

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Энергетический
 Специальность: 140404 Атомные электростанции и установки
 Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Тема работы
РАСЧЕТ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА В ТЯЖЕЛОВОДНОМ РЕАКТОРЕ В ПРОЦЕССЕ ВЫГОРАНИЯ

УДК 621.039.54.001.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5002	ДВОРЯНЧИКОВ Андрей Николаевич		17.12.2015

Руководитель на предприятии

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер-технолог-физик-исследователь	К.В. Киселев	-		18.12.2015

Руководитель в университете

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры атомных и тепловых электростанций	А.В. Кузьмин	к.т.н., доцент		22.12.2015

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	С.И. Сергейчик	к.т.н., доцент		21.12.2015

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	А.М. Плахов	к.т.н., доцент		23.12.2015

По разделу «Автоматизация технологических процессов и производств»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов	Е.В. Иванова	к.ф.-м.н.		24.12.2015

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
атомных и тепловых электростанций	А.С. Матвеев	к.т.н., доцент		22.01.16

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЭС – атомная электростанция

БД – база данных

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

МЭД – мощность эквивалентной дозы

ОТВС – облученные тепловыделяющие сборки

РБМК – реактор большой мощности канальный

РУ – реакторная установка

ТВС – тепловыделяющая сборка

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		1

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....		3
1	Математические и физические основы программного комплекса АРР для расчета концентрации, активности и МЭД продуктов деления U-235	5
1.1	Общее уравнение кинетики накопления выгорания продуктов деления..	5
1.2	Групповое представление сечений реакций	9
1.3	Решение систем дифференциальных уравнений	11
2	Теоретическая и расчетно-конструкторская часть	15
2.1	Вывод уравнений кинетики накопления и выгорания продуктов деления для произвольного режима работы реактора	15
2.1.1	Режим непрерывного облучения.....	15
2.1.2	Режим дискретного облучения с разными уровнями мощности	18
2.2	Описание реализации на ЭВМ алгоритма расчета изотопного состава и основных радиационных характеристик облученного ядерного топлива	22
2.2.1	Создание библиотеки ядерных данных	23
2.2.2	Выбор цепочки	25
2.2.3	Задание режима работы реактора	26
2.2.4	Расчет концентрации	27
2.2.4.1	Аппроксимация полиномом по методу наименьших квадратов.....	28
2.2.4.2	Метод Гаусса	29
2.2.4.3	Формирование системы уравнений.....	30
2.2.4.4	Метод Рунге-Кутта-Мерсона	32
2.2.5	Расчет активности и МЭД.....	34
2.2.6	Расчет накопления и радиационных характеристик долгоживущих продуктов деления в ТВС реактора с заданным нейтронным спектром и режимом работы.	35
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	40
	Приложение А.....	42
	Приложение Б	53

ВВЕДЕНИЕ

Практически на всех переделах ядерно-химического производства необходимы данные о нуклидном составе и радиационных характеристиках выгружаемого из реакторов отработанного топлива. Важным компонентом его состава являются продукты деления, накапливаемые во время нахождения ТВС в реакторе.

Известные схемы расчета накопления продуктов деления и справочные публикации ориентированы, как правило, на низкообогащенное топливо серийных отечественных РУ типа ВВЭР и РБМК [1]. В то же время имеются установки (например, производящие изотопы народнохозяйственного назначения) для которых принятая для ОТВС АЭС методика расчета осколочного состава не подходит. Физически это объясняется существенной временной зависимостью энергетического спектра и интегральной плотности потока нейтронов в реакторе из-за глубокого “выжигания” высокообогащенного ядерного топлива в “компанейском” режиме работы РУ.

Цель настоящей работы состояла в расчете накопления продуктов деления и радиационных характеристик ТВС, облученных в РУ с постоянной мощностью нагрузкой на номинальном уровне.

В данной методике используется адекватная поставленной физической задаче модель двухкомпонентного нейтронного спектра, часто применяемая в расчетах образования нуклидов в реакторах на тепловых нейтронах [2].

Алгоритм реализован в виде программного комплекса АРР (накопление продуктов деления), включающего:

1. Базы исходных данных (В настоящее время база содержит данные о 100 продуктах деления с периодом полураспада более 2-х часов.);
2. Задаваемые реакторные данные (Задают мощностной режим работы ТВС в течении реакторной кампании, а также, в табличной форме, параметры нейтронного спектра – температуру нейтронов и эпитепловой индекс – в функции от глубины выгорания урана-235. Параметры

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		3

спектра определяют из расчетов реакторных ячеек по независимым программам, например, “Физик” [3] или МК25 [4].);

3. Блоки формирования и численного решения систем уравнений кинетики для любой выбранной цепочки радиоактивных превращений;

Блоки промежуточных преобразований таблиц и подготовки конечных данных о концентрациях и радиационных характеристиках как отдельных нуклидов, так и совокупности содержащихся в ОТВС продуктов деления.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		4

1 Математические и физические основы программного комплекса АFR для расчета концентрации, активности и МЭД продуктов деления U-235

1.1 Общее уравнение кинетики накопления выгорания продуктов деления

В природе встречается некоторое число неустойчивых тяжелых изотопов, которые могут испытывать спонтанное и (или) вынужденное деление. Во многих случаях ядра, получающиеся в результате деления, не находятся в своем основном состоянии, т.е. в состоянии с наименьшей энергией [1].

Если число нейтронов и протонов в ядре какого-либо атома таково, что их отношение лежит вне области устойчивости для данного массового числа, то это ядро оказывается радиоактивным. Неустойчивое ядро спонтанно распадается с образованием более устойчивого ядра. Если ядра содержат больше нейтронов или, что то же самое, меньше протонов, чем это требуется для устойчивости, то происходит спонтанное превращение нейтрона в протон. При этом испускается отрицательная β^- частица, т.е. электрон. Атомный номер дочернего элемента становится на единицу выше, чем у исходного (материнского), а массовое число не меняется. Продукты β^- распада более устойчивы, чем исходные ядра. Однако может оказаться, что дочернее ядро также неустойчиво. В этом случае оно, испустив отрицательную β^- частицу, образует изотоп последующего элемента. Некоторое число радиоактивных превращений, в каждом из которых нейтрон заменяется протоном с испусканием отрицательной β^- - частицы, приводит в конечном счете к образованию устойчивого изотопа [1,3].

Ядро будет также неустойчиво если число нейтронов слишком мало. В этом случае наблюдается превращение протона в нейтрон с испусканием положительного электрона, так называемого позитрона, т.е. излучается положительная β^+ частица. Дочернее ядро имеет атомный номер на единицу меньший, чем материнское, хотя массовые числа у них одинаковые. Как и в случае, описанном выше, дочернее ядро может также оказаться радиоактивным. После нескольких положительных β^+ распадов оно превращается в стабильное ядро [2].

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		5

Каждое ядро данного радиоактивного вещества имеет определенную вероятность распада в единицу времени. Эта вероятность распада является характерной особенностью данного вещества, причем никакими известными способами ее нельзя изменить. Величина вероятности распада не зависит от физического и химического состояния элемента при всех достигнутых температурах и давлениях. В данном веществе скорость распада в каждый момент времени прямо пропорциональна имеющемуся числу рассматриваемых радиоактивных атомов. Таким образом, если N – число радиоактивных атомов (или ядер) данного типа в некоторый момент времени t , то скорость распада определяется по формуле

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (1)$$

где λ – так называемая постоянная распада радиоактивного вещества [3]. Обозначим через N_0 число радиоактивных ядер в произвольный начальный момент времени, а через N – число нераспавшихся ядер в момент t . Тогда после интегрирования уравнения (1) в пределах от 0 до t получим

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Скорость радиоактивного распада удобно выражать с помощью периода полураспада данного ядра. Период полураспада определяется как время, необходимое для того, чтобы распалась половина всех имевшихся вначале радиоактивных ядер. Таким образом, если положить в (2)

$$N = \frac{1}{2} N_0,$$

то соответствующее время есть период полураспада $T_{1/2}$, т.е.

$$e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2},$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,6931}{\lambda}. \quad (3)$$

В реакторах взаимодействие неделящегося атомного ядра с нейтронами проходит в две стадии: сначала падающая частица поглощается ядром-

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		6

мишенью, образуя составное ядро, а через короткий промежуток времени последнее распадается, испуская частицу. При этом остается другое ядро, называемое остаточным ядром или ядром отдачи. Обе стадии могут быть записаны в следующем виде:

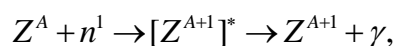
1) Образование составного ядра

Ядро-мишень + Падающая частица \rightarrow Составное ядро.

2) Распад составного ядра

Составное ядро \rightarrow Ядро отдачи + Испускаемая частица.

При реакции радиационного захвата ядро-мишень захватывает нейтрон и образует составное ядро в возбужденном состоянии. Затем избыток энергии испускается в виде одного или нескольких γ – квантов. Остающееся составное ядро находится в основном состоянии. Этот процесс может быть представлен в виде



где A - массовое число, а Z – атомный номер ядра-мишени.

Символ $[Z^{A+1}]^*$ показывает, что составное ядро находится в возбужденном состоянии. Z^{A+1} – конечный продукт реакции представляет собой ядро с тем же атомным номером, что и ядро-мишень, но с массовым числом, большим на единицу [2,3,5].

Захват нейтрона ядром с последующим испусканием γ – излучения связан с увеличением отношения числа нейтронов к числу протонов. Поэтому продукт реакции (n, γ) может быть радиоактивным. Если полученное ядро неустойчиво, то обычно оно является излучателем отрицательных β^- частиц, так как при этом типе распада лишний нейтрон заменяется протоном [1].

Таким образом, изменение изотопического состава ядерного горючего реактора во времени происходит по двум причинам. Во-первых, в результате деления ядер появляются осколки, среди которых встречаются самые разнообраз-

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		7

ные ядра, и во-вторых, возникают новые изотопы в результате захвата нейтронов ядрами топлива и продуктами деления [6].

Количество *i*-ых ядер деления, возникающих в единицу времени в единице объема блока, содержащего в качестве делящегося вещества U-235, равно

$$X_i n \nu \sigma_{f5} N_5, \quad (4)$$

где X_i – вероятность выхода *i*-го нуклида; $n \nu \sigma_{f5} N_5$ – количество делений в единице объема блока ($n \nu$ – плотность потока тепловых нейтронов в единице объема, σ_{f5} – приведенное нейтронное эффективное микросечение деления U-235) [3]. Количество исчезающих ядер того же *i*-го осколка деления равно

$$\lambda_i N_i + n \nu \sigma_i N_i, \quad (5)$$

где первое слагаемое обусловлено распадом, а второе – тем, что ядра поглощают нейтроны ((n, γ) – реакция) [1,3,4,9].

Рассмотрим накопление продуктов деления, учитывая, как их образование в результате деления U-235, так и радиоактивные превращения и радиационный захват нейтронов.

Накопление продуктов деления для заданной цепочки радиоактивных превращений можно описать системой уравнений, в которой *i*-е уравнение для *i*-го нуклида цепочки имеет вид:

$$\frac{dN_i}{dt} = X_i n \nu \sigma_{f5} N_5 - n \nu \sigma_i N_i - \lambda_i N_i + \sum \varepsilon_i^p \lambda_i^p N_i^p + \varepsilon_{i-1}^m n \nu \sigma_{i-1}^m N_{i-1}^m + \varepsilon_{i-1} n \nu \sigma_{i-1} N_{i-1}, \quad (6)$$

где, ($i=1,2,\dots,q$), q – число нуклидов в цепочке,

N_{i-1} – концентрация (*i-1*)-го нуклида в одном из состояний, (m – метастабильном или основном)

ε_i^p – вероятность образования *i*-го нуклида при радиоактивном распаде *p* – предшественника

ε_{i-1} – вероятность образования *i*-го нуклида в данном состоянии (метастабильном или основном) в результате (n, γ) – реакции на изотопе с массовым числом меньшим на единицу.

1.2 Групповое представление сечений реакций

Известно, что микросечение реакций поглощения $\sigma_a(E)$ многих ядер сложным образом зависят от энергии нейтронов, довольно часто имея резонансную структуру, и по этой причине даже в пределах узкого энергетического интервала порядка 0,1 эВ могут меняться в десятки раз. В межрезонансной области также имеет место четко выраженная зависимость сечений от энергии [8].

Поэтому для нахождения одногруппового приведенного сечения требуется детальный расчет пространственно-энергетической зависимости плотности потока нейтронов в активной зоне, что довольно затруднительно [4].

Обычно используют приближенный, так называемый групповой метод расчета, основная идея которого состоит в следующем. Весь интервал энергий нейтронов 0-10 МэВ разбивают на сравнительно небольшое число энергетических групп. В каждой группе с номером r истинная плотность потока нейтронов $\phi(R, E, t)$ заменяется на не зависящую от энергии величину $\phi_r(R, t)$, называемую групповой плотностью потока (групповым потоком). Аналогично в той же r -й группе зависящее от энергии сечение $\sigma_a(E)$ заменяют на постоянное сечение σ_a^r , которое называют групповым сечением поглощения [2,4,8].

Групповые сечения σ_a^r получают в результате усреднения по какому-либо заранее выбранному спектру нейтронов, который, будучи сравнительно простым, тем не менее был бы достаточно близким к реальным спектрам достаточно большого класса активных зон, что позволяет организовывать универсальные библиотеки групповых сечений для расчетов реакторов различного типа [1,3,5].

В простейшем случае, иногда называемой одногрупповой теорией, предполагается, что возникновение, диффузия и поглощение нейтронов происходят при одной и той же энергии – тепловой.

