, ТВС с Be — 72. Проводились две серии расчётов. В первой серии рассчитывалась система с минорными актинидами, окруженных бериллием. Вторая серия проводилась для системы, в которой сборки с бериллием заменялись стандартными сборками ЗБО с UO_2 . Ниже в таблицах 6 – 9 приведены изменения составов зон реактора в зависимости от времени облучения и сценария моделирования.

Таблица 5. Состав металлического топлива

| Изотоп | Ядерная концентрация, $\times 10^{24}$ ядер/см ³ | Изотоп | Ядерная концентрация, $\times 10^{24}$ ядер/см ³ |
|---------|--|--------|--|
| Np-237 | 0,025704 | Cm-243 | 1,4587E-05 |
| Am-241 | 0,010786 | Cm-244 | 1,22938E-03 |
| Am-242m | 3,501E-05 | Cm-245 | 8,694E-05 |
| Am-243 | 0,00501 | Cm-246 | 1,576444E-05 |
| Cm-242 | 1,39E-10 | Cm-247 | 3,324163E-07 |

Таблица 6. Изменение концентраций в процессе кампании в ТВС ЗМО

| Изотоп | Дни | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 730 | 1460 | 2190 | 2920 | 3650 | 4380 |
| U235 | 3,23E-03 | 2,80E-03 | 2,15E-03 | 1,67E-03 | 1,31E-03 | 1,03E-03 | 7,97E-04 |
| U238 | 1,58E-02 | 1,55E-02 | 1,49E-02 | 1,45E-02 | 1,40E-02 | 1,36E-02 | 1,31E-02 |
| U232 | 0,00E+00 | 2,43E-13 | 1,47E-12 | 3,10E-12 | 4,59E-12 | 5,97E-12 | 7,21E-12 |
| U233 | 0,00E+00 | 2,57E-10 | 3,96E-10 | 5,58E-10 | 5,39E-10 | 5,42E-10 | 5,10E-10 |
| Th232 | 0,00E+00 | 1,44E-12 | 1,12E-11 | 2,77E-11 | 4,87E-11 | 7,29E-11 | 9,93E-11 |
| Np237 | 0,00E+00 | 2,27E-06 | 1,06E-05 | 2,12E-05 | 3,29E-05 | 4,48E-05 | 5,63E-05 |
| Np238 | 0,00E+00 | 1,65E-09 | 7,22E-09 | 1,41E-08 | 2,20E-08 | 3,06E-08 | 3,94E-08 |

Продолжение табл. 6

| Изотоп | Дни | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 730 | 1460 | 2190 | 2920 | 3650 | 4380 |
| Pu238 | 0,00E+00 | 8,59E-08 | 1,03E-06 | 3,19E-06 | 6,62E-06 | 1,13E-05 | 1,71E-05 |
| Pu239 | 0,00E+00 | 2,36E-04 | 5,91E-04 | 8,46E-04 | 1,04E-03 | 1,18E-03 | 1,30E-03 |
| Pu240 | 0,00E+00 | 3,67E-06 | 2,57E-05 | 6,00E-05 | 1,03E-04 | 1,51E-04 | 2,04E-04 |
| Pu241 | 0,00E+00 | 3,64E-08 | 6,53E-07 | 2,29E-06 | 5,03E-06 | 8,87E-06 | 1,38E-05 |
| Pu242 | 0,00E+00 | 2,66E-10 | 1,39E-08 | 8,01E-08 | 2,49E-07 | 5,75E-07 | 1,12E-06 |
| Am241 | 0,00E+00 | 4,59E-10 | 2,46E-08 | 1,43E-07 | 4,30E-07 | 9,51E-07 | 1,75E-06 |
| Am242 | 0,00E+00 | 1,13E-13 | 5,65E-12 | 3,16E-11 | 9,60E-11 | 2,17E-10 | 4,09E-10 |
| Am242m | 0,00E+00 | 7,78E-13 | 1,14E-10 | 1,03E-09 | 4,17E-09 | 1,15E-08 | 2,53E-08 |
| Am243 | 0,00E+00 | 1,52E-12 | 2,29E-10 | 2,13E-09 | 8,93E-09 | 2,64E-08 | 6,23E-08 |
| Am244 | 0,00E+00 | 1,43E-17 | 2,02E-15 | 1,81E-14 | 7,64E-14 | 2,31E-13 | 5,57E-13 |
| Am244m | 0,00E+00 | 9,28E-18 | 1,30E-15 | 1,17E-14 | 4,92E-14 | 1,48E-13 | 3,58E-13 |
| Cm242 | 0,00E+00 | 5,82E-12 | 6,07E-10 | 4,25E-09 | 1,43E-08 | 3,43E-08 | 6,76E-08 |
| Cm243 | 0,00E+00 | 2,74E-14 | 8,27E-12 | 9,25E-11 | 4,23E-10 | 1,27E-09 | 3,00E-09 |
| Cm244 | 0,00E+00 | 2,42E-14 | 1,03E-11 | 1,53E-10 | 8,75E-10 | 3,26E-09 | 9,36E-09 |
| Cm245 | 0,00E+00 | 1,72E-16 | 2,01E-13 | 4,75E-12 | 3,69E-11 | 1,71E-10 | 5,87E-10 |
| Cm246 | 0,00E+00 | 6,79E-19 | 2,26E-15 | 8,73E-14 | 9,44E-13 | 5,63E-12 | 2,38E-11 |
| Cm247 | 0,00E+00 | 2,29E-21 | 2,14E-17 | 1,32E-15 | 1,95E-14 | 1,47E-13 | 7,56E-13 |

