

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

**«Исследование фотоядерных реакций для трансмутации  
ядерных отходов»**

Выполнил студент:  
207 группа  
Зиновьев Р.Л.

Научный руководитель:  
доцент, к.ф.-м.н.  
Кузнецов А.А.

Москва

2020

# Содержание

I	Введение	3
II	Модель установки	4
III	Моделирование трансмутации	5
IV	Заключение	11

# Часть I

## Введение

Переработку отработанного ядерного топлива (далее ОЯТ) проводят с целью извлечения из него делящихся радионуклидов (прежде всего урана-233, 235 и плутония-239), очистки урана от нейтронпоглощающих примесей, выделения нептуния и некоторых других трансурановых элементов, получения некоторых изотопов для промышленных, научных или медицинских целей. Под переработкой ядерного топлива мы понимаем как переработку ТВЭЛов энергетических, научных или транспортных реакторов, так и переработку бланкетов реакторов-размножителей.

Переработка (репроцессинг) ОЯТ заключается в извлечении урана, накопленного плутония и фракций осколочных элементов (96 процентов ОЯТ - это  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , около 1 процента - Pu, 2—3 процента - радиоактивные осколки деления). В 1 т ОЯТ на момент извлечения из реактора содержится 950—980 кг  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , 5,5—9,6 кг Pu, а также небольшое количество альфа излучателей (нептуний, америций, кюрий и др.) Разумеется, уже много десятилетий существует вопрос «что же делать с этим ОЯТ?» и есть только несколько вариантов ответа:

1. Хранить на площадках, оставить проблему потомкам. Дешево и даже удобно, но не по-человечески.
2. Переработать. Переработка в данном случае - это по сути концентрация/сортировка радиоактивности ОЯТ по степени вредности, но при этом сами радионуклиды никуда не деваются, при этом сокращаются объемы под захоронение.
3. Захоронение. Изоляция под землей ОЯТ таким образом, чтобы в последующие годы оно там и осталось, никак не попадая в окружающий мир.

Не смотря на очевидность решения 3, до сих пор нигде в мире захоронение ОЯТ на должном уровне не находится. Хранилище может оказаться ненадежным.

Второй момент, тормозящий реализации проектов конечного захоронения — ценность ОЯТ. Потенциально каждая тонна ОЯТ содержит в себе полтора процента делящихся веществ (нечетных изотопов плутония и урана 235), а также порядка килограмма палладия и рутения — драгоценных металлов. На сегодня добыча этих элементов из ОЯТ не окупается. В целом, на сегодня есть две страны, которые реализуют программы окончательного геологического захоронения — это Финляндия и Швеция и несколько стран, которые серьезно инвестируют в изучение конкретных площадок для окончательного захоронения ОЯТ (это США, Южная Корея, Тайвань и в какой-то мере Япо-

ния). В то же время в странах, где серьезно занимаются переработкой ОЯТ (Франция, Россия, Великобритания) присматриваются к геологическому захоронению высокоактивных остатков переработки ОЯТ. Для разделения полезных и бесполезных отходов хотят использовать захват тепловых нейтронов ( $(n,\gamma)$  реакцию).

Также рассматриваются возможности по трансмутации ядерных отходов. Целью настоящей работы будет исследовать возможность использования фотоядерных реакций ( $\gamma,n$ ) для переработки ядерных отходов.

## Часть II

# Модель установки

В основе переработки ОЯТ лежит трансмутация долгоживущих изотопов в короткоживущие и стабильные. Для преобразования долгоживущих изотопов в стабильные или короткоживущие может быть использованы фотоядерные реакции, самая интенсивная из которых ( $\gamma,n$ ) реакция.