Вычисления одногрупповым методом являются приближенными, поскольку свойства вещества активной зоны весьма различны для замедляемых и тепловых нейтронов.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		9

В настоящее время принято представлять спектр нейтронов реакторов на быстрых нейтронах в виде 26 групп, а реакторов на эпитепловых и тепловых нейтронах – в виде 4 или 2 групп [8].

Для расчета больших реакторов на тепловых нейтронах двухгрупповое приближение обладает достаточной точностью и поэтому используется во многих практических расчетах. Уравнение двухгруппового приближения имеет вид:

$$\hat{\sigma}_i = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{293}{T_n + 273}} \sigma_{0,025}^{(i)} g + r R_i, \quad (7)$$

где: T_n – температура нейтронов тепловой части спектра, °С;

$\sigma_{0,025}^i$ – сечение i -го нуклида;

g – g -фактор, учитывающий отклонение сечения от закона $1/\sqrt{E}$

R_i – резонансный интеграл i -го нуклида;

r – эпитепловой индекс.

В программе используется двухкомпонентная модель нейтронного спектра. Параметры T_n и r , характеризующие спектр для расчетной ТВС, являются внешними параметрами, задаваемыми пользователем.

1.3 Решение систем дифференциальных уравнений

Построение вычислительного алгоритма для цифровых ЭВМ связано с переходом к дискретной модели, которая представляет собой систему уравнений. Прикладная модель может включать в себя в качестве определяющих обыкновенные дифференциальные уравнения. Отметим некоторые моменты приближенного решения задач для систем обыкновенных дифференциальных уравнений [16]. В качестве основного объекта выбирается система уравнений первого порядка:

$$\frac{du}{dt} = F(t, u), \quad (8)$$

где $u=(u_1, u_2, \dots, u_m)$ – вектор неизвестных, а $F(t, u)=(f_1, f_2, \dots, f_m)$ – вектор правых частей. Решение системы ищется при $0 < t < T$.

Для системы уравнений могут быть поставлены два типа задач. Если дополнительные условия для (8) заданы в одной точке (для определенности – при $t=0$), то мы имеем задачу Коши (задачу с начальными данными). Если это не так (дополнительные условия заданы в двух или более точках отрезка $[0, T]$), то приходим к краевой задаче. Основное внимание сосредоточим на задаче Коши [11]. Поэтому дополним (8) условиями

$$u(0) = u^0. \quad (9)$$

Будем искать приближенные решения задачи (8), (9) при $t_{n+1}=t_n + \tau_{n+1}$, $t_0=0$. Более того, при описании ограничимся случаем постоянного шага по времени $\tau_{n+1} = \tau$. Приближенное решение задачи (8), (9) при $t=t_n$ обозначим y^n .

Численные методы решения задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений можно разбить на два больших класса: явные и неявные [12]. Такая классификация учитывает особенности реализации методов на ЭВМ. Удобно рассмотреть эти два класса методов на простейшем примере.

Наиболее простой подход к численному решению связан с использованием явной схемы Эйлера

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		11

$$\frac{y^{n+1} - y^n}{\tau} = F(t_n, y^n). \quad (10)$$

В этом случае значение на новом временном шаге получается из решения на предыдущем шаге по явным формулам

$$y^{n+1} = y^n + \tau F(t_n, y^n).$$

Для неявной схемы Эйлера имеем

$$\frac{y^{n+1} - y^n}{\tau} = F(t_{n+1}, y^{n+1}). \quad (11)$$

В этом случае для нахождения y^{n+1} получим задачу

$$y^{n+1} - \tau F(t_{n+1}, y^{n+1}) = y^n,$$

т. е. требуется решить систему уравнений. В плане вычислительной реализации неявные схемы значительно сложнее явных. Но последние всегда связаны с ограничениями на величину шага по времени [11,12,16].

Неявные методы решения задачи Коши для систем нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений приводят к необходимости решения на каждом шаге системы нелинейных уравнений. С этой целью используются различные подходы. Например, для получения хорошего начального приближения применяются явные схемы, а уточнение проводится на основе неявных [16].

Схемы Эйлера (10), (11) имеют лишь первый порядок точности, т.е. $|y^n - u(t_n)| = O(\tau)$ при $\tau \rightarrow 0$. Более высокий (второй) порядок точности имеет симметричная схема

$$\frac{y^{n+1} - y^n}{\tau} = \frac{1}{2} (F(t_n, y^n) + F(t_{n+1}, y^{n+1})),$$

которая также относится к классу неявных [17].

Повышение точности приближенных решений задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений достигается на двух различных направ-

лениях: методы Рунге-Кутты и многошаговые методы. В методах Рунге-Кутты с этой целью вычисляется правая часть в нескольких внутренних точках интервала $[t_n, t_{n+1}]$. Эти методы (например, (10), (11)) относятся к классу одношаговых - для вычисления y^{n+1} используется приближенное решение только на предыдущем шаге y^n . Повышение порядка точности в многошаговых методах достигается за счет использования приближенных решений в трех и более точках t_n, t_{n+1}, t_{n+2} и т. д.

В качестве простейшего варианта метода Рунге-Кутты отметим метод второго порядка точности [16,17]:

$$\begin{aligned} y^{n+1} &= y^n + \tau k_2, \\ k_2 &= F(t_n + 0.5\tau, y^n + 0.5\tau k_1), \\ k_1 &= F(t_n, y^n). \end{aligned} \quad (12)$$

В этом случае используется одна промежуточная точка $t = t_{n+1/2}$.

Наибольшее распространение получил метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности:

$$\begin{aligned} y^{n+1} &= y^n + \frac{\tau}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \\ k_3 &= F(t_n + 0.5\tau, y^n + 0.5\tau k_2), \\ k_4 &= F(t_n + \tau, y^n + \tau k_3). \end{aligned} \quad (13)$$

а выражения для k_1, k_2 , приведены в (12). Его достоинством является высокая точность и меньшая склонность к возникновению неустойчивости решения [11,12,14,17].

Автоматическое изменение шага в ходе решения систем дифференциальных уравнений необходимо, если решение требуется получить с заданной точностью. При высокой точности и решении в виде кривых с сильно различающейся крутизной автоматическое изменение шага обеспечивает уменьшение общего числа шагов в несколько раз, резко уменьшает вероятность возникновения числовой неустойчивости, дает более равномерное расположение точек графика кривых (решений) при их выводе на печать [16,17,18].

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		13

Метод Рунге-Кутта с автоматическим изменением шага заключается в том, что после вычисления y^{n+1} с шагом h все вычисления проводятся повторно с шагом $h/2$. Полученный результат $(y^{n+1})^*$ сравнивается с y^{n+1} . Если $|y^{n+1} - (y^{n+1})^*| < \varepsilon$ (ε – погрешность), вычисления продолжаются с шагом h , в противном случае шаг уменьшают. Если это неравенство слишком сильное, шаг, напротив, увеличивают.

Метод Рунге-Кутта-Мерсона с автоматическим изменением шага обеспечивает приближенную оценку погрешности на каждом шаге интегрирования. Погрешность интегрирования имеет пятый порядок точности

$$\begin{aligned}
 k_0 &= \tau F(t_n, y^n); \\
 k_1 &= \tau F\left(t_n + \frac{1}{3}\tau; y^n + \frac{1}{3}k_0\right); \\
 k_2 &= \tau F\left(t_n + \frac{1}{3}\tau; y^n + \frac{1}{6}k_0 + \frac{1}{6}k_1\right); \\
 k_3 &= \tau F\left(t_n + \frac{1}{2}\tau; y^n + \frac{1}{8}k_0 + \frac{3}{8}k_2\right); \\
 k_4 &= \tau F\left(t_n + \tau; y^n + \frac{1}{2}k_0 - \frac{3}{2}k_2 + 2k_3\right); \\
 y^{n+1} &= y^n + (k_0 + 4k_3 + k_4)/6.
 \end{aligned}$$

2 Теоретическая и расчетно-конструкторская часть

2.1 Вывод уравнений кинетики накопления и выгорания продуктов деления для произвольного режима работы реактора

Решается задача о выгорании урана-235 в блоках из высокообогащенного урана. Накопление продуктов деления, для заданной цепочки радиоактивных превращений, можно описать системой дифференциальных уравнений, в которой уравнение для i -го нуклида цепочки имеет вид (6).

Всю реакторную кампанию можно разбить на такие интервалы, что в пределах каждого из них количество делений в единице объема блока будет постоянно, т.е.

$$n\nu\sigma_{f5}N_5 = n\nu^0\sigma_{f5}^0N_5^0 = Q = Const. \quad (14)$$

Из (14) следует, что плотность потока тепловых нейтронов $n\nu$ не остается постоянной, а зависит от глубины выгорания урана-235

$$\Delta = \frac{N_5^0 - N_5}{N_5^0} \quad (15)$$

Для решения системы (6) необходимо Δ и $n\nu$ представить как явные функции времени облучения. Рассмотрим вначале режим непрерывного облучения на постоянном уровне мощности.

2.1.1 Режим непрерывного облучения

При непрерывном облучении реактор работает на одной мощности в течении всей кампании, т.е. в течении времени T (Рис. 1). Изменение числа атомов U-235 в течение всей кампании равно

$$\frac{dN_5}{dt} = -n\nu\sigma_{a5}N_5 = -n\nu\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}\sigma_{f5}N_5 = -\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}Q$$

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		15

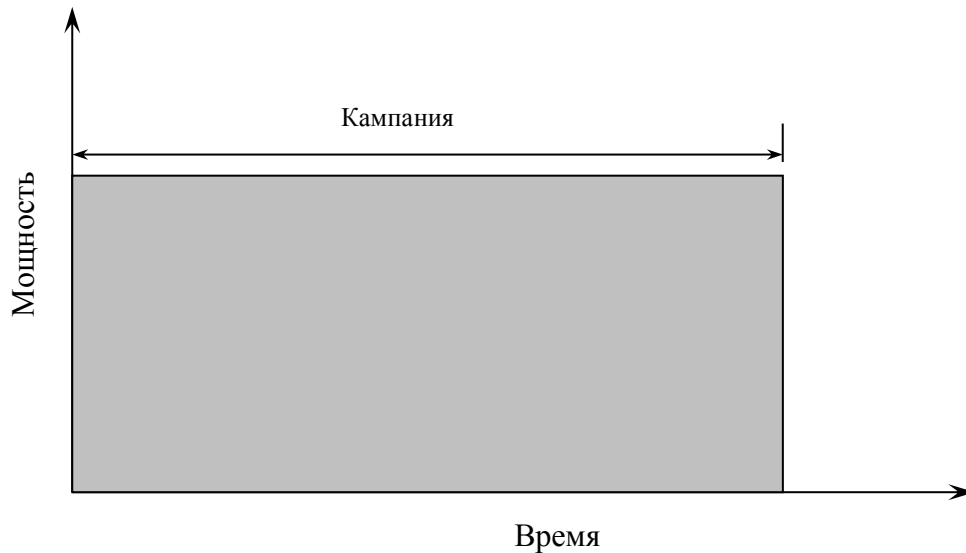


Рисунок 1 – Режим непрерывного облучения

Отношение микросечений поглощения и деления урана-235 $\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}$ зависит от глубины выгорания Δ . Представим это отношение в виде полинома, ограничившись линейным приближением, т.к. $\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}$ медленно и плавно изменяющаяся функция.

$$\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}} \approx f(\Delta) = a_5(1 + b_5\Delta).$$

При $\Delta = 0$ $f(0) = a_5 = \frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}(0) \equiv \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}\right)^0$.

Таким образом

$$\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}} = \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}\right)^0 (1 - b_5\Delta) \quad (16)$$

Представим глубину выгорания в виде

$$\Delta = \left(-\int_0^t \frac{dN_5}{dt} dt\right) \frac{1}{N_5^0} = \frac{Q}{N_5^0} \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}\right)^0 \int_0^t (1 - b_5\Delta) dt$$

Продифференцировав по t получим:

$$\frac{d\Delta}{dt} = \frac{Q}{N_5^0} \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}\right)^0 - \frac{Q}{N_5^0} \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}}\right)^0 b_5\Delta \quad (17)$$

Решение неоднородного линейного дифференциального уравнения (17)

имеет вид

$$\Delta(t) = \frac{1}{b_5} \left(1 - e^{-\frac{Q}{N_5^0} \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}} \right)^0 b_5 t} \right) \quad (18)$$

Пользуясь (6), (15) и (18) выразим плотность потока тепловых нейтронов через t

$$n\nu = \frac{1}{\sigma_{f5}} \frac{Q}{N_5} = \frac{Q}{\sigma_{f5} N_5^0} \frac{N_5^0}{N_5} = \frac{Q}{\sigma_{f5} N_5^0 (1-\Delta)} = \frac{Q}{\sigma_{f5} N_5^0} \left[1 - \frac{1}{b_5} \left(1 - e^{-\frac{Q}{N_5^0} \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}} \right)^0 b_5 t} \right) \right]^{-1} \quad (19)$$

Аналогично (16) и (17) отношение $\frac{\sigma_i}{\sigma_{f5}}$ для любого i -го изотопа будет выглядеть

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{f5}} = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{f5}} \right)^0 (1 - b_i \Delta) = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{f5}} \right)^0 \left[1 - \frac{b_i}{b_5} \left(1 - e^{-\frac{Q}{N_5^0} \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}} \right)^0 b_5 t} \right) \right] \quad (20)$$

Обозначим:

$$\frac{N_i}{N_5^0} = n_i, \quad \text{относительная концентрация } i\text{-го изотопа,}$$

$$\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{f5}} \right)^0 = \tilde{\sigma}_i^0, \quad \text{- нормированное сечение } i\text{-го нуклида на начало кампании}$$

$$\frac{Q}{N_5^0} = q, \quad \frac{Q}{N_5^0} \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}} \right)^0 b_5 = q \tilde{\sigma}_{a5}^0 b_5 = \beta_5.$$

Окончательно система уравнений (6) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dn_i}{dt} = X_i q - \tilde{\sigma}_i^0 q \cdot \frac{1 - \frac{b_i}{b_5} (1 - e^{-\beta_5 t})}{1 - \frac{1}{b_5} (1 - e^{-\beta_5 t})} n_i - \lambda_i n_i + \sum \varepsilon_i^p \lambda_i^p n_i^p + \varepsilon_{i-1}^m \tilde{\sigma}_{i-1}^0 \frac{1 - \frac{b_{i-1}}{b_5} (1 - e^{-\beta_5 t})}{1 - \frac{1}{b_5} (1 - e^{-\beta_5 t})} n_{i-1} \Bigg] q + \\ + \varepsilon_{i-1} \tilde{\sigma}_{i-1}^0 q \frac{1 - \frac{b_{i-1}}{b_5} (1 - e^{-\beta_5 t})}{1 - \frac{1}{b_5} (1 - e^{-\beta_5 t})} n_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (21) \end{aligned}$$

Индексом “m” в (21) помечено метастабильное состояние нуклида под номером (i-1).