Таблица 7. Изменение концентраций в процессе кампании в ТВС ЗСО

| Изотоп | Дни | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 730 | 1460 | 2190 | 2920 | 3650 | 4380 |
| U235 | 3,99E-03 | 3,43E-03 | 2,54E-03 | 1,87E-03 | 1,37E-03 | 9,89E-04 | 7,06E-04 |
| U238 | 1,50E-02 | 1,47E-02 | 1,41E-02 | 1,36E-02 | 1,30E-02 | 1,25E-02 | 1,19E-02 |
| U232 | 0,00E+00 | 3,68E-13 | 1,96E-12 | 3,92E-12 | 6,10E-12 | 8,68E-12 | 1,14E-11 |
| U233 | 0,00E+00 | 3,29E-10 | 8,76E-10 | 1,04E-09 | 1,11E-09 | 1,16E-09 | 1,04E-09 |
| Th232 | 0,00E+00 | 1,67E-12 | 1,35E-11 | 3,36E-11 | 5,93E-11 | 8,88E-11 | 1,20E-10 |
| Np237 | 0,00E+00 | 3,45E-06 | 1,51E-05 | 3,00E-05 | 4,63E-05 | 6,21E-05 | 7,66E-05 |
| Np238 | 0,00E+00 | 2,51E-09 | 1,12E-08 | 2,32E-08 | 3,74E-08 | 5,32E-08 | 6,84E-08 |
| Pu238 | 0,00E+00 | 1,29E-07 | 1,56E-06 | 4,92E-06 | 1,03E-05 | 1,77E-05 | 2,66E-05 |
| Pu239 | 0,00E+00 | 2,16E-04 | 5,58E-04 | 8,04E-04 | 9,81E-04 | 1,11E-03 | 1,19E-03 |
| Pu240 | 0,00E+00 | 3,13E-06 | 2,35E-05 | 5,76E-05 | 1,01E-04 | 1,51E-04 | 2,04E-04 |
| Pu241 | 0,00E+00 | 4,17E-08 | 7,88E-07 | 2,79E-06 | 6,12E-06 | 1,09E-05 | 1,69E-05 |
| Pu242 | 0,00E+00 | 3,10E-10 | 1,85E-08 | 1,13E-07 | 3,60E-07 | 8,50E-07 | 1,67E-06 |
| Am241 | 0,00E+00 | 5,20E-10 | 2,95E-08 | 1,70E-07 | 5,03E-07 | 1,09E-06 | 1,99E-06 |
| Am242 | 0,00E+00 | 1,31E-13 | 7,61E-12 | 4,52E-11 | 1,39E-10 | 3,19E-10 | 6,05E-10 |
| Am242m | 0,00E+00 | 9,07E-13 | 1,48E-10 | 1,39E-09 | 5,64E-09 | 1,55E-08 | 3,35E-08 |
| Am243 | 0,00E+00 | 2,06E-12 | 3,68E-10 | 3,98E-09 | 1,75E-08 | 5,38E-08 | 1,33E-07 |

Продолжение табл. 7

| Изотоп | Дни | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 730 | 1460 | 2190 | 2920 | 3650 | 4380 |
| Am244 | 0,00E+00 | 2,02E-17 | 3,68E-15 | 4,10E-14 | 1,87E-13 | 6,09E-13 | 1,56E-12 |
| Am244m | 0,00E+00 | 1,31E-17 | 2,37E-15 | 2,64E-14 | 1,20E-13 | 3,92E-13 | 1,00E-12 |
| Cm242 | 0,00E+00 | 6,77E-12 | 8,08E-10 | 5,98E-09 | 2,05E-08 | 5,01E-08 | 9,85E-08 |
| Cm243 | 0,00E+00 | 3,04E-14 | 1,09E-11 | 1,35E-10 | 6,47E-10 | 2,02E-09 | 4,78E-09 |
| Cm244 | 0,00E+00 | 3,39E-14 | 1,78E-11 | 3,18E-10 | 2,02E-09 | 8,08E-09 | 2,41E-08 |
| Cm245 | 0,00E+00 | 2,51E-16 | 3,80E-13 | 1,09E-11 | 9,78E-11 | 4,96E-10 | 1,79E-09 |
| Cm246 | 0,00E+00 | 9,95E-19 | 4,45E-15 | 2,19E-13 | 2,83E-12 | 1,92E-11 | 8,72E-11 |
| Cm247 | 0,00E+00 | 3,29E-21 | 4,22E-17 | 3,48E-15 | 6,33E-14 | 5,58E-13 | 3,12E-12 |