Одной из основных трудностей реализации этой реакции, по сравнению с ( $n,\gamma$ ) реакций, является низкое сечение реакции. Учитывая это обстоятельство, была использована следующая конструкция:

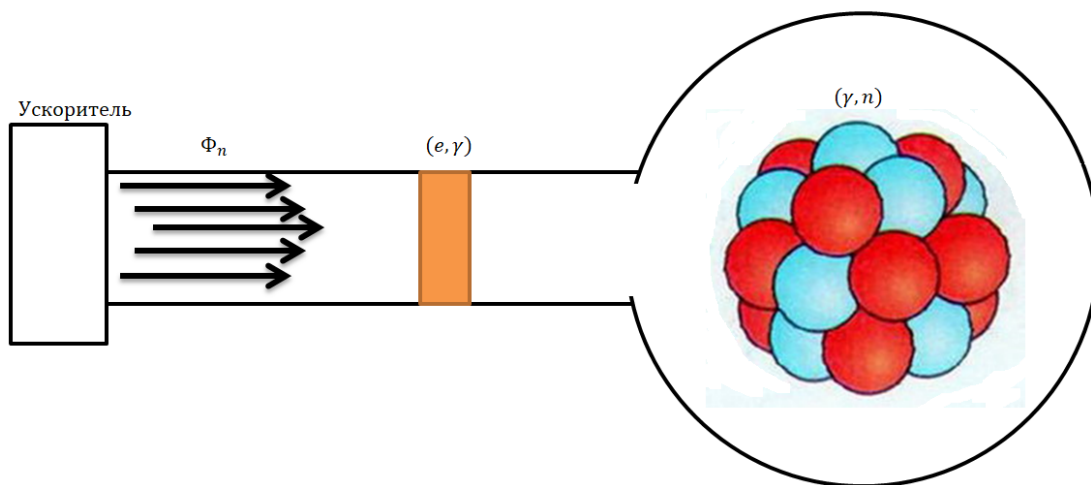


Рис. 1: Теоритическая конструкция

Модель установки состоит из следующих частей:

- 1) Ускоритель электронов с энергией десятки МэВ и высокой мощностью пучка.
- 2) Вольфрам или любой другой тугоплавкий материал, в котором происходит образование тормозного  $\gamma$ -излучения[1]. И в зависимости от толщины конвертера вылетает пропорциональное количество фотонов.
- 3) Мишень. Под действием потока  $\gamma$ -квантов с выкокой энергией происходят фото-ядерные реакции ( $(\gamma, n)$ ).

Зная массовое распределение осколков  $^{235}\text{U}$  под действием тепловых нейтронов (Рис.2), можно вычислить сколько ядер будет после одного года захоронения. Такое хранение необходимо для точного определения количества стабильных или долгоживущих изотопов, т.е. вместо 350 различных изотопов, через год останется примерно 100 изотопов (35 радиоактивных и 65 стабильных). В основном оставшиеся радиоактивные ядра это изотопы с периодом полураспада миллионы лет, остальная часть это ядра которые недораспались за этот год.