2.1.2 Режим дискретного облучения с разными уровнями мощности

Пусть на *l*-том интервале мощность делений $Q=Q_l$ (Рис.2), выгорание за все предыдущие (*l*-1) интервалов обозначим Δ_{l-1} , выгорание в *l*-том интервале на текущий момент *t* - $\Delta^{(l)}(t)=\Delta^{(l)}$.

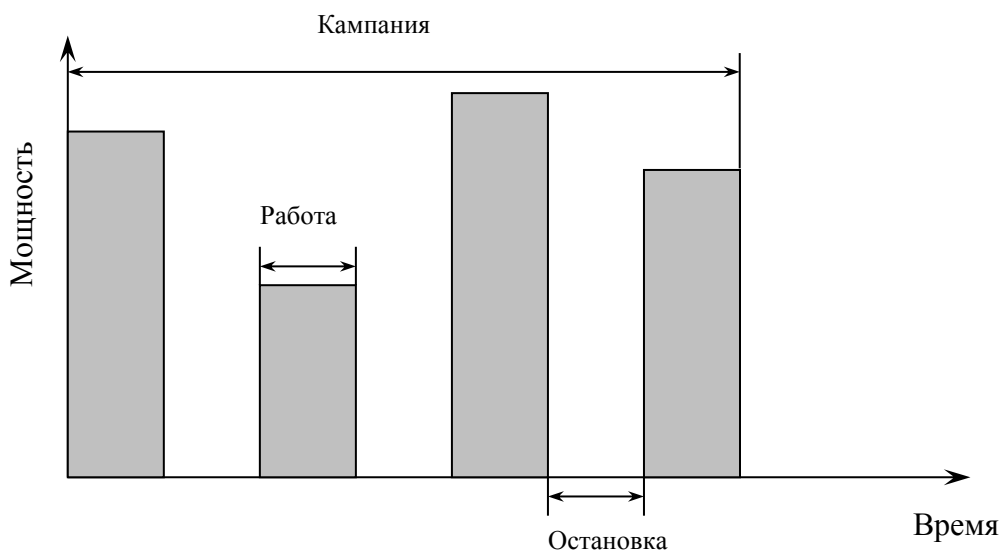


Рисунок 2 – Режим дискретного облучения с разными уровнями мощности

Суммарное выгорание на момент *t* равно

$$\Delta(t) = \Delta_{l-1} + \Delta^{(l)}.$$

Представим его в виде явной функции *t*, аналогичной (18). Запишем

$$\frac{dN_5}{dt} = -\tilde{\sigma}_5 Q,$$

где обозначено $\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}} = \tilde{\sigma}_5(t)$.

На *l*-том интервале: $\frac{dN_5^{(l)}}{dt} = -\tilde{\sigma}_5^{(l)} Q_l$.

Представим: $\Delta^{(l)} = -\frac{1}{N_5^0} \int_{t_{l-1}}^t \frac{dN_5^{(l)}}{dt} dt = \frac{N_5^{(l-1)} - N_5^{(l)}}{N_5^0}$.

Уравнение выгорания примет вид: $\Delta^{(l)} = \frac{Q_l}{N_5^0} \int_{t_{l-1}}^t \tilde{\sigma}_5^{(l)} dt$.

Продифференцируем его: $\frac{d\Delta^{(l)}}{dt} = \frac{Q_l}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^{(l)}$.

По определению: $\tilde{\sigma}_5^{(l-1)} = \tilde{\sigma}_5^0 (1 - b_5 \Delta^{(l-1)})$, а

$$\tilde{\sigma}_5^{(l)} = \tilde{\sigma}_5^0 \left[1 - b_5 (\Delta^{(l-1)} + \Delta^{(l)}) \right] = \tilde{\sigma}_5^{(l-1)} - \tilde{\sigma}_5^0 b_5 \Delta^{(l)} = \tilde{\sigma}_5^{(l-1)} \left(1 - \frac{\tilde{\sigma}_5^0}{\tilde{\sigma}_5^{(l-1)}} b_5 \Delta^{(l)} \right)$$

$$\frac{d\Delta^{(l)}}{dt} = \frac{Q_l}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^{(l-1)} \left(1 - \frac{\tilde{\sigma}_5^0}{\tilde{\sigma}_5^{(l-1)}} b_5 \Delta^{(l)} \right) = \frac{Q_l}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^{(l-1)} - \frac{Q_l}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^0 b_5 \Delta^{(l)} = A_l - B_l \Delta^{(l)}$$

Решение ищем в виде: $\Delta^{(l)} = c + d e^{-B_l t}$ Подставив в исходное уравнение

Найдем: $c = \frac{A_l}{B_l}$. Из условия $\Delta^{(l)}|_{t=t_{l-1}} = 0$ имеем $d = -c e^{B_l t_{l-1}} = -\frac{A_l}{B_l} e^{B_l t_{l-1}}$

Окончательно:

$$\Delta^{(l)} = \frac{1}{b_5} \left(1 - e^{-B_l (t-t_{l-1})} \right) - \Delta^{(l-1)} + \Delta^{(l-1)} e^{-B_l (t-t_{l-1})}$$

Суммарное выгорание:

Все Δ_j считаются по итерационной схеме:

$$\Delta = \Delta_{l-1} + \Delta^{(l)} = \frac{1}{b_5} \left[1 - (1 - b_5 \Delta_{l-1}) e^{-\frac{Q_l}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^0 b_5 (t-t_{l-1})} \right] \quad (22)$$

$$\Delta_1 = \frac{1}{b_5} \left(1 - e^{-\frac{Q_1}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^0 b_5 t_1} \right) , \text{ - выгорание на } 1\text{-ом интервале } [0, t_1].$$

$$\Delta_2 = \frac{1}{b_5} \left[1 - (1 - b_5 \Delta_1) e^{-\frac{Q_2}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^0 b_5 (t_2 - t_1)} \right] , \text{ - выгорание на } 2\text{-х интервалах } [0, t_2].$$

$$\Delta_3 = \frac{1}{b_5} \left[1 - (1 - b_5 \Delta_2) e^{-\frac{Q_3}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^0 b_5 (t_3 - t_2)} \right] , \text{ - выгорание на } 3\text{-х интервалах } [0, t_3].$$

..... И Т.Д.

Формула (19) для плотности потока тепловых нейтронов, на l -том интервале примет вид:

$$(n \cdot v)^{(l)} = \frac{Q_l}{\sigma_{f5}^{(l)} N_5^0 (1 - \Delta)} = \frac{Q_l}{\sigma_{f5}^{(l)} N_5^0} \left[1 - \frac{1}{b_5} \left[1 - (1 - b_5 \Delta_{l-1}) e^{-\frac{Q_l}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^0 b_5 (t-t_{l-1})} \right] \right]^{-1} \quad (23)$$

Формула нормированных сечений (20) примет вид (на l -том интервале):

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{f5}} \Big|_{t > t_{l-1}} = \tilde{\sigma}_i^{(l)} = \tilde{\sigma}_i^0 (1 - b_i \Delta_{l-1}) = \tilde{\sigma}_i^0 \left[1 - \frac{b_i}{b_5} \left[1 - (1 - b_5 \Delta_{l-1}) e^{-\frac{Q_l}{N_5^0} \tilde{\sigma}_5^0 b_5 (t-t_{l-1})} \right] \right] \quad (24)$$

Окончательно в общем случае система уравнений накопления и выгорания осколков деления запишется:

$$\frac{dn_i^{(l)}}{dt} = X_i q_l - \tilde{\sigma}_i^0 q_l a_{i,l} n_i^{(l)} - \lambda_i n_i^{(l)} + \sum \varepsilon_i^p \lambda_i^p n_{i_p}^{(l)} + \varepsilon_{i-1}^m (\tilde{\sigma}_{i-1}^0 a_{i-1,l} n_{i-1}^{(l)})^m q_l + \varepsilon_{i-1} \tilde{\sigma}_{i-1}^0 q_l a_{i-1,l} n_{i-1}^{(l)}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

Здесь:

$$\beta_5^l = q_l \tilde{\sigma}_5^0 b_5, \quad \tilde{\sigma}_5^0 = \left(\frac{\sigma_{a5}}{\sigma_{f5}} \right)^0,$$

$q_l = \frac{Q_l}{N_5^0} = Const$, - нормированная мощность делений на l -том интервале.

$$a_{i,l}(t) = \frac{1 - \frac{b_i}{b_5} \left[1 - (1 - b_5 \Delta_{l-1}) e^{-\beta_5^l (t-t_{l-1})} \right]}{1 - \frac{1}{b_5} \left[1 - (1 - b_5 \Delta_{l-1}) e^{-\beta_5^l (t-t_{l-1})} \right]}$$

$n_i^{(l)} \equiv n_i^{(l)}(t)$, - нормированная концентрация i -го нуклида на l -том интервале в текущий момент времени t между $[t_{l-1}, t_l]$.

$n_{i_p}^{(l)}$, - нормированная концентрация предшественника i -го нуклида на l -том интервале в момент t между $[t_{l-1}, t_l]$.

$n_{i-1}^{(l)}$, - нормированная концентрация $(i-1)$ -го нуклида на l -том интервале в момент t между $[t_{l-1}, t_l]$.

$\tilde{\sigma}_i^0$, - нормированное сечение на момент $t=0$.

В результате получена система дифференциальных уравнений, с переменными коэффициентами, разрешив которую относительно n_i получим концентрацию для каждого i -го нуклида из конкретной цепочки радиоактивных превращений.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		21

2.2 Описание реализации на ЭВМ алгоритма расчета изотопного состава и основных радиационных характеристик облученного ядерного топлива

Для реализации описанных выше алгоритмов расчета изотопного состава и радиационных характеристик создана программа на Delphi. Данную программу, целесообразно разделить на две части:

1. расчет концентрации нуклидов;
2. расчет радиационных характеристик.

В первой части для заданного режима облучения топлива рассчитываются концентрации ядер и записываются на внешние носители памяти. Вторая часть программы - расчет радиационных характеристик. Рассмотрим более подробно каждый раздел программы.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		22

2.2.1 Создание библиотеки ядерных данных

Из рассмотрения приведенных выше формул, содержащих достаточно большое число различных по физическому смыслу переменных, видно, что создание библиотеки ядерных данных является чрезвычайно важной задачей, по существу определяющей достоверность и качество прогноза нуклидного состава и радиационных характеристик продуктов деления.

Проанализировав систему уравнений (11) можно сделать вывод, что в базу данных должны входить постоянные, характеризующие i -й элемент, а также предусмотреть, что для каждого i -го нуклида может существовать несколько предшественников, каждый из которых имеет свою вероятность распада. Таким образом, каждый элемент должен иметь о себе следующую информацию:

- наименование элемента;
- атомный номер;
- массовое число;
- состояние;
- сечение при энергии 0,025эВ;
- резонансный интеграл;
- прямой выход;
- кумулятивный выход;
- g фактор;
- постоянная распада;
- гамма-постоянная.

Каждый предшественник должен содержать такие данные, чтобы по ним можно было отличить его от других элементов, т.е.

- наименование предшественника;
- вероятность его распада;
- атомный номер;

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		23

- массовое число;
- состояние;

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		24

2.2.2 Выбор цепочки

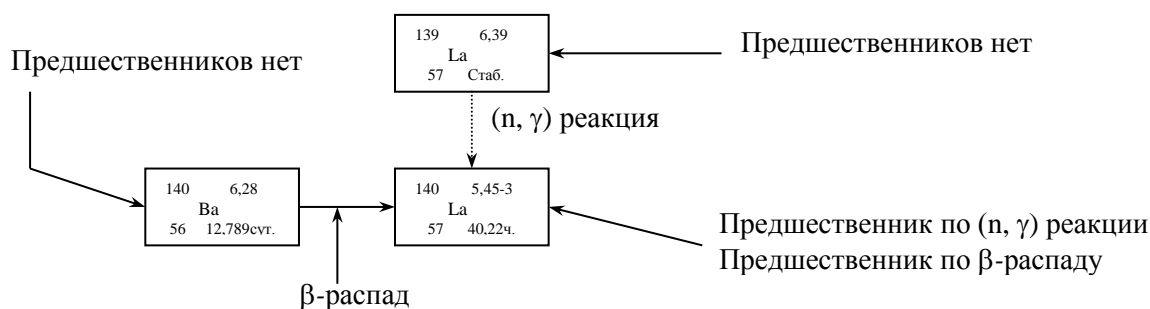
Для того чтобы выбрать цепочку необходимо проделать одну из операций:

1. Открыть файл, в котором находятся данные о цепочке,
2. Выбрать элементы из БД, которые входят в цепочку, т.е. тем самым задав новую цепочку (затем можно сохранить ее в файле).