Таблица 8. Изменение концентраций в процессе кампании в ТВС ЗБО

| Изотоп | Дни | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 730 | 1460 | 2190 | 2920 | 3650 | 4380 |
| U235 | 0,00E+00 | 3,28E-08 | 8,63E-07 | 3,64E-06 | 8,91E-06 | 1,66E-05 | 2,61E-05 |
| U238 | 0,00E+00 | 8,87E-11 | 7,37E-10 | 1,87E-09 | 3,32E-09 | 4,98E-09 | 6,75E-09 |
| U232 | 0,00E+00 | 2,97E-11 | 6,40E-10 | 2,11E-09 | 4,06E-09 | 5,84E-09 | 7,20E-09 |
| U233 | 0,00E+00 | 6,73E-09 | 1,91E-08 | 3,12E-08 | 4,41E-08 | 5,76E-08 | 7,01E-08 |
| Th232 | 0,00E+00 | 2,80E-17 | 8,99E-16 | 5,99E-15 | 2,37E-14 | 6,96E-14 | 1,67E-13 |
| Np237 | 2,57E-02 | 2,35E-02 | 1,95E-02 | 1,60E-02 | 1,30E-02 | 1,05E-02 | 8,41E-03 |
| Np238 | 0,00E+00 | 1,00E-05 | 8,95E-06 | 8,01E-06 | 6,97E-06 | 6,06E-06 | 5,17E-06 |
| Pu238 | 0,00E+00 | 1,37E-03 | 3,83E-03 | 5,45E-03 | 6,38E-03 | 6,78E-03 | 6,79E-03 |
| Pu239 | 0,00E+00 | 1,27E-05 | 1,03E-04 | 2,49E-04 | 4,15E-04 | 5,76E-04 | 7,15E-04 |
| Pu240 | 0,00E+00 | 4,82E-05 | 1,46E-04 | 2,43E-04 | 3,35E-04 | 4,21E-04 | 4,99E-04 |
| Pu241 | 0,00E+00 | 5,11E-07 | 3,91E-06 | 9,84E-06 | 1,75E-05 | 2,65E-05 | 3,62E-05 |
| Pu242 | 0,00E+00 | 9,51E-05 | 2,55E-04 | 3,76E-04 | 4,63E-04 | 5,21E-04 | 5,56E-04 |
| Am241 | 1,08E-02 | 9,75E-03 | 7,89E-03 | 6,32E-03 | 5,02E-03 | 3,95E-03 | 3,09E-03 |
| Am242 | 0,00E+00 | 1,50E-06 | 1,30E-06 | 1,13E-06 | 9,58E-07 | 8,10E-07 | 6,69E-07 |
| Am242m | 3,50E-05 | 7,62E-05 | 1,30E-04 | 1,55E-04 | 1,59E-04 | 1,51E-04 | 1,36E-04 |
| Am243 | 5,01E-03 | 4,62E-03 | 3,89E-03 | 3,27E-03 | 2,72E-03 | 2,26E-03 | 1,87E-03 |
| Am244 | 0,00E+00 | 2,62E-08 | 2,37E-08 | 2,17E-08 | 1,93E-08 | 1,72E-08 | 1,51E-08 |
| Am244m | 0,00E+00 | 1,69E-08 | 1,53E-08 | 1,39E-08 | 1,24E-08 | 1,11E-08 | 9,73E-09 |
| Cm242 | 1,39E-10 | 2,38E-04 | 2,61E-04 | 2,29E-04 | 1,96E-04 | 1,65E-04 | 1,37E-04 |
| Cm243 | 1,46E-05 | 1,39E-05 | 1,57E-05 | 1,66E-05 | 1,65E-05 | 1,58E-05 | 1,47E-05 |
| Cm244 | 1,23E-03 | 1,33E-03 | 1,48E-03 | 1,54E-03 | 1,55E-03 | 1,51E-03 | 1,44E-03 |
| Cm245 | 8,69E-05 | 1,08E-04 | 1,52E-04 | 1,92E-04 | 2,26E-04 | 2,52E-04 | 2,69E-04 |
| Cm246 | 1,58E-05 | 1,67E-05 | 1,99E-05 | 2,48E-05 | 3,12E-05 | 3,88E-05 | 4,73E-05 |
| Cm247 | 3,32E-07 | 5,47E-07 | 9,80E-07 | 1,46E-06 | 2,05E-06 | 2,78E-06 | 3,68E-06 |