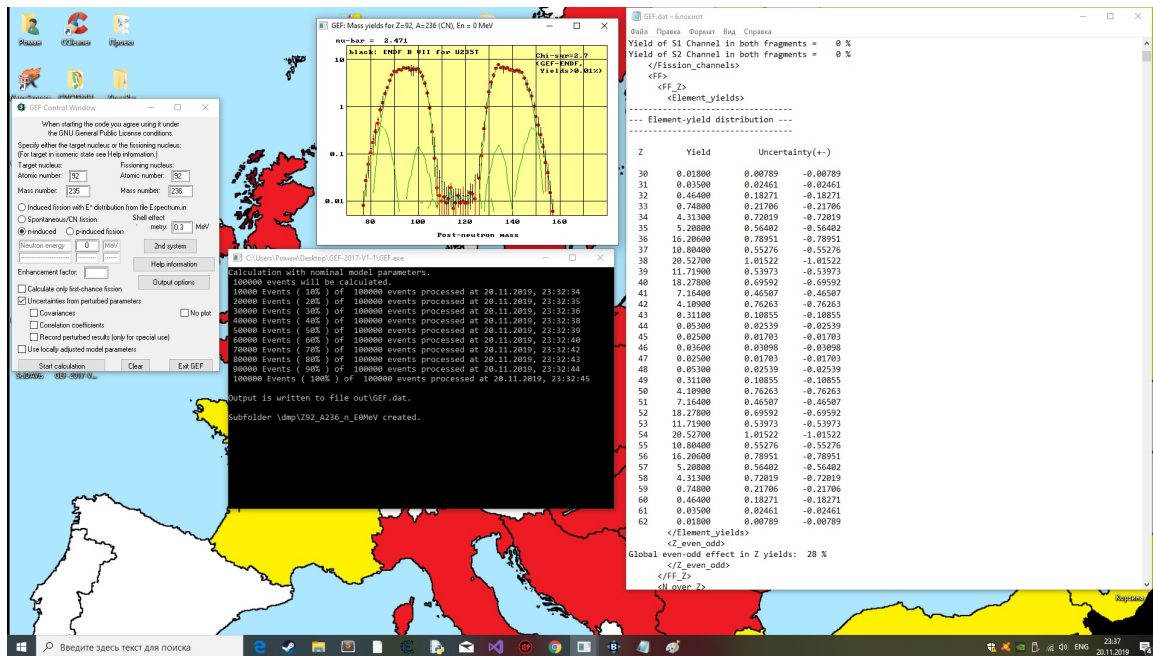


Рис. 2: Массовое распределение осколков  $^{235}\text{U}$  в результате деления под действием тепловых нейтронов[2]

## Часть III

# Моделирование трансмутации

Количество ядер во время облучения меняется согласно уравнению:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 dt + I(t)Y dt$$

где  $N_0$  — число радиоактивных ядер выбранного изотопа в начальный момент времени,  $I(t)$  — ток ускорителя,  $Y = \int_E^{E^m} W(E, E^m)\sigma(E)dE$  — выход конкретного изотопа, рассчитывается как свертка сечения конкретной реакции и тормозного спектра.

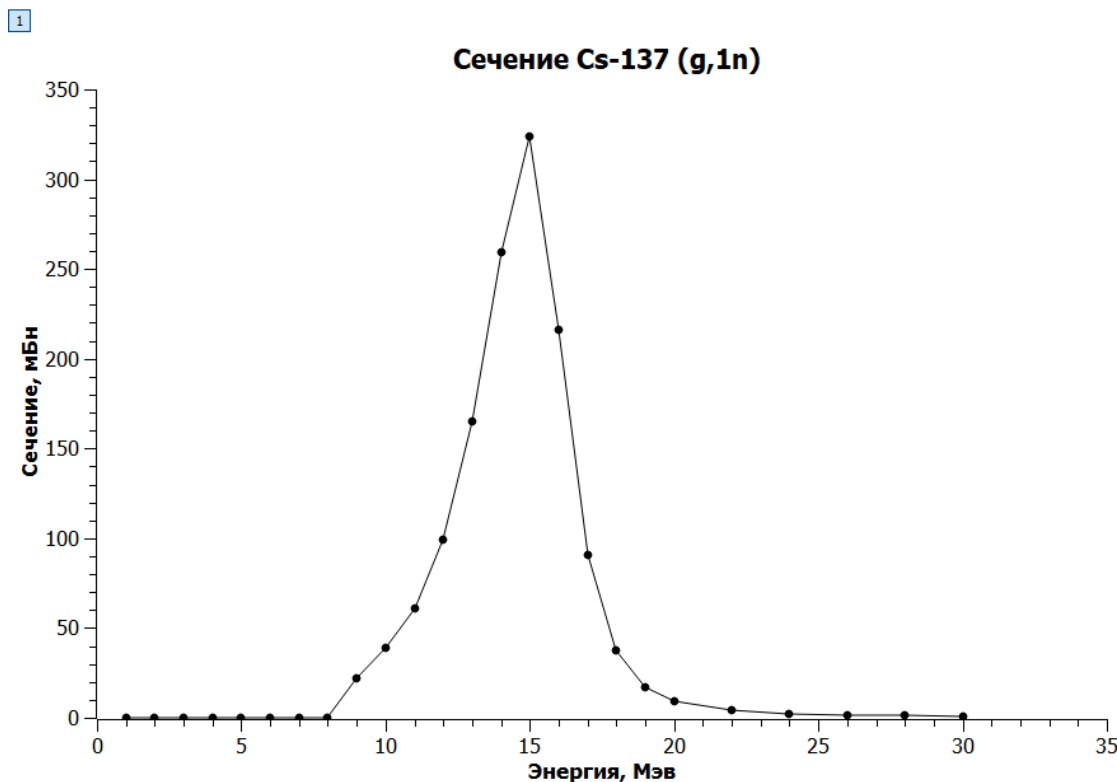


Рис. 3: Сечение реакции  $^{137}\text{Cs}(\gamma, 1n)^{136}\text{Cs}$  из библиотеки TENDL

Для решения дифференциальное уравнение первого рода была написана программа на языке Python 3.6. Программа вычисляет количество распавшихся и количество провзаимодействовавших ядер.