Каждый элемент хранит запись:

- о его номере в БД,
- о количестве предшественников по β -распаду,
- о количестве предшественников по (n, γ) -реакции,
- о том, является ли элемент материнским или дочерним,
- о состоянии элемента (стабильное, основное, метастабильное),
- об i -том предшественнике по β -распаду:
 - его номер в БД,
 - вероятность его распада,
- об j -том предшественнике по (n, γ) -реакции:
 - его номер в БД,
 - вероятность его распада.

Таким образом, если в цепочку входит N нуклидов, то каждый i -тый нуклид (где $i=1,2,3, \dots, N$) будет иметь структуру типа Данные_о_элементе. Нужно заметить, что у i -го нуклида может не быть вообще предшественников ни по β -распаду, ни по (n, γ) -реакции. Рассмотрим на примере:



Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

2.2.3 Задание режима работы реактора

После выбора цепочки необходимо указать мощность работы реактора и режим облучения (рис. 1,2). При выборе непрерывного режима нужно только задать продолжительность облучения в сутках и мощность работы реактора.

При выборе дискретного режима необходимо указать:

- количество остановок;
- продолжительность каждой остановки;
- количество интервалов работы реактора;
- мощность ТВС на каждом интервале работы.

Причем, после интервала работы реактора на одной мощности далее может идти следующий интервал работы уже на другой мощности, т.е. остановка между этими интервалами будет равна 0 суток. В данной работе использовался непрерывный режим облучения, с мощностью и загрузкой, соответствующей одной из последних кампаний реактора.

На данном этапе нужно также указать характеристики облучаемого топлива (температуру нейтронов, эпитепловой индекс, нейтронное эффективное микросечение деления и поглощения U-235) как функции выгорания U-235. В качестве примера в таблице 1 приведены такие функции. Они используются для нахождения коэффициентов $b_i, b_5, \tilde{\sigma}_i^o$ (см. уравнения 16,20) путем аппроксимации заданной табличной функции по методу наименьших квадратов.

Таблица 1 – Входные реакторные параметры

	0	0,2	0,35	0,5	0,7
Δ_5					
T_H	422,43	404,87	380,27	356,36	339,64
r	0,0762	0,064	0,0461	0,0277	0,0142
g_f	0,9194	0,9205	0,9222	0,9241	0,9255
g_a	0,9284	0,9292	0,9305	0,9318	0,9329

2.2.4 Расчет концентрации

Прежде чем приступить к непосредственному расчету концентрации необходимо все заданные переменные привести к нужному виду, т.е.

- к таблично заданной функции применить аппроксимацию по методу наименьших квадратов;
- к полученной системе уравнений применить метод Гаусса для нахождения коэффициентов полиномиальной аппроксимации;
- зная информацию о каждом нуклиде сформировать систему дифференциальных уравнений;
- решить полученную систему дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты-Мерсона.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		27

2.2.4.1 Аппроксимация полиномом по методу наименьших квадратов

В общем случае нужно найти коэффициенты полинома:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$$

из решения системы уравнений

$$c_0a_0 + c_1a_1 + \dots + c_ma_m = b_0,$$

$$c_1a_0 + c_2a_1 + \dots + c_{m+1}a_m = b_1,$$

.....

$$c_ma_0 + c_{m+1}a_1 + \dots + c_{2m}a_m = b_m,$$

где

$$c_j = \sum_{i=1}^N x_i^j, \quad j=0,1,2,\dots,2m \quad (26)$$

$$b_k = \sum_{i=1}^N x_i^k y_i, \quad k=0,1,2,\dots,m \quad (27)$$

Таким образом, с помощью (26) и (27) вычисляются коэффициенты и полученная система линейных уравнений решается методом Гаусса.

2.2.4.2 Метод Гаусса

Для решения системы уравнений, полученной при вычислении (26,27), воспользуемся методом Гаусса. Но в начале, для удобства вычислений, введем новую матрицу $d(i,j)=c(k)$.

Алгоритм решения системы примет вид:

1. Проводим прямой ход исключения переменных по формулам

$$d_{ji} = -\frac{d_{ji}}{d_{ii}}; \quad d_{jk} = d_{jk} + d_{ji}d_{ik}; \quad b_j = b_j + d_{ji}b_i, \quad \text{где}$$
$$i = 1, 2, \dots, n-1; \quad j = i+1, i+2, \dots, n; \quad k = i+1, i+2, \dots, i+n.$$

В конце этих преобразований получаем

$$a_n = \frac{b_n}{d_{nn}}$$

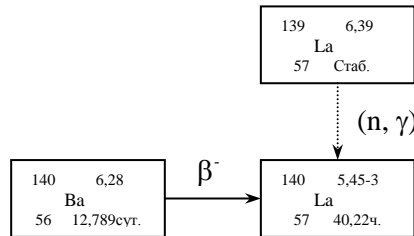
2. Организуем обратный ход, проводя вычисления по формулам

$$h = b_i; \quad h = h - a_j d_{ji}; \quad a_i = \frac{h}{d_{ii}}, \quad \text{где}$$
$$i = n-1, n-2, \dots, 1; \quad j = i+1, i+2, \dots, n$$

В результате получен массив неизвестных $a(i)$.

2.2.4.3 Формирование системы уравнений

В данной части программы по заданной цепочке происходит формирование системы дифференциальных уравнений. Рассмотрим алгоритм на конкретном примере. Пусть дана следующая цепочка радиоактивных превращений:



Тогда, для каждого нуклида, в общем случае, уравнение накопления и выгорания будет выглядеть:

$$\frac{dN_1}{dt} = X_1 n \nu \sigma_{f5} N_5 - n \nu \sigma_1 N_1 - \lambda_1 N_1, \quad (n, \gamma) \text{ реакция}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = X_2 n \nu \sigma_{f5} N_5 - n \nu \sigma_2 N_2 - \lambda_2 N_2, \quad \beta\text{-распад}$$

$$\frac{dN_3}{dt} = X_3 n \nu \sigma_{f5} N_5 - n \nu \sigma_3 N_3 - \lambda_3 N_3 + \lambda_2 N_2 + n \nu \sigma_1 N_1,$$

Получится система дифференциальных уравнений для заданной цепочки:

$$\frac{dN_1}{dt} = X_1 n \nu \sigma_{f5} N_5 - n \nu \sigma_1 N_1 - \lambda_1 N_1,$$

$$\frac{dN_2}{dt} = X_2 n \nu \sigma_{f5} N_5 - n \nu \sigma_2 N_2 - \lambda_2 N_2,$$

$$\frac{dN_3}{dt} = X_3 n \nu \sigma_{f5} N_5 - n \nu \sigma_3 N_3 - \lambda_3 N_3 + \lambda_2 N_2 + n \nu \sigma_1 N_1,$$

Для формирования каждого уравнения используется информация об элементе. Т.е. если рассмотреть данную цепочку, то для ^{139}La информация выглядит:

- его номер в БД – 63;
- количество предшественников по β -распаду – 0;
- количество предшественников по (n, γ)-реакции – 0;
- является ли элемент материнским или дочерним – m;
- состояние элемента – стаб.;

Для ^{140}Ba информация выглядит:

- номер в БД – 62;
- количество предшественников по β -распаду – 0;
- количество предшественников по (n, γ)-реакции – 0;
- является ли элемент материнским или дочерним – m;
- состояние элемента – осн.;

Для ^{140}La информация выглядит:

- его номер в БД – 64;
- количество предшественников по β -распаду – 1;
- количество предшественников по (n, γ)-реакции – 1;
- является ли элемент материнским или дочерним – d;
- состояние элемента – осн.;
- предшественник по β -распаду:
 - его номер в БД – 62;
 - вероятность его распада – 1;
- предшественник по (n, γ)-реакции:
 - его номер в БД – 63;
 - вероятность его распада – 1.

Таким образом, используя информацию о каждом нуклиде, формируют системы дифференциальных уравнений, которые решаются методом Рунге-Кутта-Мерсона. Рассмотрим этот алгоритм.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		31

2.2.4.4 Метод Рунге-Кутта-Мерсона

Этот метод реализуется следующим алгоритмом:

1. Задаем число уравнений N , погрешность $\varepsilon=E$, начальный шаг интегрирования $h=H$, и начальное значение $x_0, y_{10}, \dots, y_{n0}$.
2. С помощью пяти циклов с управляющей переменной $j=1, 2, \dots, N$ вычисляем коэффициенты:

$$k_{0j} = hF_j(x_i, y_{ji});$$

$$k_{1j} = hF_j\left(x_i + \frac{1}{3}h; y_{ji} + \frac{1}{3}k_{0j}\right);$$

$$k_{2j} = hF_j\left(x_i + \frac{1}{3}h; y_{ij} + \frac{1}{6}k_{0j} + \frac{1}{6}k_{1j}\right);$$

$$k_{3j} = hF_j\left(x_i + \frac{1}{2}h; y_{ij} + \frac{1}{8}k_{0j} + \frac{3}{8}k_{2j}\right);$$

$$k_{4j} = hF_j\left(x_i + h; y_{ij} + \frac{1}{2}k_{0j} - \frac{3}{2}k_{2j} + 2k_{3j}\right);$$

3. Находим (в последнем цикле) значение

$$y_{j(i+1)} = y_{ji} + (k_{0j} + 4k_{3j} + k_{4j})/6$$

и погрешность

$$R_{j(i+1)} = (-2k_{0j} + 9k_{2j} - 8k_{3j} + k_{4j})/30.$$

4. Проверяем выполнение условий

$$|R_{j(i+1)}| \leq E, \quad |R_{j(i+1)}| \geq E/30.$$

Если первое условие не выполняется, делим шаг h на 2 и повторяем вычисления с п.2, восстановив начальные значения y_{ji} . Если это условие выполняется и выполняется второе условие, значение $y_{j(i+1)}$ выводится на печать. Если второе условие не выполняется, шаг h увеличивается вдвое и вычисления опять повторяются с п.2. Таким образом, $y_{j(i+1)}$ выводится на печать только при одновременном выполнении условий этого пункта.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		32

В итоге можно сделать вывод, что по заданному режиму работы реактора, по выбранной цепочки радиоактивных превращений, используя описанные выше алгоритмы, рассчитывается концентрация накопленных продуктов деления (для каждого нуклида из цепочки). Полученные данные записываются в базу данных Concentration для дальнейшего расчета активности и МЭД. Далее рассмотрим основные положения при вычислении радиационных характеристик.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		33

2.2.5 Расчет активности и МЭД

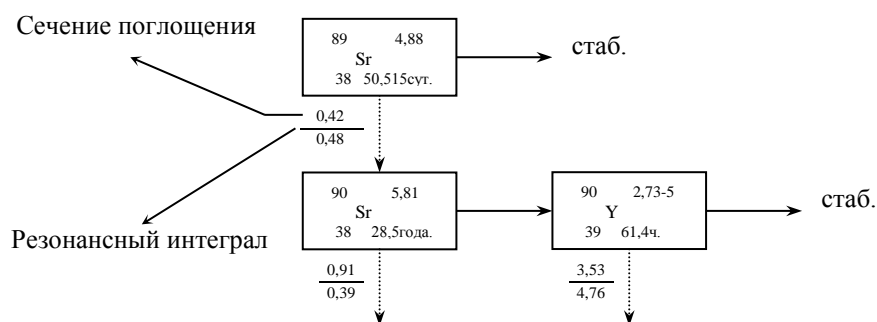
Для расчета радиационных характеристик необходимо прочесть данные о концентрации каждого нуклида, для заданной цепочки, из БД Concentration и по формулам (подробно будут рассмотрены в следующем разделе) вычислить активности и МЭД. Полученные данные записываются в соответствующие базы Activity и MED.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		34

2.2.6 Расчет накопления и радиационных характеристик долгоживущих продуктов деления в ТВС реактора с заданным нейтронным спектром и режимом работы.

Прежде чем приступить к непосредственному расчету, выберем цепочки радиоактивных превращений такие, чтобы:

- хотя бы один из входящих в цепочки нуклидов давал значимый вклад (значимые нуклиды) в активность облученной ТВС через 30 суток выдержки и более;
- период полураспада у нуклида был бы не менее пяти суток;
- из предшественников в цепочку включить те элементы, вклад которых в накопление значимых нуклидов превышает 1-2%, т.е. период полураспада предшественника больше либо равен 0.01, 0.02 от периода полураспада учитываемого нуклида.



Как уже говорилось выше, расчеты можно проводить для разных режимов облучения ТВС. Рассмотрим некоторые режимы. Сначала нужно указать характеристики облучаемого топлива (температуру нейтронов, эпитепловой индекс, нейтронное эффективное микросечение деления и поглощения U-235) как функции выгорания U-235. В таблице 2 приведены такие функции. В табл.3 рассмотрены пять режимов облучения ТВС, где для каждого варианта указана относительная мощность ТВС как для максимальной так, и для минимальной нагрузки, а также продолжительность кампании в сутках.