Таблица 9. Изменение концентраций в процессе кампании в ТВС, окруженных бериллием

| Изотоп | Дни | | | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 730 | 1460 | 2190 | 2920 | 3650 | 4380 |
| U235 | 0,00E+00 | 8,95E-08 | 2,51E-06 | 1,05E-05 | 2,53E-05 | 4,59E-05 | 6,90E-05 |
| U238 | 0,00E+00 | 1,26E-10 | 1,04E-09 | 2,62E-09 | 4,66E-09 | 7,08E-09 | 1,01E-08 |
| U232 | 0,00E+00 | 5,59E-12 | 6,31E-10 | 1,87E-09 | 3,68E-09 | 5,90E-09 | 7,01E-09 |
| U233 | 0,00E+00 | 6,67E-09 | 1,85E-08 | 2,96E-08 | 4,22E-08 | 5,64E-08 | 6,72E-08 |
| Th232 | 0,00E+00 | 3,02E-17 | 1,78E-15 | 1,79E-14 | 8,71E-14 | 2,86E-13 | 7,28E-13 |
| Np237 | 2,57E-02 | 2,33E-02 | 1,88E-02 | 1,47E-02 | 1,12E-02 | 8,26E-03 | 5,94E-03 |
| Np238 | 0,00E+00 | 1,52E-05 | 1,39E-05 | 1,23E-05 | 1,05E-05 | 8,71E-06 | 6,87E-06 |
| Pu238 | 0,00E+00 | 2,06E-03 | 5,83E-03 | 8,33E-03 | 9,61E-03 | 9,90E-03 | 9,47E-03 |
| Pu239 | 0,00E+00 | 2,91E-05 | 2,37E-04 | 5,75E-04 | 9,46E-04 | 1,28E-03 | 1,53E-03 |
| Pu240 | 0,00E+00 | 5,03E-05 | 1,68E-04 | 3,06E-04 | 4,58E-04 | 6,17E-04 | 7,74E-04 |
| Pu241 | 0,00E+00 | 1,45E-06 | 1,09E-05 | 2,74E-05 | 4,95E-05 | 7,61E-05 | 1,06E-04 |
| Pu242 | 0,00E+00 | 1,35E-04 | 3,65E-04 | 5,36E-04 | 6,50E-04 | 7,11E-04 | 7,30E-04 |
| Am241 | 1,08E-02 | 9,65E-03 | 7,55E-03 | 5,72E-03 | 4,20E-03 | 3,00E-03 | 2,08E-03 |
| Am242 | 0,00E+00 | 2,14E-06 | 1,89E-06 | 1,62E-06 | 1,32E-06 | 1,06E-06 | 8,00E-07 |
| Am242m | 3,50E-05 | 9,49E-05 | 1,70E-04 | 1,98E-04 | 1,92E-04 | 1,67E-04 | 1,34E-04 |
| Am243 | 5,01E-03 | 4,55E-03 | 3,70E-03 | 2,94E-03 | 2,30E-03 | 1,76E-03 | 1,34E-03 |
| Am244 | 0,00E+00 | 3,96E-08 | 3,62E-08 | 3,26E-08 | 2,82E-08 | 2,44E-08 | 2,04E-08 |
| Am244m | 0,00E+00 | 2,54E-08 | 2,33E-08 | 2,09E-08 | 1,82E-08 | 1,57E-08 | 1,31E-08 |
| Cm242 | 1,39E-10 | 3,41E-04 | 3,80E-04 | 3,30E-04 | 2,73E-04 | 2,19E-04 | 1,67E-04 |
| Cm243 | 1,46E-05 | 1,70E-05 | 2,81E-05 | 3,43E-05 | 3,58E-05 | 3,37E-05 | 2,96E-05 |
| Cm244 | 1,23E-03 | 1,47E-03 | 1,82E-03 | 2,00E-03 | 2,05E-03 | 1,99E-03 | 1,85E-03 |
| Cm245 | 8,69E-05 | 1,24E-04 | 2,10E-04 | 2,96E-04 | 3,67E-04 | 4,17E-04 | 4,41E-04 |
| Cm246 | 1,58E-05 | 1,77E-05 | 2,48E-05 | 3,72E-05 | 5,45E-05 | 7,59E-05 | 9,90E-05 |
| Cm247 | 3,32E-07 | 7,13E-07 | 1,64E-06 | 2,95E-06 | 4,89E-06 | 7,64E-06 | 1,12E-05 |

Таблица 10. Сравнение концентраций Am в процессе кампании в ТВС

| Изотоп | Дни | | | | | | |
|--------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 730 | 1460 | 2190 | 2920 | 3650 | 4380 |
| | Без бериллия | | | | | | |
| Am241 | 1,08E-02 | 9,75E-03 | 7,89E-03 | 6,32E-03 | 5,02E-03 | 3,95E-03 | 3,09E-03 |
| Am242 | 0,00E+00 | 1,50E-06 | 1,30E-06 | 1,13E-06 | 9,58E-07 | 8,10E-07 | 6,69E-07 |
| Am242m | 3,50E-05 | 7,62E-05 | 1,30E-04 | 1,55E-04 | 1,59E-04 | 1,51E-04 | 1,36E-04 |
| Am243 | 5,01E-03 | 4,62E-03 | 3,89E-03 | 3,27E-03 | 2,72E-03 | 2,26E-03 | 1,87E-03 |
| Am244 | 0,00E+00 | 2,62E-08 | 2,37E-08 | 2,17E-08 | 1,93E-08 | 1,72E-08 | 1,51E-08 |
| Am244m | 0,00E+00 | 1,69E-08 | 1,53E-08 | 1,39E-08 | 1,24E-08 | 1,11E-08 | 9,73E-09 |