Сечения фотоядерных реакций на изотопах, оставшихся в ОЯТ, взяты из библиотеки сечений TENDL (рис.3). В библиотеке находятся смоделированные с помощью

программы TALYS сечения[3]. Тормозные спектры взяты их рассчитанных на Geant4 спектров для вольфрамовой тормозной мишени, толщиной 0.2 мм (рис.4).

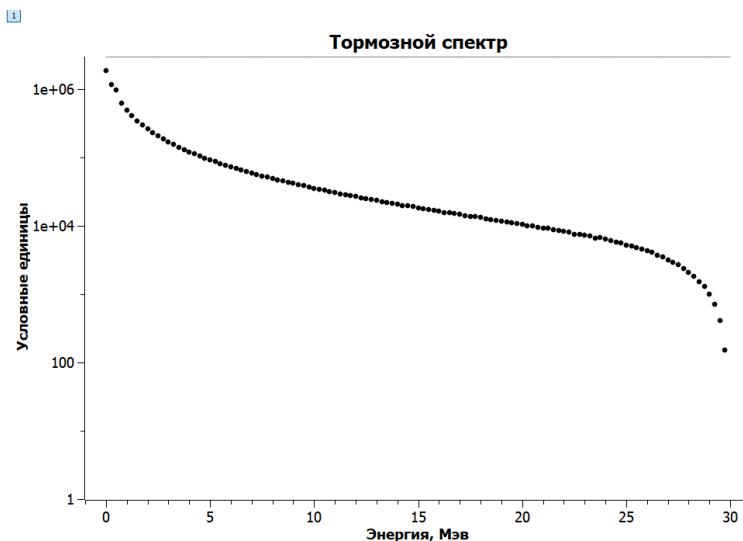


Рис. 4: Спектр тормозных фотонов для энергии электронов 30 Мэв

С помощью дополнительных библиотек MATPLOTLIB и графической библиотеки Tkinter создан интерфейс с выбором параметров ускорителя электронов и времени облучения (Рис. 5). Программа позволяет менять энергию электронов от ускорителя и мощность электронного пучка.

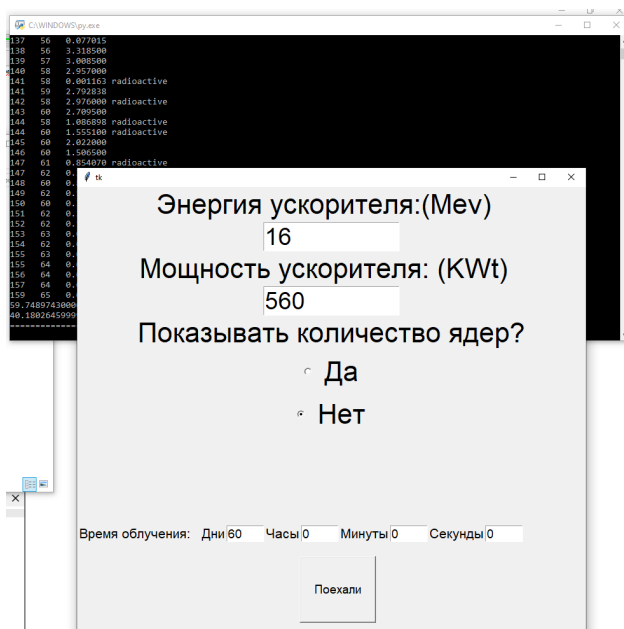


Рис. 5: Интерфейс начальных параметров

После нажатия на кнопку «Старт», программа пересчитывает параметры ускорите-

ля в ток электронов (и выводит на экран). Общее время разбивается на 12 интервалов и через конечное число итераций программа завершает работу. Далее на экране высвечивается «Конец» и окно с выбором изотопа, за изменением количества которого в зависимости от итерации можно пронаблюдать (как показано на рис. 6)