Таблица 2 – Пример таблично заданной функции

	0	0,2	0,35	0,5	0,7
T_n	422,43	404,87	380,27	356,36	339,64
r	0,0762	0,064	0,0461	0,0277	0,0142
g_f	0,9194	0,9205	0,9222	0,9241	0,9255
g_a	0,9284	0,9292	0,9305	0,9318	0,9329

Таблица 3 – Режим облучения ТВС

Q_{\min}	$Q_{\text{НОМ}}$
Q_{\max}	$Q_{\text{НОМ}}$
Продолжительность кампании	158 суток

Получив концентрацию каждого нуклида в цепочке радиоактивных превращений, далее рассчитывают радиационные характеристики.

Активность накопленного радиоактивного вещества определяется числом актов его распада, в единицу времени. Внесистемная единица активности – кюри – это активность такого количества радиоактивного вещества, в котором происходит $3,700E10$ распадов в 1 сек. Активность i -го нуклида рассчитывается по следующей формуле

$$A_i = \lambda_i N_i.$$

По определению, постоянная мощности экспозиционной дозы (гамма-постоянная) – это отношение мощности экспозиционной дозы (МЭД) фотонного излучения точечного источника данного радионуклида на расстоянии L от источника, умноженной на L^2 , и активности радионуклида A в источнике:

$$K_\gamma = \frac{MЭД}{A} L^2,$$

На единичном расстоянии от точечного источника

$$MЭД = AK_{\gamma}.$$

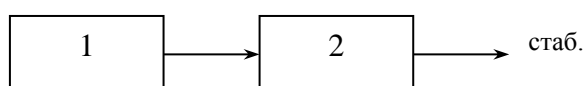
Все гамма-постоянные, постоянные распада, для каждого нуклида заведены в БД. При выборе цепочки они автоматически считываются для расчета характеристик продуктов деления.

Рассмотрим варианты схем распада ядерного топлива после прекращения облучения. Могут быть простые цепочки:

1. Материнский нуклид:

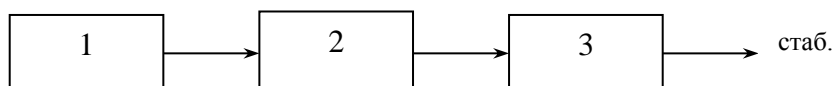


2. Материнский + дочерний:



$$A_2(t) = A_2(0)e^{-\lambda_2 t} + A_1(0)e^{-\lambda_1 t} \eta_{21}(t), \quad \text{где} \quad \eta_{21}(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}];$$

3. Материнский + дочерний + дочерний:

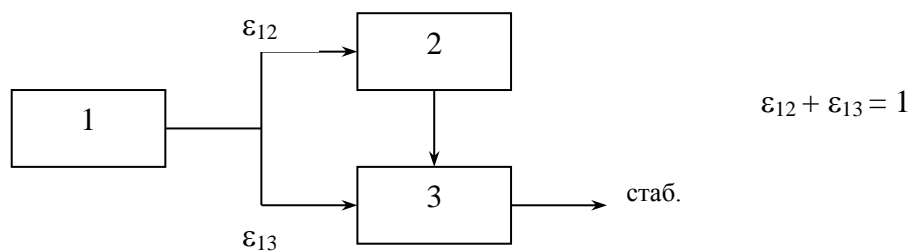


$$A_3(t) = A_3(0)e^{-\lambda_3 t} + A_2(0)e^{-\lambda_2 t} \eta_{32} + A_1(0)e^{-\lambda_1 t} \eta_{31}, \quad \text{где} \quad \eta_{32} = \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} [1 - e^{-(\lambda_3 - \lambda_2)t}]$$

$$\eta_{31} = \lambda_2 \lambda_1 \left[\frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \frac{e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-(\lambda_3 - \lambda_1)t}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right]$$

Цепочки с ветвлением:

4. Материнский + дочерний (2), материнский + дочерний (3), материнский + дочерний (2) + дочерний (3):



$$A_2(t) = A_2(0)e^{-\lambda_2 t} + A_1(0)e^{-\lambda_1 t} \varepsilon_{12} \eta_{21},$$

$$A_3(t) = A_3(0)e^{-\lambda_3 t} + A_1(0)e^{-\lambda_1 t} \varepsilon_{13} \eta_{31}^{(2)} + A_2(0)e^{-\lambda_2 t} \eta_{23}^{(2)} + A_1(0)e^{-\lambda_1 t} \varepsilon_{12} \eta_{31}^{(3)}.$$

где

$A_i(0)$ - активность i -го нуклида на момент конца кампании,

ε_{12} - вероятность распада первого нуклида во второй,

ε_{13} - вероятность распада первого нуклида в третий,

$\eta^{(2)}$ - соответствует простой двойной цепочке (2),

$\eta^{(3)}$ - соответствует простой тройной цепочке (3).

Результаты расчетов можно просмотреть в приложении 1, для концентрации (относительная концентрация) и активности (Кюри/(Кг·U-235)) на конец кампании для каждого нуклида и для МЭД (Рентген/(час·Кг·U-235 на расстоянии 1 см)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе были рассчитаны относительные концентрации и активности продуктов деления высокообогащенного топлива тяжеловодной реакторной установки ЛФ-2. Основным инструментом расчетов являлся программный комплекс АРР. Так же рассмотрены и подробно описаны математические и физические основы использованного программного комплекса. Были обновлены библиотеки ядерных материалов, в соответствии с последними существующими данными о продуктах деления урана-235.

Основное применение данная дипломная работа найдет на заводе по переработки ОТВС. Полученные данные помогут определить осколки которые имеют наибольший вклад в конечную активность переработанного топлива, выделить их, что поможет определиться с уменьшением затрат на хранение отходов ядерного производства.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		39

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. С. Глестон, М. Эдлунд *Основы теории ядерных реакторов*. – Москва, 1972.
2. А. Вейнберг, Е. Вигнер *Физическая теория ядерных реакторов*. – Москва, 1961.
3. А.К. Круглов, А.П. Рудик *Реакторное производство радиоактивных нуклидов*. – Москва: Энергоатомиздат, 1985.
4. А.Д. Галанин *Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах*. – Москва: Атомиздат, 1957.
5. Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев *Квантовое излучение радиоактивных нуклидов*. – Москва: Атомиздат, 1977.
6. Л.Р. Кимель, В.П. Машкович *Защита от ионизирующих излучений*. – Москва: Атомиздат, 1972.
7. А.С. Герасимов, Т.С. Зарицкая, А.П. Рудик *Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах*. – Москва: Энергоатомиздат, 1989.
8. В.М. Колобашкин, П.М. Рубцов, П.А. Ружанский, В.Д. Сидоренко *Радиационные характеристики облученного ядерного топлива*. – Москва: Энергоатомиздат, 1983.
9. А.Д. Галанин *Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах*. – Москва: Энергоатомиздат, 1984.
10. В.В. Аверкиев, Н.Н. Бегляков, Т.А. Горюн *Лабораторный практикум по экспериментальным методам ядерной физики*. – Москва: Энергоатомиздат, 1986.
11. Н.С. Бахвалов *Численные методы*. – Москва: Наука, 1965.
12. Е.А. Волков *Численные методы*. – Москва: Наука, 1982.
13. Г. Корн, Т. Корн *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. – Москва: Наука, 1984.
14. А.А. Самарский *Введение в численные методы*. – Москва: Наука, 1982.
15. Б.П. Демидович, И.А. Марон *Основы вычислительной математики*. – Москва: Наука, 1966.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		40

16. П.Н. Вабищевич *Численное моделирование*. – Москва: Издательство Московского университета, 1993.

17. В.П. Дьяконов *Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ*. – Москва: Наука, 1987.

18. Т. Щуп *Решение инженерных задач на ЭВМ*. – Москва: Мир, 1982.

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		41

Приложение А

(справочное)

Результаты расчетов относительной концентрации и активности продуктов деления урана-235

Таблица А.1 – цепочка 1.

время после остановки	Элемент	Kr	Kr	Kr	Kr
	А	83	84	85	85
	Z	36	36	36	36
	состояние	стаб.	осн.	м	осн.
0 суток	Концентрация	1,953E-03	4,190E-03	8,291E-06	2,510E-03
	Активность	0	0	2,467E+04	3,557E+02
30 суток	Концентрация	1,953E-03	4,190E-03	0	2,497E-03
	Активность	0	0	0	3,539E+02
90 суток	Концентрация	1,953E-03	4,190E-03	0	2,471E-03
	Активность	0	0	0	3,501E+02
365 суток	Концентрация	1,953E-03	4,190E-03	0	2,353E-03
	Активность	0	0	0	3,335E+02
548 суток	Концентрация	1,953E-03	4,190E-03	0	2,279E-03
	Активность	0	0	0	3,229E+02
730 суток	Концентрация	1,953E-03	4,190E-03	0	2,206E-03
	Активность	0	0	0	3,127E+02
1095 суток	Концентрация	1,953E-03	4,190E-03	0	2,069E-03
	Активность	0	0	0	2,931E+02

Таблица А.2 – цепочка 2.

время после остановки	Элемент	Sr	Sr	Y
	А	89	90	90
	Z	38	38	39
	состояние	осн.	осн.	осн.
0 суток	Концентрация	8,307E-03	2,325E-02	5,581E-06
	Активность	9,135E+04	1,242E+03	1,212E+03
30 суток	Концентрация	5,504E-03	2,321E-02	1,650E-09
	Активность	6,053E+04	1,239E+03	3,583E-01
90 суток	Концентрация	2,417E-03	2,311E-02	1,442E-16
	Активность	2,658E+04	1,234E+03	3,131E-08
365 суток	Концентрация	5,556E-05	2,269E-02	0
	Активность	6,110E+02	1,212E+03	0
548 суток	Концентрация	4,513E-06	2,242E-02	0
	Активность	4,963E+01	1,197E+03	0
730 суток	Концентрация	3,716E-07	2,215E-02	0
	Активность	4,087E+00	1,183E+03	0
1095 суток	Концентрация	2,486E-09	2,162E-02	0
	Активность	2,734E-02	1,154E+03	0

Таблица А.3 – цепочка 3.

время после остановки	Элемент	Sr	Y
	A	91	91
	Z	38	39
	состояние	осн.	осн.
0 суток	Концентрация	9,091E-05	4,736E-03
	Активность	1,278E+05	4,497E+04
30 суток	Концентрация	1,260E-27	3,320E-03
	Активность	1,772E-18	3,152E+04
90 суток	Концентрация	0	1,631E-03
	Активность	0	1,549E+04
365 суток	Концентрация	0	6,280E-05
	Активность	0	5,962E+02
548 суток	Концентрация	0	7,188E-06
	Активность	0	6,825E+01
730 суток	Концентрация	0	8,326E-07
	Активность	0	7,905E+00
1095 суток	Концентрация	0	1,104E-08
	Активность	0	1,048E-01

Таблица А.4 – цепочка 4.

время после остановки	Элемент	Zr	Zr	Zr	Nb
	A	93	94	95	95
	Z	40	40	40	41
	состояние	осн.	стаб.	осн.	осн.
0 суток	Концентрация	2,593E-02	2,546E-02	1,283E-02	5,484E-03
	Активность	2,579E-02	0	1,114E+05	8,666E+04
30 суток	Концентрация	2,593E-02	2,546E-02	9,273E-03	3,035E-03
	Активность	2,579E-02	0	8,051E+04	4,797E+04
90 суток	Концентрация	2,593E-02	2,546E-02	4,841E-03	9,299E-04
	Активность	2,579E-02	0	4,204E+04	1,470E+04
365 суток	Концентрация	2,593E-02	2,546E-02	2,462E-04	4,110E-06
	Активность	2,579E-02	0	2,138E+03	6,495E+01
548 суток	Концентрация	2,593E-02	2,546E-02	3,392E-05	1,114E-07
	Активность	2,579E-02	0	2,945E+02	1,761E+00
730 суток	Концентрация	2,593E-02	2,546E-02	4,725E-06	3,080E-09
	Активность	2,579E-02	0	4,102E+01	4,868E-02
1095 суток	Концентрация	2,593E-02	2,546E-02	9,065E-08	2,308E-12
	Активность	2,579E-02	0	7,871E-01	3,648E-05

Таблица А.5 – цепочка 5.

время после останов- ки	Элемент	Ru	Ru	Ru	Rh	Ru	Ru	Ru
	A	101	102	103	103	104	105	106
	Z	44	44	44	45	44	44	44
	состоя- ние	стаб.	стаб.	осн.	м	стаб.	осн.	осн.
0 суток	Концен- трация	2,01E-02	1,69E-02	4,27E-03	4,22E-06	7,29E-03	6,93E-06	1,38E-03
	Актив- ность	0,00E+00	0,00E+00	6,03E+04	6,02E+04	0	2,08E+04	2,09E+03
30 суток	Концен- трация	2,01E-02	1,69E-02	2,52E-03	0	7,29E-03	0	1,31E-03
	Актив- ность	0,00E+00	0,00E+00	3,56E+04	0	0	0	1,97E+03
90 суток	Концен- трация	2,01E-02	1,69E-02	8,76E-04	0	7,29E-03	0	1,17E-03
	Актив- ность	0,00E+00	0,00E+00	1,24E+04	0	0	0	1,76E+03
365 су- ток	Концен- трация	2,01E-02	1,69E-02	6,90E-06	0	7,29E-03	0	6,97E-04
	Актив- ность	0,00E+00	0,00E+00	9,75E+01	0	0	0	1,05E+03
548 су- ток	Концен- трация	2,01E-02	1,69E-02	2,75E-07	0	7,29E-03	0	4,94E-04
	Актив- ность	0,00E+00	0,00E+00	3,88E+00	0	0	0	7,45E+02
730 су- ток	Концен- трация	2,01E-02	1,69E-02	1,12E-08	0	7,29E-03	0	3,51E-04
	Актив- ность	0,00E+00	0,00E+00	1,57E-01	0	0	0	5,29E+02
1095 су- ток	Концен- трация	2,01E-02	1,69E-02	1,80E-11	0	7,29E-03	0	1,76E-04
	Актив- ность	0,00E+00	0,00E+00	2,54E-04	0	0	0	2,66E+02

Таблица А.6 – цепочка 6.