Продолжение табл. 10

| Изотоп | Дни | | | | | | |
|--------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0 | 730 | 1460 | 2190 | 2920 | 3650 | 4380 |
| | С бериллием | | | | | | |
| Am241 | 1,08E-02 | 9,65E-03 | 7,55E-03 | 5,72E-03 | 4,20E-03 | 3,00E-03 | 2,08E-03 |
| Am242 | 0,00E+00 | 2,14E-06 | 1,89E-06 | 1,62E-06 | 1,32E-06 | 1,06E-06 | 8,00E-07 |
| Am242m | 3,50E-05 | 9,49E-05 | 1,70E-04 | 1,98E-04 | 1,92E-04 | 1,67E-04 | 1,34E-04 |
| Am243 | 5,01E-03 | 4,55E-03 | 3,70E-03 | 2,94E-03 | 2,30E-03 | 1,76E-03 | 1,34E-03 |
| Am244 | 0,00E+00 | 3,96E-08 | 3,62E-08 | 3,26E-08 | 2,82E-08 | 2,44E-08 | 2,04E-08 |
| Am244m | 0,00E+00 | 2,54E-08 | 2,33E-08 | 2,09E-08 | 1,82E-08 | 1,57E-08 | 1,31E-08 |

Сравнение темпов выгорания Am-241 в сборках, окружённых бериллием и без бериллия, представлено на рисунке 29. Сравнение темпов выгорания Np-237 в сборках, окружённых бериллием и без бериллия, представлена на рисунке 30. На рисунке 31 представлено сравнение темпов накопления Pu-238 в сборках, окружённых бериллием и без бериллия.

Из результатов, приведённых на рисунке 29 видно, что Am-241, окружённый бериллием, выгорает лучше, чем без бериллия.

Сравнение темпов выгорания Am-241

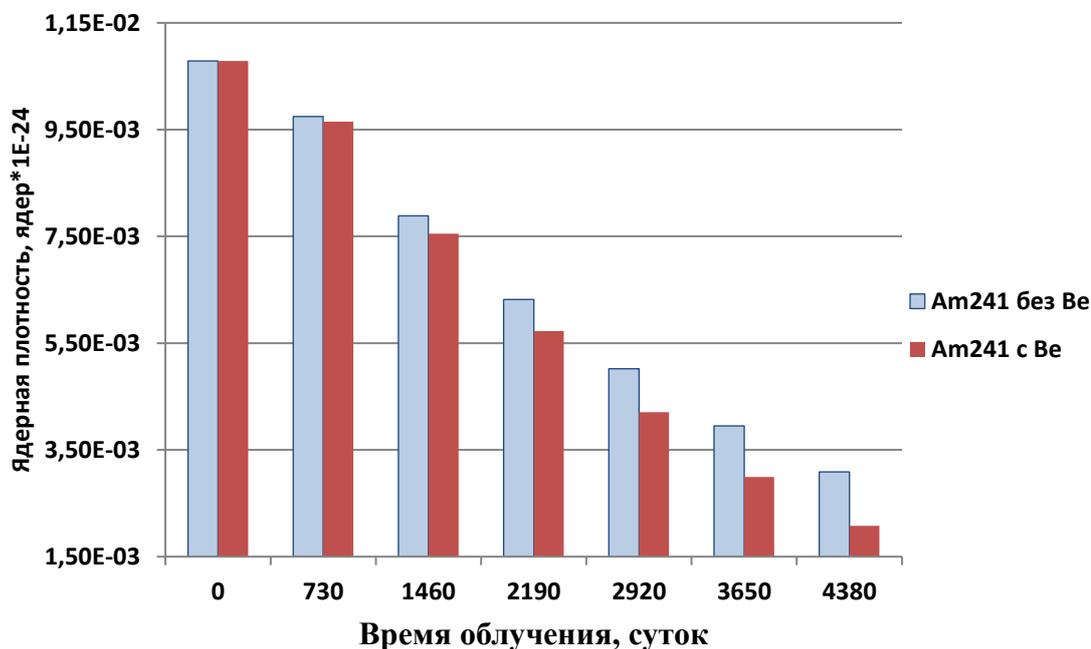


Рис. 29. Сравнение темпов выгорания Am-241 в сборках, окружённых бериллием и без бериллия