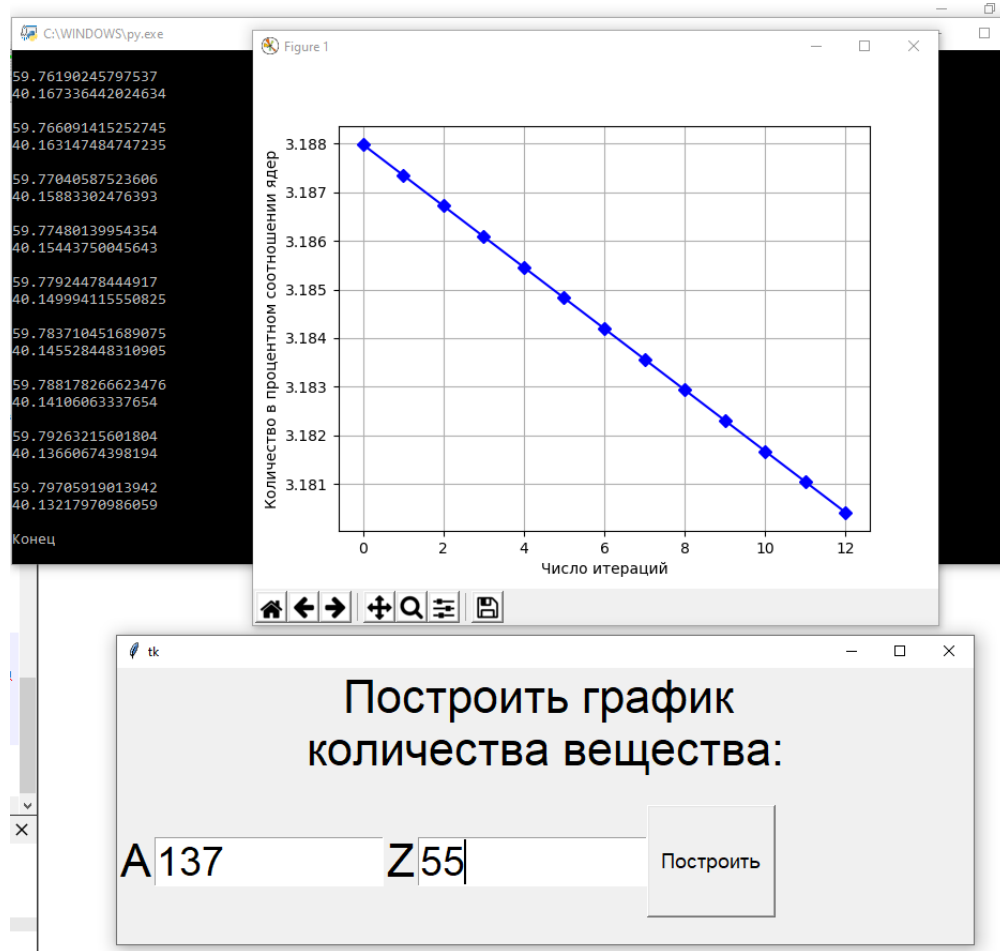


Рис. 6: Пример построения графика для  $^{137}\text{Cs}$ . Для 560 кВт ускорителя, 16 Мев

Если известны параметры Энергии (E) и Мощности (P) средний ток и поток электронов можно найти соответственно:

$$I = \frac{P}{E}$$

Поток электронов:

$$\Phi = \frac{dN}{dt} = \frac{I}{e}$$

Расчеты трансмутации проведем для изотопа  $^{137}\text{Cs}$ , в результате деления 6-8 % от всех осколков это ядра  $^{137}\text{Cs}$ . В результате реакции  $^{137}\text{Cs}(\gamma, 1n)^{136}\text{Cs}$  образуется радиоактивный изотоп  $^{136}\text{Cs}$  с периодом полураспада 13 дней, который в результате  $\beta$ -



распада превращается в стабильный изотоп  $^{136}\text{Ba}$ .