вермя после останов- ки	Элемент	I	I	I	Xe	Xe	Xe	I
	A	129	130	131	131	131	132	133
	Z	53	53	53	54	54	54	53
	состоя- ние	осн.	осн.	осн.	м	стаб.	стаб.	осн.
0 суток	Концен- трация	3,00E-03	6,16E-07	7,73E-04	1,25E-05	8,54E-03	1,77E-02	2,24E-04
	Актив- ность	2,91E-04	6,65E+02	5,34E+04	5,80E+02	0	0	1,44E+05
30 суток	Концен- трация	3,00E-03	1,81E-24	5,82E-05	2,21E-06	8,54E-03	1,77E-02	8,55E-15
	Актив- ность	2,91E-04	1,95E-15	4,02E+03	1,02E+02	0	0	5,48E-06
90 суток	Концен- трация	3,00E-03	0	3,31E-07	6,86E-08	8,54E-03	1,77E-02	1,25E-35
	Актив- ность	2,91E-04	0	2,28E+01	3,18E+00	0	0	7,99E-27
365 су- ток	Концен- трация	3,00E-03	0	1,68E-17	8,47E-15	8,54E-03	1,77E-02	0
	Актив- ность	2,91E-04	0	1,16E-09	3,93E-07	0	0	0
548 су- ток	Концен- трация	3,00E-03	0	2,37E-24	2,14E-19	8,54E-03	1,77E-02	0
	Актив- ность	2,91E-04	0	1,64E-16	9,92E-12	0	0	0
730 су- ток	Концен- трация	3,00E-03	0	3,65E-31	5,73E-24	8,54E-03	1,77E-02	0
	Актив- ность	2,91E-04	0	2,52E-23	2,66E-16	0	0	0
1095 су- ток	Концен- трация	3,00E-03	0	0	3,88E-33	8,54E-03	1,77E-02	0
	Актив- ность	2,91E-04	0	0	1,80E-25	0	0	0

Продолжение таблицы А.6

вермя после останов- ки	Элемент	Xe	Xe	Cs	Cs	Cs	Cs	Cs
	A	133	133	133	134	135	136	137
	Z	54	54	55	55	55	55	55
	состояние	м	осн.	стаб.	осн.	осн.	осн.	осн.
0 суток	Концентра- ция	8,12E-06	1,34E-03	2,41E-02	6,11E-04	3,27E-05	1,23E-06	2,49E-02
	Активность	2,06E+03	1,42E+05	0	4,51E+02	2,16E-05	5,26E+01	1,26E+03
30 суток	Концентра- ция	6,14E-10	2,54E-05	2,41E-02	5,94E-04	3,27E-05	2,47E-07	2,49E-02
	Активность	1,56E-01	2,69E+03	0	4,39E+02	2,16E-05	1,06E+01	1,25E+03
90 суток	Концентра- ция	3,51E-18	9,18E-09	2,41E-02	5,62E-04	3,27E-05	1,01E-08	2,48E-02
	Активность	8,91E-10	9,72E-01	0	4,15E+02	2,16E-05	4,30E-01	1,25E+03

					ФЮРА.693000.004 ПЗ	Лист
						45
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Продолжение таблицы А.6

время после остановки	Элемент	Xe	Xe	Cs	Cs	Cs	Cs	Cs
	A	133	133	133	134	135	136	137
	Z	54	54	55	55	55	55	55
состояние	м	осн.	стаб.	осн.	осн.	осн.	осн.	осн.
365 суток	Концентрация	0	1,52E-24	2,41E-02	4,37E-04	3,27E-05	4,23E-15	2,43E-02
	Активность	0	1,61E-16	0	3,22E+02	2,16E-05	1,81E-07	1,23E+03
548 суток	Концентрация	0	4,81E-35	2,41E-02	3,69E-04	3,27E-05	2,41E-19	2,41E-02
	Активность	0	5,09E-27	0	2,72E+02	2,16E-05	1,03E-11	1,21E+03
730 суток	Концентрация	0	0	2,41E-02	3,12E-04	3,27E-05	1,45E-23	2,38E-02
	Активность	0	0	0	2,30E+02	2,16E-05	6,23E-16	1,20E+03
1095 суток	Концентрация	0	0	2,41E-02	2,23E-04	3,27E-05	5,01E-32	2,33E-02
	Активность	0	0	0	1,65E+02	2,16E-05	2,14E-24	1,17E+03

Таблица А.7 – цепочка 7.

время после остановки	Элемент	La	Ba	La
	A	139	140	140
	Z	57	56	57
	состояние	стаб.	осн.	осн.
0 суток	Концентрация	2,529E-02	3,099E-03	4,110E-04
	Активность	0	1,346E+05	1,362E+05
30 суток	Концентрация	2,529E-02	6,099E-04	1,683E-09
	Активность	0	2,649E+04	5,578E-01
90 суток	Концентрация	2,529E-02	2,362E-05	2,822E-20
	Активность	0	1,026E+03	9,354E-12
365 суток	Концентрация	2,529E-02	7,973E-12	0
	Активность	0	3,463E-04	0
548 суток	Концентрация	2,529E-02	3,936E-16	0
	Активность	0	1,710E-08	0
730 суток	Концентрация	2,529E-02	2,051E-20	0
	Активность	0	8,910E-13	0
1095 суток	Концентрация	2,529E-02	5,277E-29	0
	Активность	0	2,292E-21	0

Таблица А.8 – цепочка 8.

вермя после остановки	Элемент	Ce	Pr	Pr	Ce	Pr	Ce
	A	141	141	142	143	143	144
	Z	58	59	59	58	59	58
	состояние	осн.	стаб.	осн.	осн.	осн.	осн.
0 суток	Концентрация	6,958E-03	1,600E-02	2,380E-06	3,159E-04	3,072E-03	1,825E-02
	Активность	1,189E+05	0	1,659E+03	1,276E+05	1,257E+05	3,566E+04
30 суток	Концентрация	3,670E-03	1,600E-02	1,120E-17	8,570E-11	6,646E-04	1,696E-02
	Активность	6,273E+04	0	7,803E-09	3,462E-02	2,719E+04	3,315E+04
90 суток	Концентрация	1,021E-03	1,600E-02	0	6,308E-24	3,110E-05	1,466E-02
	Активность	1,745E+04	0	0	2,549E-15	1,272E+03	2,864E+04
365 суток	Концентрация	2,900E-06	1,600E-02	0	0	2,501E-11	7,497E-03
	Активность	4,957E+01	0	0	0	1,023E-03	1,465E+04
548 суток	Концентрация	5,858E-08	1,600E-02	0	0	2,200E-15	4,799E-03
	Активность	1,001E+00	0	0	0	8,999E-08	9,378E+03
730 суток	Концентрация	1,209E-09	1,600E-02	0	0	2,036E-19	3,080E-03
	Активность	2,066E-02	0	0	0	8,330E-12	6,018E+03
1095 суток	Концентрация	5,038E-13	1,600E-02	0	0	1,658E-27	1,265E-03
	Активность	8,611E-06	0	0	0	6,782E-20	2,472E+03

Таблица А.9 – цепочка 9.

вермя после остановки	Элемент	Eu	Eu	Eu	Eu	Eu	Sm	Eu
	A	151	152	153	154	155	156	156
	Z	63	63	63	63	63	62	63
	состояние	стаб.	осн.	стаб.	осн.	осн.	осн.	осн.
0 суток	Концентрация	1,64E-04	7,69E-05	1,31E-03	8,37E-05	4,00E-05	2,00E-07	3,53E-05
	Активность	0	9,44E+00	0	1,50E+01	1,50E+01	2,83E+02	1,29E+03
30 суток	Концентрация	1,64E-04	7,66E-05	1,31E-03	8,32E-05	3,94E-05	1,77E-30	8,98E-06
	Активность	0	9,40E+00	0	1,49E+01	1,48E+01	2,51E-21	3,29E+02
90 суток	Концентрация	1,64E-04	7,59E-05	1,31E-03	8,21E-05	3,83E-05	0	5,82E-07
	Активность	0	9,31E+00	0	1,47E+01	1,44E+01	0	2,13E+01

Продолжение таблицы А.9

вермя после остановки	Элемент	Eu	Eu	Eu	Eu	Eu	Sm	Eu
	A	151	152	153	154	155	156	156
	Z	63	63	63	63	63	62	63
	состояние	стаб.	осн.	стаб.	осн.	осн.	осн.	осн.
365 суток	Концентрация	1,64E-04	7,28E-05	1,31E-03	7,72E-05	3,37E-05	0	2,07E-12
	Активность	0	8,93E+00	0	1,38E+01	1,26E+01	0	7,57E-05
548 суток	Концентрация	1,64E-04	7,07E-05	1,31E-03	7,41E-05	3,09E-05	0	4,90E-16
	Активность	0	8,68E+00	0	1,33E+01	1,16E+01	0	1,79E-08
730 суток	Концентрация	1,64E-04	6,88E-05	1,31E-03	7,11E-05	2,84E-05	0	1,21E-19
	Активность	0	8,44E+00	0	1,27E+01	1,06E+01	0	4,44E-12
1095 суток	Концентрация	1,64E-04	6,51E-05	1,31E-03	6,56E-05	2,39E-05	0	7,12E-27
	Активность	0	7,98E+00	0	1,17E+01	8,97E+00	0	2,60E-19

Таблица А.10 – цепочка 10.

вермя после остановки	Элемент	Tb	Tb	Tb
	A	159	160	161
	Z	65	65	65
	состояние	стаб.	осн.	осн.
0 суток	Концентрация	4,073E-06	6,101E-08	2,493E-08
	Активность	0	4,688E-01	2,004E+00
30 суток	Концентрация	4,073E-06	4,577E-08	1,230E-09
	Активность	0	3,516E-01	9,892E-02
90 суток	Концентрация	4,073E-06	2,575E-08	2,997E-12
	Активность	0	1,978E-01	2,410E-04
365 суток	Концентрация	4,073E-06	1,845E-09	3,156E-24
	Активность	0	1,418E-02	2,537E-16
548 суток	Концентрация	4,073E-06	3,193E-10	3,377E-32
	Активность	0	2,454E-03	2,715E-24
730 суток	Концентрация	4,073E-06	5,580E-11	0
	Активность	0	4,287E-04	0
1095 суток	Концентрация	4,073E-06	1,687E-12	0
	Активность	0	1,297E-05	0

Таблица А.11 – цепочка 11.

время после остановки	Элемент	Sn	Sb	Sb	Sn	Sn
	A	121	121	122	122	123
Z	50	51	51	50	50	
состояние	осн.	стаб.	осн.	стаб.	осн.	
0 суток	Концентрация	5,877E-07	5,249E-05	2,505E-09	5,010E-05	3,966E-06
	Активность	2,896E+02	0	5,441E+00	0	1,705E+01
30 суток	Концентрация	5,770E-15	5,249E-05	0	5,010E-05	3,376E-06
	Активность	2,843E-06	0	0	0	1,452E+01
90 суток	Концентрация	5,562E-31	5,249E-05	0	5,010E-05	2,447E-06
	Активность	2,741E-22	0	0	0	1,052E+01
365 суток	Концентрация	0	5,249E-05	0	5,010E-05	5,599E-07
	Активность	0	0	0	0	2,407E+00
548 суток	Концентрация	0	5,249E-05	0	5,010E-05	2,098E-07
	Активность	0	0	0	0	9,020E-01
730 суток	Концентрация	0	5,249E-05	0	5,010E-05	7,904E-08
	Активность	0	0	0	0	3,398E-01
1095 суток	Концентрация	0	5,249E-05	0	5,010E-05	1,116E-08
	Активность	0	0	0	0	4,797E-02

Продолжение таблицы А.11

время после остановки	Элемент	Sb	Sb	Sn	Sb	Te
	A	123	124	125	125	125
Z	51	51	50	51	52	
состояние	стаб.	осн.	осн.	осн.	м	
0 суток	Концентрация	3,77E-05	5,66E-11	2,77E-08	1,50E-04	1,03E-06
	Активность	0	2,73E+00	2,14E+02	8,21E+01	9,86E+00
30 суток	Концентрация	3,77E-05	0	0	1,47E-04	7,19E-07
	Активность	0	0	0	8,05E+01	6,89E+00
90 суток	Концентрация	3,77E-05	0	0	1,41E-04	3,51E-07
	Активность	0	0	0	7,72E+01	3,36E+00
365 суток	Концентрация	3,77E-05	0	0	1,16E-04	1,31E-08
	Активность	0	0	0	6,40E+01	1,26E-01
548 суток	Концентрация	3,77E-05	0	0	1,03E-04	1,48E-09
	Активность	0	0	0	5,64E+01	1,41E-02
730 суток	Концентрация	3,77E-05	0	0	9,06E-05	1,68E-10
	Активность	0	0	0	4,98E+01	1,61E-03
1095 суток	Концентрация	3,77E-05	0	0	7,06E-05	2,14E-12
	Активность	0	0	0	3,88E+01	2,05E-05

Таблица А.12 – цепочка 12.