Изменение концентрации Np-237 в реакторе типа БН-600

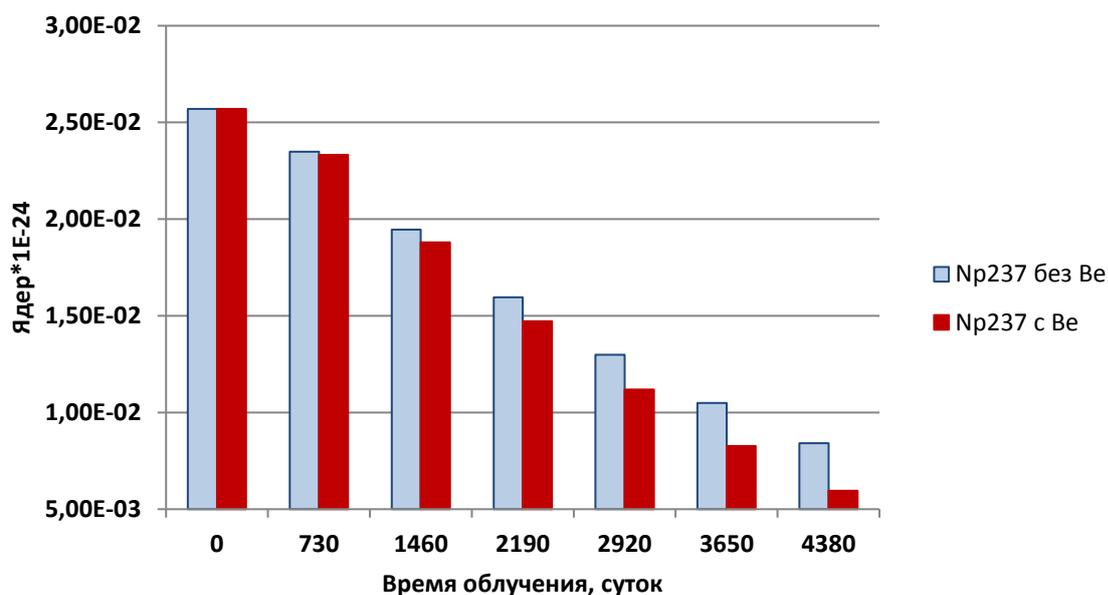


Рис. 30. Сравнение темпов выгорания Np-237 в сборках, окружённых бериллием и без бериллия

Накопление Pu-238 в реакторе типа БН-600

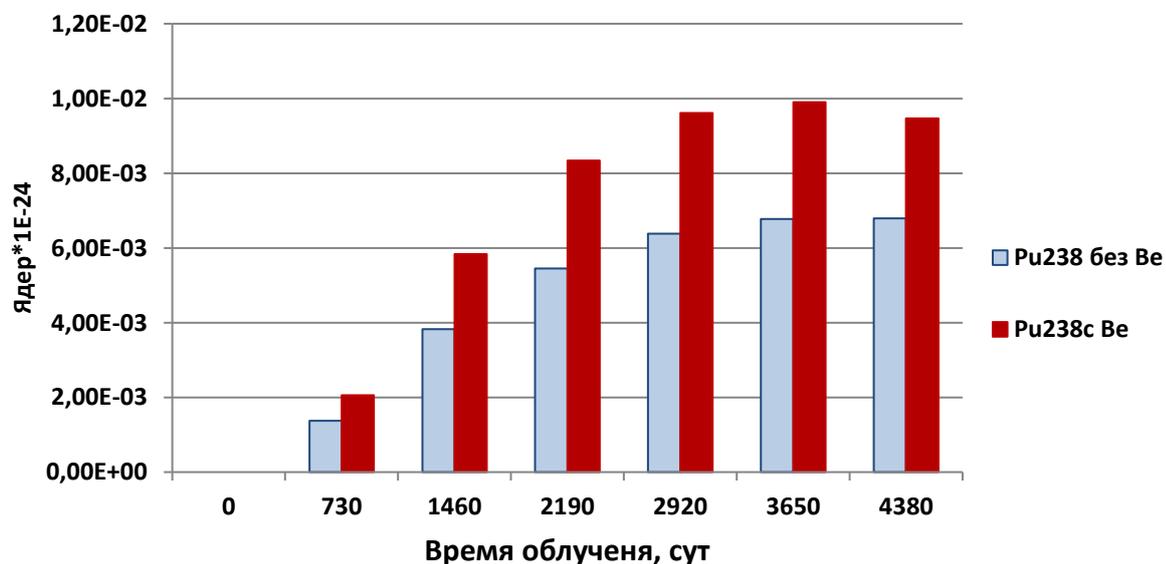


Рис. 31. Сравнение темпов накопления Pu-238 в сборках, окружённых бериллием и без бериллия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены теоретические исследования спектральных и гетерогенных эффектов для повышения эффективности выжигания минорных актинидов в реакторе на быстрых нейтронах типа БН-600. В рамках исследований рассматривались следующие задачи:

1. Исследование композиций активных зон быстрых реакторов с топливом $U^{238} + Am^{241}$ и $Th^{232} + Am^{241}$ для выжигания и трансмутации Am-241.

2. Сравнение спектральных характеристик разных вариантов выжигания Am-241 в реакторе типа БН-600.

3. Исследования эффектов гетерогенности при трансмутации Am-241 в реакторе на быстрых нейтронах с уран-ториевым топливом.

4. Расчётное моделирование выжигания минорных актинидов при разных способах их размещения в реакторе типа БН-600.