На рис.6. показано как меняется количество радиоактивных ядер  $^{137}\text{Cs}$  при облучении тормозным пучком  $\gamma$ -квантов с максимальной энергией 16 МэВ (энергия максимума сечения) и мощностью пучка 560 кВт.

Далее была выполнена серия расчетов с большей средней мощностью пучка - от 1 до 100 МВт (рис.7). Анализировалось количество радиоактивных ядер  $^{137}\text{Cs}$  и общее количество стабильных изотопов в ОЯТ. В диапазоне от 10 до 100 МВт наблюдается повышение эффективности сжигания цезия.

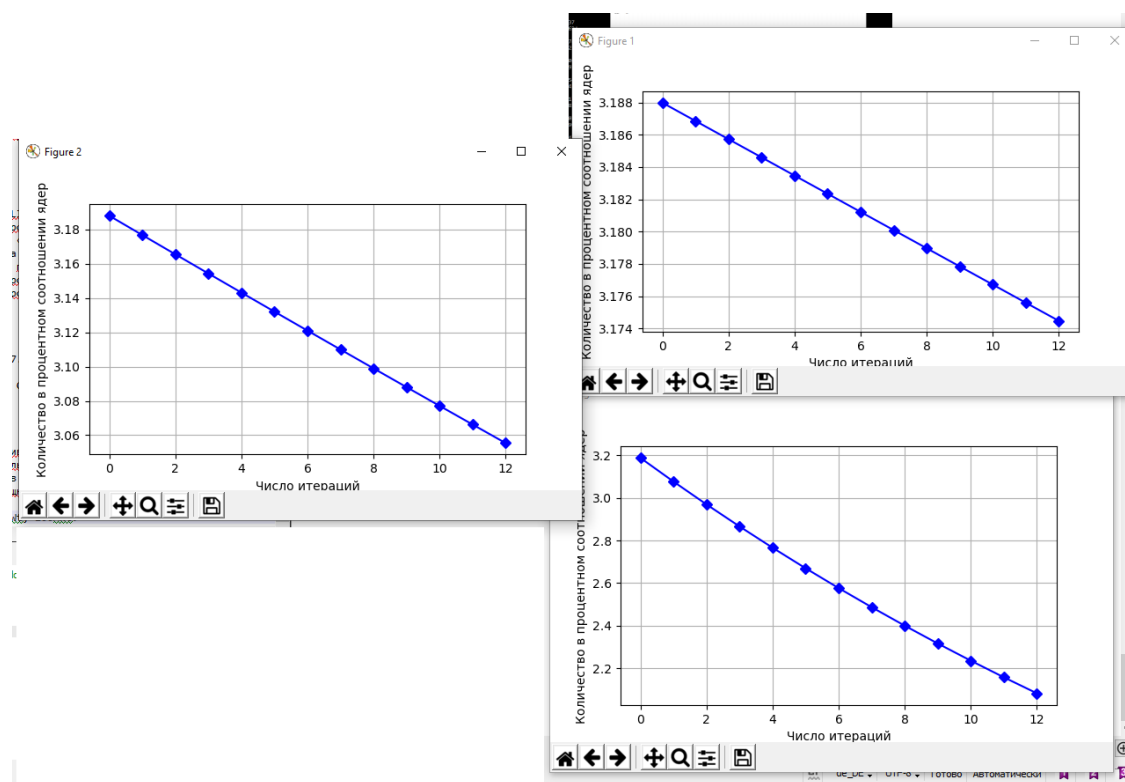


Рис. 7: Верхний - для 1 МВт, Средний - для 10 МВт, Нижний - для 100 МВт. Все ускорители имеют энергию пучка - 16 МэВ

Далее было выполнено моделирование изменения количества радиоактивного  $^{137}\text{Cs}$  и стабильных ядер в ОЯТ при изменении энергии электронов ускорителя и мощности электронного пучка. Результаты представлены в таблицах 1 и 2. Видно, что с ростом энергии облучения количество реакций растет, однако при энергии выше 25-30 МэВ эффективность пережигания снижается. Это связано с тем, что сечение реакции  $^{137}\text{Cs}(\gamma, 1n)$  имеет максимум при энергии 16 МэВ, и при энергии выше 25 МэВ имеет значение - единицы мбн. С ростом мощности ускорителя эффективность пережигания также увеличивается. Однако мощности 100 МВт тоже не достаточно для эффективного пережигания ОЯТ.