время после остановки	Элемент	Sb	Te	Te	Te	Te	Te
	A	127	127	127	128	129	129
	Z	51	52	52	52	52	52
	состояние	осн.	м	осн.	осн.	м	осн.
0 суток	Концентрация	8,341E-07	1,471E-05	1,544E-06	1,444E-03	1,042E-04	1,345E-06
	Активность	2,574E+03	7,497E+01	2,201E+03	1,465E+01	1,726E+03	1,546E+04
30 суток	Концентрация	0	1,216E-05	1,029E-29	1,443E-03	5,603E-05	0
	Активность	0	6,195E+01	1,468E-20	1,464E+01	9,285E+02	0
90 суток	Концентрация	0	8,300E-06	0	1,442E-03	1,621E-05	0
	Активность	0	4,230E+01	0	1,463E+01	2,686E+02	0
365 суток	Концентрация	0	1,445E-06	0	1,437E-03	5,502E-08	0
	Активность	0	7,363E+00	0	1,458E+01	9,118E-01	0
548 суток	Концентрация	0	4,513E-07	0	1,434E-03	1,251E-09	0
	Активность	0	2,300E+00	0	1,455E+01	2,074E-02	0
730 суток	Концентрация	0	1,419E-07	0	1,431E-03	2,906E-11	0
	Активность	0	7,231E-01	0	1,451E+01	4,816E-04	0
1095 суток	Концентрация	0	1,394E-08	0	1,424E-03	1,535E-14	0
	Активность	0	7,102E-02	0	1,445E+01	2,544E-07	0

Таблица А.13 – цепочка 13.

время после остановки	Элемент	Nd	Nd	Nd	Pm	Pm	Pm	Pm
	A	145	146	147	147	148	148	149
	Z	60	60	60	61	61	61	61
	состояние	стаб.	стаб.	осн.	осн.	м	осн.	осн.
0 суток	Концентрация	1,505E-02	1,229E-02	8,976E-04	6,332E-03	4,320E-05	4,752E-05	1,096E-04
	Активность	0	0	4,541E+04	3,674E+03	5,868E+02	4,916E+03	2,752E+04
30 суток	Концентрация	1,505E-02	1,229E-02	1,351E-04	6,196E-03	2,599E-05	9,897E-07	9,062E-09
	Активность	0	0	6,837E+03	3,595E+03	3,530E+02	1,024E+02	2,276E+00
90 суток	Концентрация	1,505E-02	1,229E-02	3,063E-06	5,932E-03	9,403E-06	4,293E-10	6,200E-17
	Активность	0	0	1,550E+02	3,442E+03	1,277E+02	4,441E-02	1,557E-08

Продолжение таблицы А.13

вермя после остановки	Элемент	Pm	Sm	Sm	Pm	Sm	Eu	Eu
	A	150	149	150	151	151	151	152
	Z	61	62	62	61	62	63	63
	состояние	осн.	осн.	стаб.	осн.	осн.	стаб.	осн.
365 суток	Концентрация	1,51E-02	1,23E-02	8,88E-14	4,86E-03	8,91E-08	1,66E-25	0
	Активность	0	0	4,49E-06	2,82E+03	1,21E+00	1,72E-17	0
548 суток	Концентрация	1,51E-02	1,23E-02	8,56E-19	4,26E-03	4,01E-09	9,20E-36	0
	Активность	0	0	4,33E-11	2,47E+03	5,45E-02	9,52E-28	0
730 суток	Концентрация	1,51E-02	1,23E-02	8,78E-24	3,73E-03	1,84E-10	0	0
	Активность	0	0	4,44E-16	2,17E+03	2,49E-03	0	0
1095 су- ток	Концентрация	1,51E-02	1,23E-02	8,68E-34	2,87E-03	3,78E-13	0	0
	Активность	0	0	4,39E-26	1,66E+03	5,14E-06	0	0

Продолжение таблицы А.13

вермя после останов- ки	Элемент	Pm	Sm	Sm	Pm	Sm	Eu	Eu
	A	150	149	150	151	151	151	152
	Z	61	62	62	61	62	63	63
	состояние	осн.	осн.	стаб.	осн.	осн.	стаб.	осн.
0 суток	Концентрация	2,27E-07	5,74E-05	4,26E-03	9,08E-08	3,27E-05	9,27E-09	3,95E-09
	Активность	1,13E+03	8,74E-14	0	4,26E+01	5,72E-01	0	4,85E-04
30 суток	Концентрация	0	5,74E-05	4,26E-03	2,13E-15	3,27E-05	9,27E-09	3,94E-09
	Активность	0	8,74E-14	0	9,99E-07	5,72E-01	0	4,83E-04
90 суток	Концентрация	0	5,74E-05	4,26E-03	1,17E-30	3,26E-05	9,27E-09	3,90E-09
	Активность	0	8,74E-14	0	5,49E-22	5,71E-01	0	4,79E-04
365 суток	Концентрация	0	5,74E-05	4,26E-03	0	3,24E-05	9,27E-09	3,74E-09
	Активность	0	8,74E-14	0	0	5,67E-01	0	4,59E-04
548 суток	Концентрация	0	5,74E-05	4,26E-03	0	3,23E-05	9,27E-09	3,64E-09
	Активность	0	8,74E-14	0	0	5,65E-01	0	4,46E-04
730 суток	Концентрация	0	5,74E-05	4,26E-03	0	3,22E-05	9,27E-09	3,54E-09
	Активность	0	8,74E-14	0	0	5,63E-01	0	4,34E-04

Лист

ФЮРА.693000.004 ПЗ

51

Изм. Лист № документа Подпись Дата

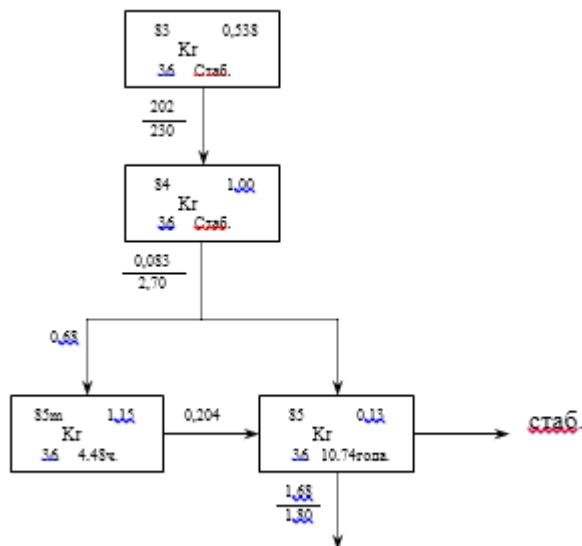
Продолжение таблицы А.13

время после остановки	Элемент	Pm	Sm	Sm	Pm	Sm	Eu	Eu
	A	150	149	150	151	151	151	152
Z	61	62	62	61	62	63	63	
состояние	осн.	осн.	стаб.	осн.	осн.	стаб.	осн.	
1095 су- ток	Концентрация	0	5,74E-05	4,26E-03	0	3,19E-05	9,27E-09	3,34E-09
	Активность	0	8,74E-14	0	0	5,58E-01	0	4,10E-04

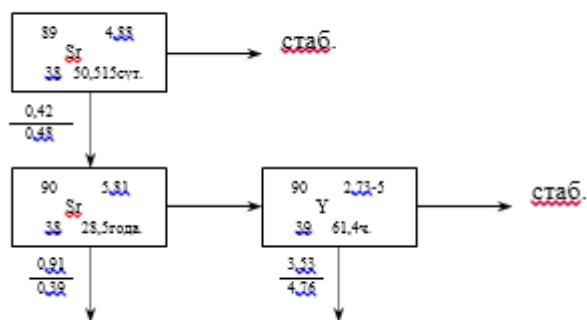
Приложение Б

(справочное)