5. Исследование эффективности трансмутации Am-241 в быстротепловой системе на основе реактора типа БН-600.

В рамках первой задачи рассматривалось два варианта её решения. В первом варианте урановое оксидное топливо заменялось смесью Am-241 с U-238, а во втором — смесью Am-241 с Th-232. Оба варианта показали высокую «устойчивость» запаса реактивности на длительный временной интервал. Исследования показали, что подмешивание урана или тория увеличивает темп выгорания Am-241 по сравнению с полной загрузкой Am-241 ЗБО реактора типа БН-600. Более существенное влияние на темп выжигания Am-241 проявляется в топливной композиции америция с Th-232. Что объясняется более низкой возможностью Th-232 перейти в Am-241 в результате нуклидных превращений по сравнению с U-238. Накопление Pu-238 в зависимости от времени облучения для обоих вариантов показывает близкие результаты.

Во второй задаче были проведены исследования спектральных характеристик для одиннадцати вариантов размещения Am-241 в активной зоне реактора на быстрых нейтронах типа БН-600 и их влияния на эффективность выжигания Am-241. Наиболее важный результат связан со сравнением спектров систем зоны ЗМО, содержащих семь ТВС с америцием и полностью загруженных Am-241. Из результатов следует, что при семи ТВС с Am-241 и полной загрузке Am-241 разница в спектрах невелика. **Это важный результат. В быстром реакторе типа БН-600, содержащем семь сборок с америцием и полностью загруженным Am-241, скорость превращения Am-241 в осколки будет практически одинаковой!**

Третья задача посвящена исследованию влияния гетерогенного размещения Am-241 на скорость его выжигания по сравнению с гомогенным вариантом. Эти исследования проводились с использованием уран-ториевого топливного цикла в модели реактора малой мощности на быстрых нейтронах. Показано, что выжигание америция имеет более высокий темп для зоны с гетерогенным размещением америция по сравнению с гомогенной зоной. Таким образом, гетерогенное размещение Am-241 позволяет улучшить процесс его выжигания.

В четвёртой задаче исследовалось влияние на темп выжигания набора минорных актинидов в зависимости от состава зон, их окружающих. Рассматривались два варианта зависимости изменения ядерных плотностей нуклидов от времени, вносящих наибольший вклад в состав МА в ЗБО, при условии, что в первом случае МА в металлической форме находятся только в ЗБО, в других зонах — UOX, а во втором варианте МА во всех зонах. Результаты показывают очень близкие значения для обоих вариантов, что, по-видимому, связано с тем, что для обоих случаев на спектр, установившийся в ЗБО, слабо влияет окружение других зон, содержащих разные составы.

Пятая задача посвящена исследованиям эффективности выжигания МА в быстротепловой системе. Данная система моделировалась с использованием реактора на быстрых нейтронах типа БН-600. В таком подходе проблема дефицита избыточных нейтронов решается с помощью зон с «быстрым» спектром. Для смягчения спектра в такой системе часть топливных сборок с Am-241 окружаются бериллием. Сравнение темпов выгорания Am-241 в сборках, окружённых бериллием и без бериллия, показало, что Am-241, окружённый бериллием, выгорает лучше, чем без бериллия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Bergelson B., Gerasimov A., Zaritskaya T., Kiselev G., Volovik A.* DECAy HEAT POWER AND RADIOTOXICITy OF SPENT URANIUM, PLUTONIUM AND THORIUM FUEL AT LONG-TERM STORAGE. Beijing: SMiRT18, 2005, 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology.
2. *Salvatores M., Slessarev I., Uematsu M.* A Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei // Nuclear Science and Engineering. 1994, vol. 116, pp. 1–18.
3. Japan Atomic Energy Agency – Nuclear Data Center. Japanese standard library for fast breeder reactors, thermal reactors, fusion neutronics and shielding calculations, and other applications (JENDL-4.0). JAEA-NDC, 2010. — URL: <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html>. (дата обращения 12.09.2022)
4. OECD NEA. French R&D on the Partitioning and Transmutation of Long-lived Radionuclides: An International Peer Review of the 2005 CEA Report. Papers: OECD Publishing, 2006.
5. Oak Ridge National Laboratory. Preliminary Multicycle Transuranic Actinide Partitioning-Transmutation Studies. 2007. ORNL/TM-2007/24.
6. *Naoyuki Takaki.* Neutronic potential of water cooled reactor with actinide closed fuel cycle // Progress in Nuclear Energy, 2000, vol. 37, pp. 1–4.
7. *Kloosterman, J.L.* Multiple Recycling of Plutonium in Advanced PWRs // Netherlands Energy Research Foundation (ECN), 1998.
8. *Gilles Youinou.* Plutonium Multirecycling in Standard PWRs Loaded with Evolutionary Fuels // Nuclear Science and Engineering: the journal of the American Nuclear Society. — 2005 — V. 151.
9. Atomic Energy of Canada Limited (AECL). Scenarios for the Transmutation of Actinides in CANDU Reactors : Company WIDE. Ontario: AECL, 2010. CW-123700-CONF-010.
10. *Kostadin Zashév.* Transmutation of VVER-1000 Spent Nuclear Fuel in Candu Reactors / София: ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2017.
11. *Prunier C, Boussard F, Koch L, Coquerelle M.* Some Specific Aspects of Homogeneous Americium- and Neptunium- Based Fuels Transmutation through the Outcomes of the SUPERFACT Experiment in Phenix Fast Reactor // Nuclear Technology, 119, 1997, p. 141—147. JRC15648.
12. Guillaumont, R. The Bataille's law: scientific research for nuclear wastes in France. L'Actualité chimique, 2005.
13. *Jean-Marc Bonnerot, et al.* First Results of the Irradiation Program of Inert Matrices, Targets and Fuels for Minor Actinides Transmutation in Fast Reactor. — Montpellier, 2008.

14. *Chichester J. M. et al.* Overview of the FUTURIX-FTA Irradiation Experiment in the Phénix Reactor. Heather. Paris: Global 2015, 2015. P 5268/
15. Idaho National Laboratory. Postirradiation Examination of FUTURIX-FTA metallic alloy experiments. Idaho: INL, 2019. INL/JOU-18-52239-Revision-0.
16. The EBR-II X501 Minor Actinide Burning Experiment. Idaho: INL, 2008. INL/CON-08-13828 PREPRINT.
17. *Tomonori Soga, Takashi Sekine, Kosuke Tanaka, Ryoichi Kitamura, Takafumi Aoyama.* Irradiation Test of Fuel Containing Minor Actinides in the Experimental Fast Reactor Joyo. Journal of Power and Energy Systems, 2008. ISSN: 1881-3062.
18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). Status of Minor Actinide Fuel Development. VIENNA: IAEA, 2009. No. NF-T-4.6.
19. *Погляд С.С.* Реализация проекта ЕОТП и опыт фабрикации топлива с минорными актинидами : Доклад / Отраслевой семинар «Технологии фракционирования и трансмутации минорных актинидов. Достижения и перспективы развития», Москва, 2019.
20. International Atomic Energy Agency (IAEA). Advanced Reactor Technology Options for Utilization and Transmutation of Actinides in Spent Nuclear Fuel. Vienna: IAEA, 2009. IAEA-TECDOC-1626.
21. *Гулевич А.В., Елисеев В.А., Клинов Д.А., Коробейникова Л.В., Крячко М.В., Першуков В.А., Троянов В.М.* Возможность выжигания америция в быстрых реакторах // Атомная энергия. — 2020. — Т.128. — С.82—87.
22. *Косякин Д.А., Коробейников В.В., Стогов В.Ю.* Исследование зависимости эффективности трансмутации Am-241 от энергетической структуры плотности нейтронного потока : Препринт ФЭИ – 3294 / Обнинск, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2021. 32 с.
23. *Коробейников В.В., Колесов В.В., Игнатьев И.А.* Расчётное моделирование выжигания минорных актинидов в реакторе на быстрых нейтронах с топливом без урана и плутония : Препринт ФЭИ – 3299 / Обнинск, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2022. — 38 с.
24. *Коробейников В.В., Колесов В.В., Каражелевская Ю.Е., Терехова А.М.* Исследование возможности выжигания минорных актинидов в быстром реакторе с металлическим топливом на основе только минорных актинидов // Вопросы атомной науки и техники. Серия Ядерные константы. — 2020. — Вып.1. — С. 59—68.
25. *Мосеев А.Л., Декусар В.М., Коробейников В.В., Елисеев В.А.* Исследования потенциала двухкомпонентной системы ЯЭ в разных условиях её развития // Вопросы атомной науки и техники. Серия Ядерные константы. — 2019. — Вып.2. — С.189—205.

26. *Коробейников В.В., Колесов В.В., Каражелевская Ю.Е., Терехова А.М.* Исследования возможности выжигания и трансмутации Am-241 в реакторе с америциевым топливом // Известия вузов. Ядерная энергетика. — 2019. — Вып. 2. — С. 153—163.
27. *Декусар В.М., Зродников А.В., Елисеев В.А., Мосеев А.Л.* К вопросу накопления и реакторной утилизации америция в ядерной энергетике // Вопросы атомной науки и техники. Серия Ядерные константы. — 2019. — Вып.1. — С. 215—222.
28. BN-600 MOX core benchmark analysis results from phases 4 and 6 of a coordinated research project on updated codes and methods to reduce the calculational uncertainties of the lmfr reactivity effects. IAEA-TECDOC-1700. International atomic energy agency Vienna, 2013.
29. *Alekseev P., Vasiliev A., Mikityuk K., Subbotin S., Fomichenko P., Schepetin T.* “Lead-bismuth reactor RBEC: optimization of conceptual decisions”. Preprint IAE-6229/4. — 2001.

Подписано к печати 15.12.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,2. Уч.-изд. л. 1,8.
Тираж 45 экз. Заказ № 266.

Отпечатано в ОПиНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»