Таблица 1: Изменение количества стабильных ядер в ОЯТ при облучении тормозными фотонами в зависимости от энергии электронов ускорителя и мощности пучка электронов при облучении в течение 60-ти дней

Мощность	10 МэВ	15 МэВ	20 МэВ	25 МэВ	30 МэВ	35 МэВ	40 МэВ
245 КВт	59,799	59,798	59,795	59,793	59,7917	59,7907	59,7899
560 КВт	59,799	59,798	59,791	59,785	59,782	59,78	59,778
1 МВт	59,799	59,797	59,784	59,775	59,769	59,765	59,762
10 МВт	59,801	59,785	59,67	59,59	59,55	59,52	59,5
100 МВт	59,83	59,899	59,916	60,26	60,64	60,98	61,28

Таблица 2: Изменение количества ядер  $^{137}\text{Cs}$  в ОЯТ при облучении тормозными фотонами в зависимости от энергии электронов ускорителя и мощности пучка электронов при облучении в течение 60-ти дней

Мощность	10 МэВ	15 МэВ	20 МэВ	25 МэВ	30 МэВ	35 МэВ	40 МэВ
245 КВт	3,1878	3,1856	3,1816	3,1794	3,1778	3,1766	3,1756
560 КВт	3,1877	3,1826	3,1735	3,1683	3,1649	3,162	3,16
1000 КВт	3,1875	3,1784	3,162	3,153	3,146	3,141	3,137
10000 КВт	3,183	3,09	2,93	2,85	2,79	2,75	2,72
100000 КВт	3,139	2,35	1,41	1,04	0,85	0,73	0,65

Далее было выполнено моделирование при мощности ускорителя 1ГВт. На рис. 8 можно увидеть, как эффективно ускоритель с мощностью 1 ГВт может пережигать  $^{137}\text{Cs}$  за два месяца. Его количество падает почти до нуля, количество стабильных ядер (всех стабильных ядер в ОЯТ) возрастает и увеличивается с 59.7 процентов до 68.4.

На рис. 9 показано моделирование для периода работы ускорителя - 120 дней. Из графика видно, что на 6-7 итерации, т.е. на 60-70-ый день Цезия почти нет. Однако, количество стабильных ядер сначала повышается (... 70.00 - 70.50 - 70.58), а после начинает понижаться (70.39 - 70.053 ...) за счет пережигания стабильных ядер.

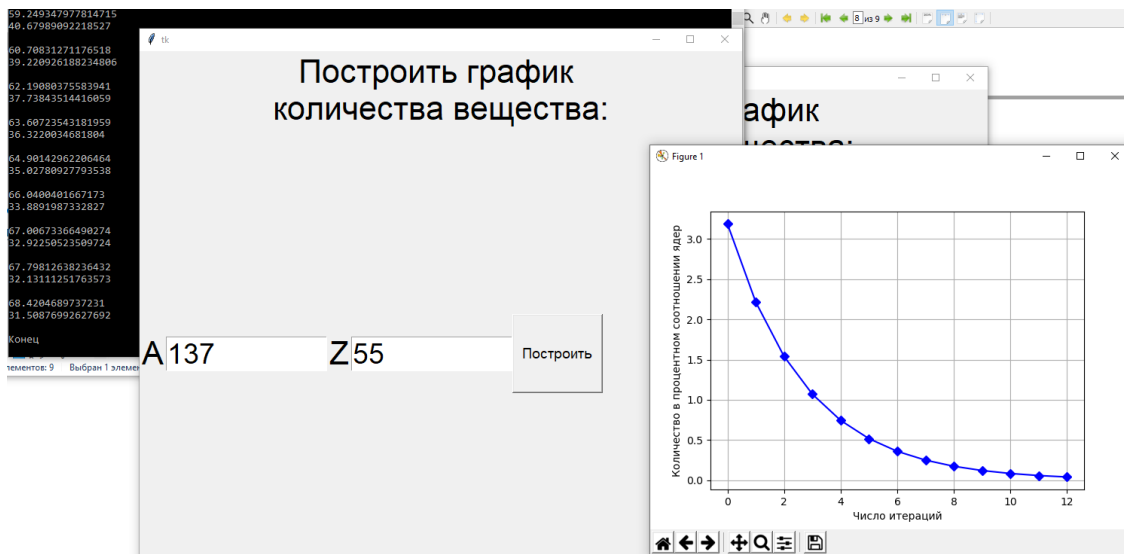


Рис. 8: Ускоритель в 1 ГВт, 16 МэВ, 60 дней

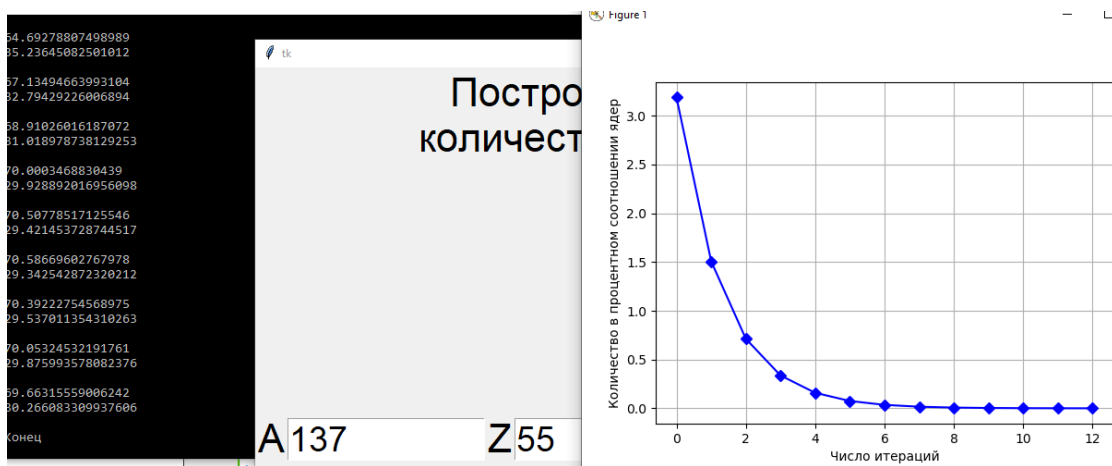


Рис. 9: Ускоритель в 1 ГВт, 16 МэВ, 120 дней

## Часть IV

# Заключение

В результате работы была написана программа, моделирующая изменение радиоактивных и стабильных ядер в ОЯТ в результате фотоядерных реакций. Показано, что при увеличении мощности происходит увеличение эффективности пережигания радиоактивных изотопов, однако, также происходит снижение количества стабильных ядер. Современные ускорители электронов обладают средней мощностью до МВт, и они не могут быть использованы для эффективного пережигания ОЯТ. Дальнейшие исследования будут связаны с выбором оптимальной энергии облучения и мощности ускорителя с учетом всех возможных реакций и цепочек превращений изотопов в ОЯТ.

## Список литературы

- [1] Ядерная физика в Интернете, раздел Электромагнитные взаимодействия заряженных частиц, <http://nuclphys.sinp.msu.ru/ihem/ihem02.htm2.9>.
- [2] GEF 2017 / 1.1 является результатом новой (предварительной) подгонки параметров модели к экспериментальным данным. <http://www.khs-erzhausen.de/GEF.html>
- [3] TALYS-based evaluated nuclear data library [https://tendl.web.psi.ch/tendl2017/gamma\\_n\\_tml/gamma.html](https://tendl.web.psi.ch/tendl2017/gamma_n_tml/gamma.html)
- [4] Nuclear Waste Transmutation, S. Leray, Laboratoire National Salorne, CE Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/385175>
- [5] RHODOTRON® E-BEAM ACCELERATOR.  
<https://www.iba-industrial.com/accelerators>
- [6] RHODOTRON ACCELERATORS FOR INDUSTRIAL ELECTRON-BEAM PROCESSING : A PROGRESS REPORT. Ion Beam Applications, Chemin du Cyclotron, 3, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgium  
<https://accelconf.web.cern.ch/e96/PAPERS/THPG/THP076G.PDF>