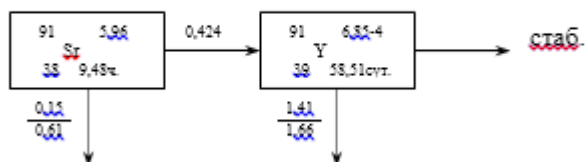
Цепочки радиоактивных превращений



Р и с у н о к Б.1 – цепочка 1



Р и с у н о к Б.2 – цепочка 2



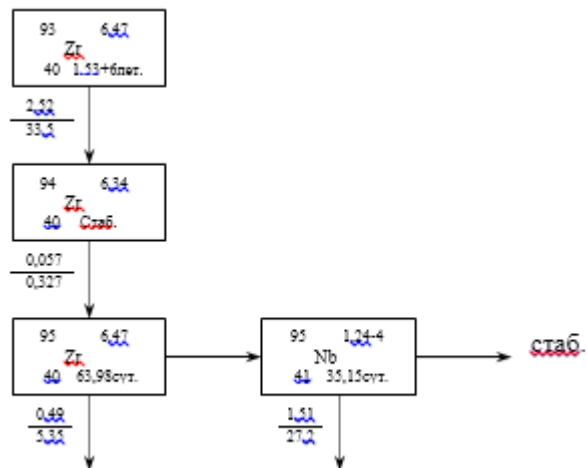
Р и с у н о к Б.3 – цепочка 3

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

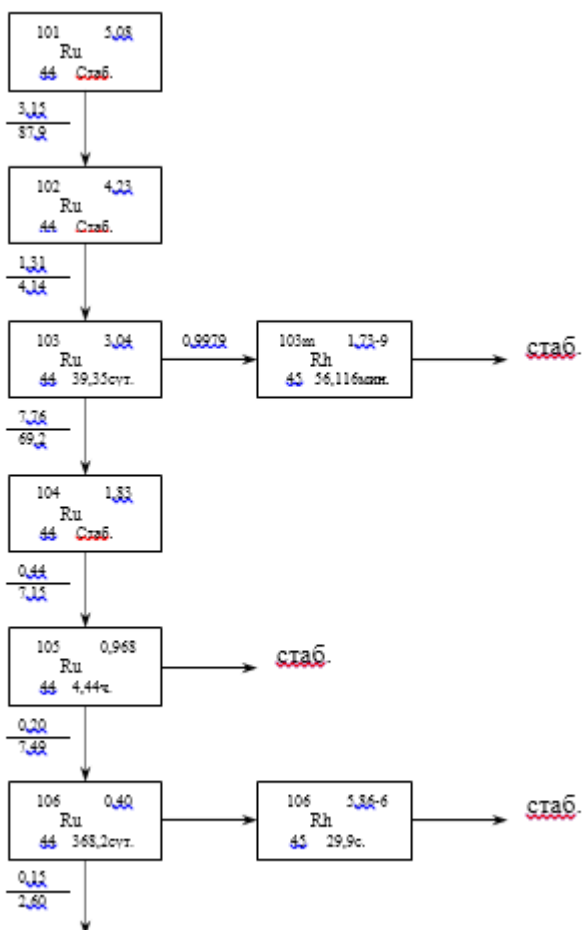
ФЮРА.693000.004 ПЗ

Лист

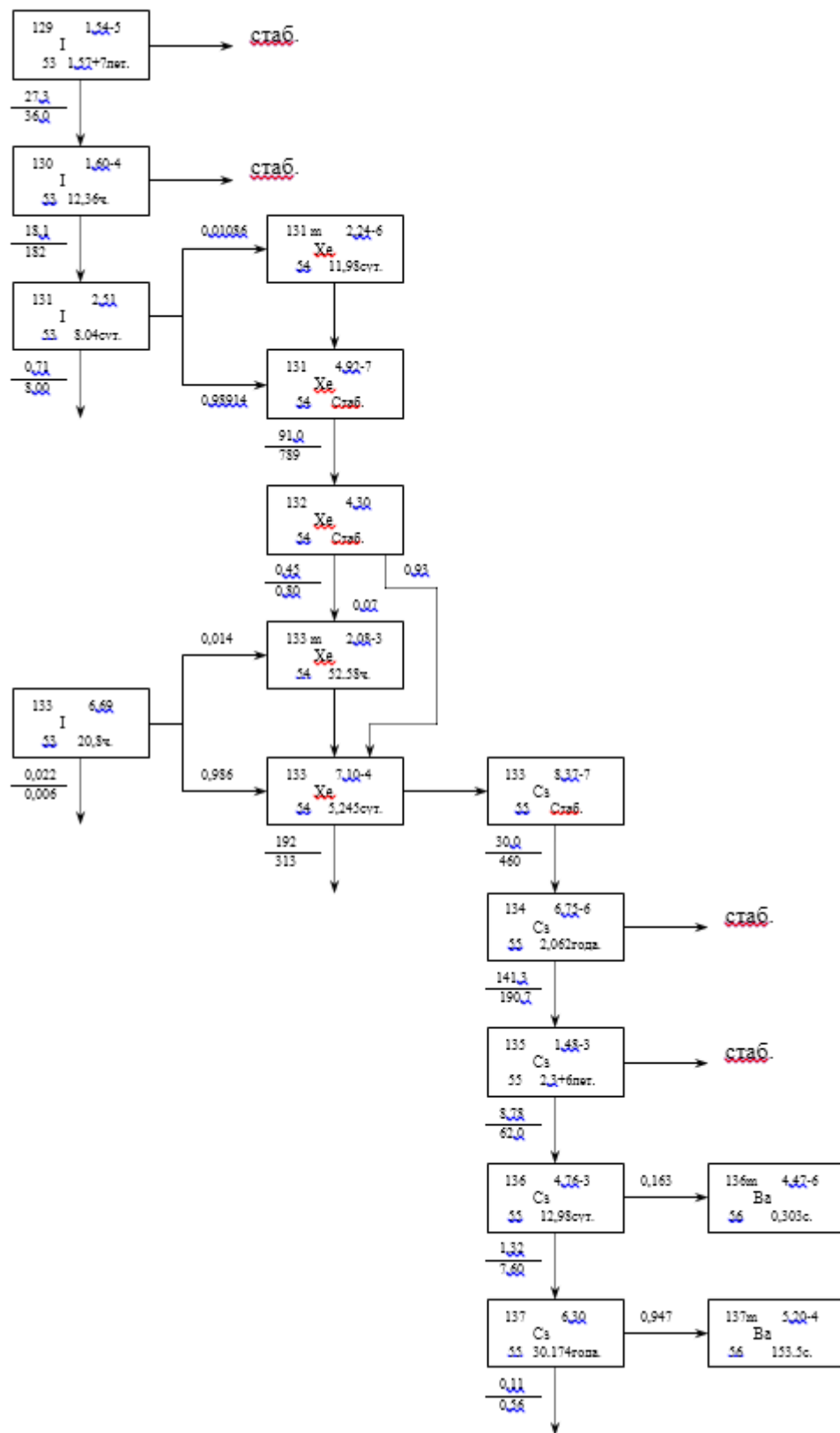
53



Р и с у н о к Б.4 – цепочка 4

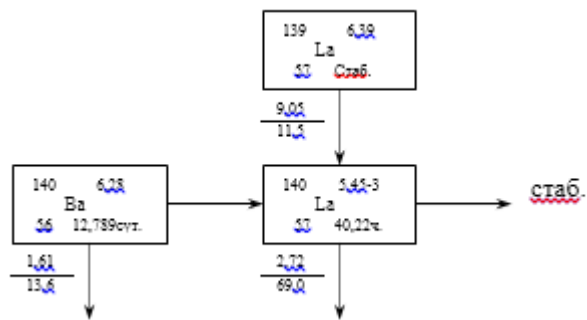


Р и с у н о к Б.5 – цепочка 5

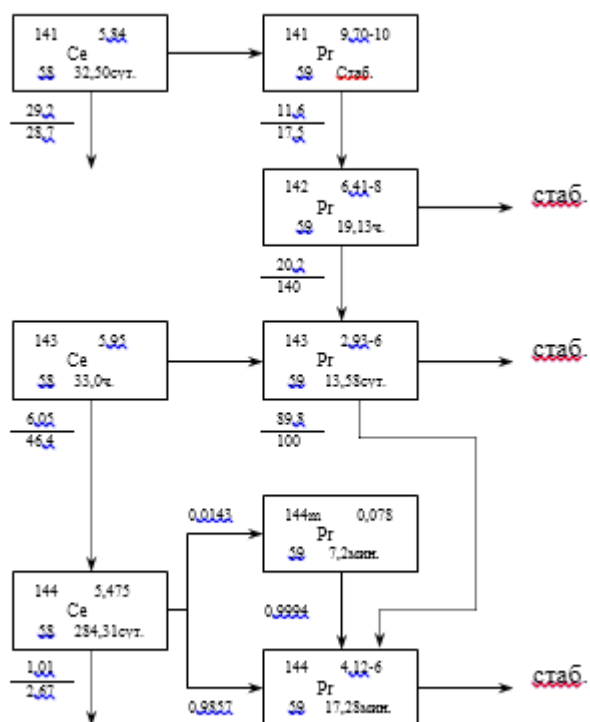


Р и с у н о к Б.6 – цепочка б

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

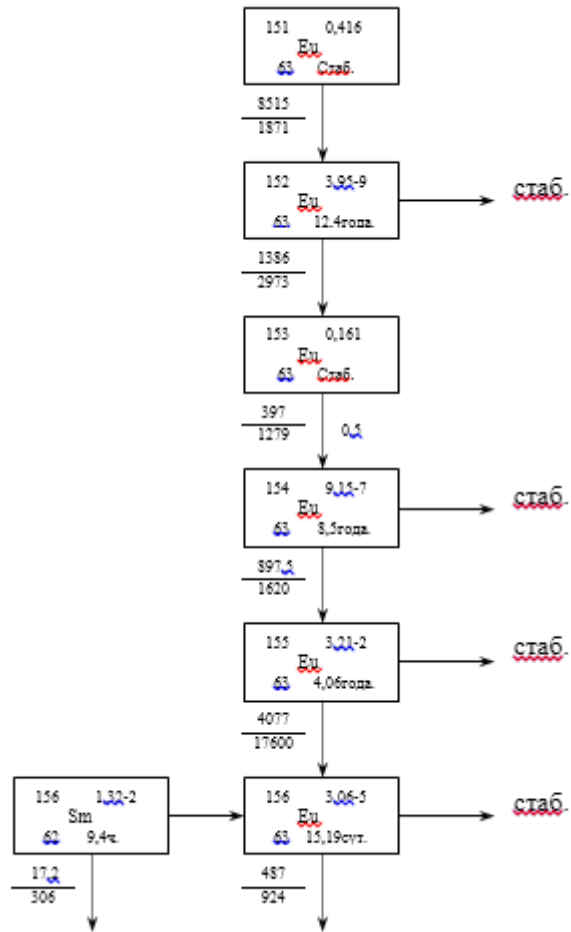


Р и с у н о к Б.7 – цепочка 7

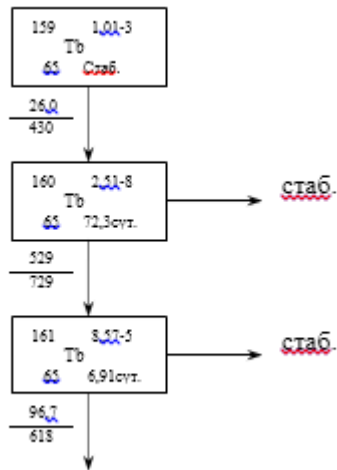


Р и с у н о к Б.8 – цепочка 8

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата



Р и с у н о к Б.9 – цепочка 9



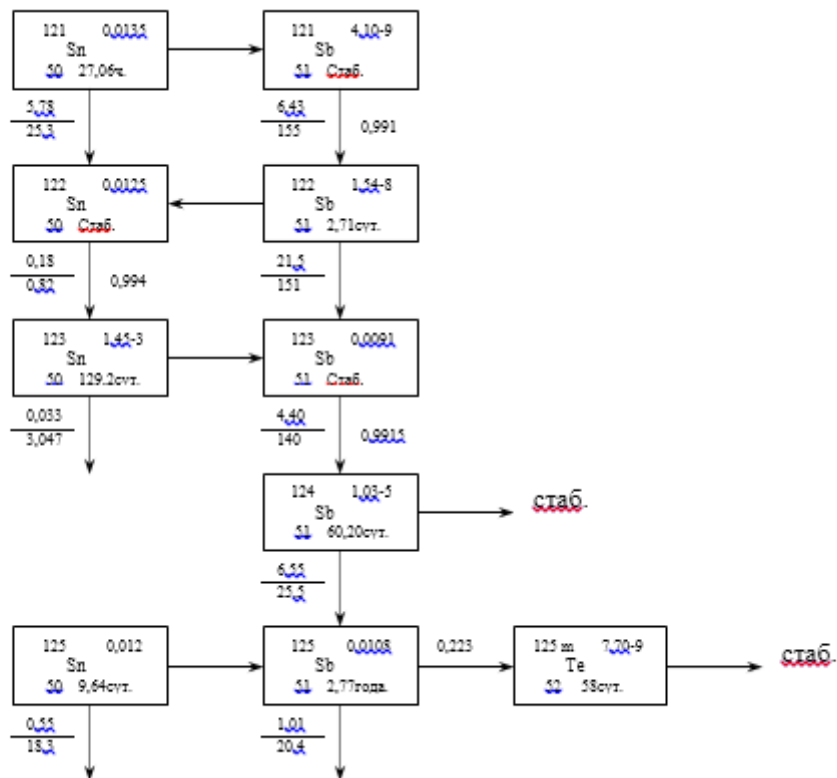
Р и с у н о к Б.10 – цепочка 10

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

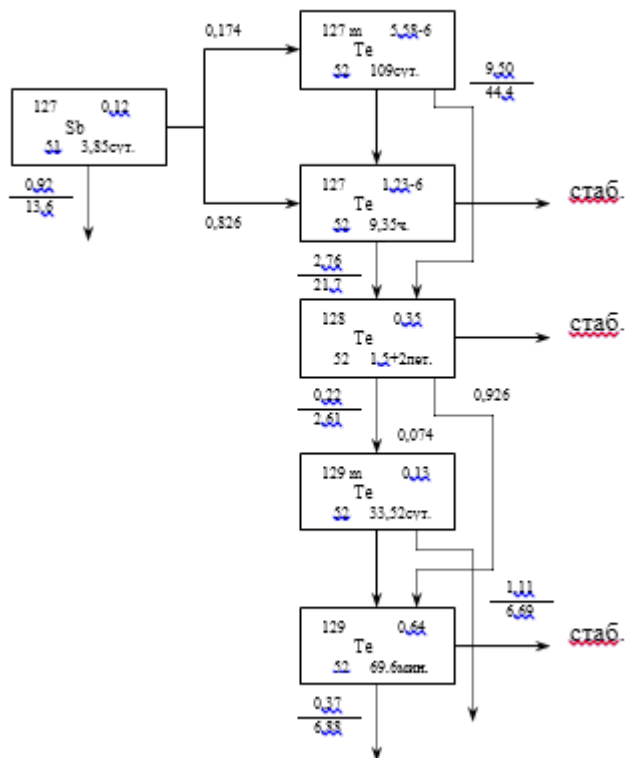
ФЮРА.693000.004 ПЗ

Лист

57

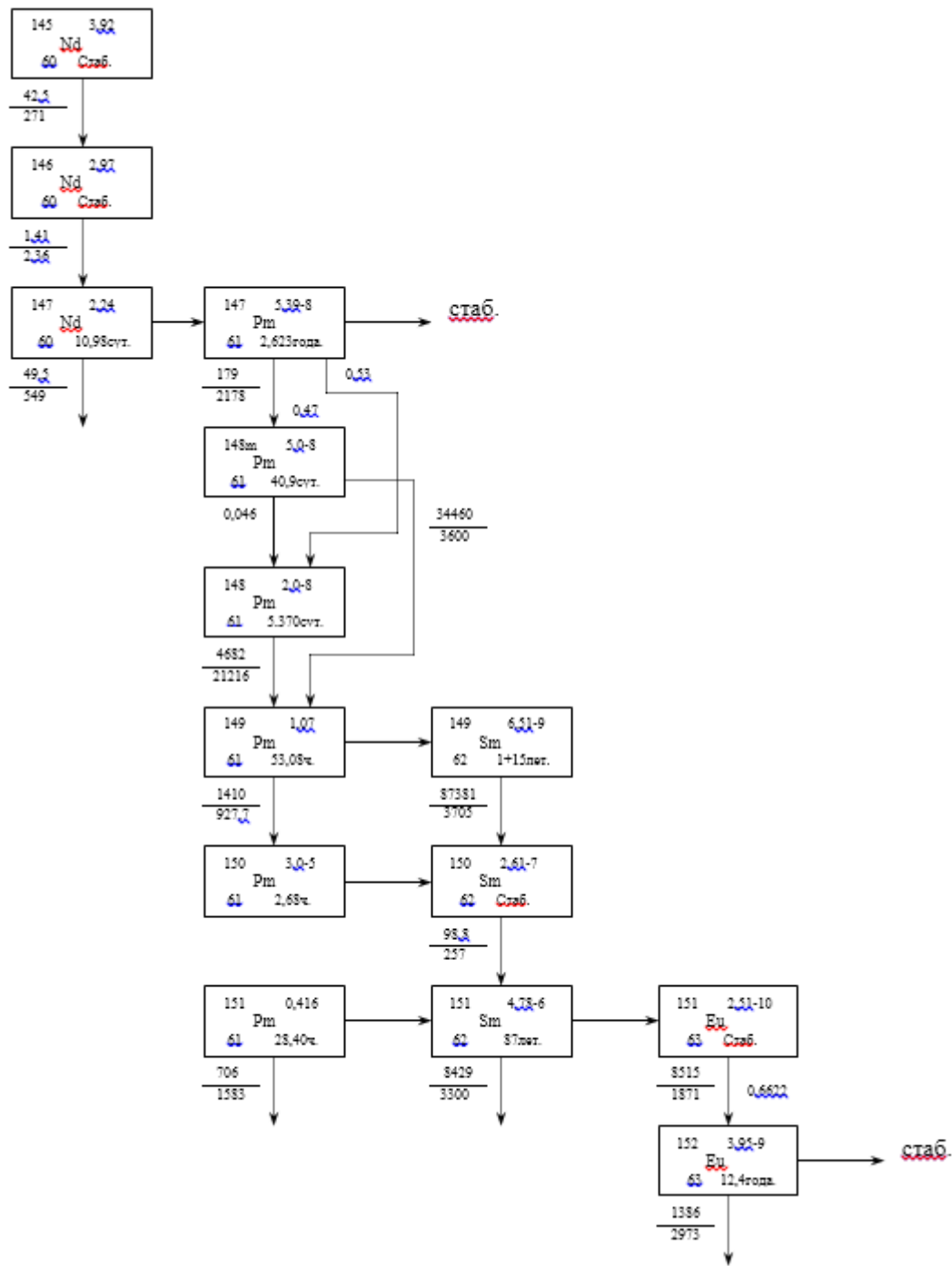


Р и с у н о к Б.11 – цепочка 11



Р и с у н о к Б.12 – цепочка 12

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата



Р и с у н о к Б.13 – цепочка 13

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата