

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

Институт Физико-технический
Направление подготовки Ядерные физика и технологии
Кафедра Физико-энергетических установок

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Моделирование ядерно-физических процессов в керамическом ОЯТ

УДК 621.039.542.34

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Соболев Виталий Константинович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	Беденко С.В.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.экон.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева	нет		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	к.ф.-м.н.		

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиозоологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический

Направление подготовки Ядерные физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ФЭУ

_____.00.00.0000 Долматов О.Ю.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Соболев Виталий Константинович

Тема работы:

Моделирование ядерно-физических процессов в керамическом ОЯТ

Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	1618/с от 26.02.2016
---	----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none">– облученное ядерное топливо (UO_2, $(U,Pu)O_2$, $(U,Pu)N$);– расчетный комплекс ORIGEN-ARP (SCALE 5.0)
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<p>введение: цель работы, область применения и значимость рассматриваемой проблемы;</p> <p>основная часть: рассмотрение свойств нитридного топлива, рассмотрение случаев эксплуатации ЯЭУ с нитридным топливом, проведение изотопного расчета керамического ОЯТ, анализ полученных результатов, расчёт себестоимости проведения исследовательской работы, разработка производственной безопасности при проведении экспериментов (в соответствии со стандартами и инструкциями по технике безопасности).</p>

Перечень графического материала		
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы		
Раздел	Консультант	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М.В.	
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.	
Английский язык	Демьяненко Н.В.	
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и английском языках:		

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ФЭУ ФТИ	Беденко С.В.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Соболев Виталий Константинович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ4Г	Соболев Виталий Константинович

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. <i>Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования</i>	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. <i>Оценочная карта конкурентных технических решений</i>
2. <i>Матрица SWOT</i>
3. <i>Иерархическая структура работ</i>
4. <i>Календарный план проекта</i>
5. <i>Бюджет проекта</i>
6. <i>Определение ресурсоэффективности проекта</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.ЭКОН.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4Г	Соболев Виталий Константинович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4Г	Соболев Виталий Константинович

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Описание рабочего места на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных факторов производственной среды (микроклимат, освещение, шумы, электромагнитные поля, ионизирующее излучение); – опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	электробезопасность, пожаробезопасность, требования при работе на ПЭВМ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – воздействие на организм человека; – приведение допустимых норм; – предлагаемые средства защиты.
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4Г	Соболев Виталий Константинович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа _____ с., _____ рис., _____ табл., _____ источников, _____ прил.

Ключевые слова: керамическое ядерное топливо, смешанное нитридное ядерное топливо, нейтронная активность керамического ОЯТ, изотопный расчет ОЯТ, SCALE 5.0(Origen-Arp).

Объектом исследования является смешанное уран-плутониевое мононитридное топливо.

Цель работы – рассмотрение возможности использования смешанного уран-плутониевого мононитридного топлива в качестве перспективного топливного материала.

В процессе исследования проводились расчеты нуклидного состава облученных UO_2 , $(U,Pu)O_2$, $(U,Pu)N$ с использованием расчетного комплекса SCALE 5.0 (Origen-Arp).

В результате исследования были получены расчетные данные по нейтронной активности ОЯТ, позволяющие оценить качественные и количественные различия радиационных характеристик рассматриваемых видов керамического ядерного топлива.

Степень внедрения: высокая.

Область применения: атомная и космическая промышленности.

Экономическая эффективность/значимость работы высокая.

В будущем планируется дальнейшее исследование радиационных характеристик облученной смешанной нитридной топливной керамики, в частности, их зависимость от вариации материального состава, условий облучения и др.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Оглавление

Введение.....	3
1 Обзор литературы	4
2 Объект и методы исследования	7
2.1 Постановка задачи расчетной части.....	9
2.2 Алгоритм расчета изотопного состава ОЯТ.....	9
2.3 Точность расчета образования нуклидов в ОЯТ.....	9
2.4 Программы расчета нуклидного состава ОЯТ	7
2.4.1 Winfrith Improved Multigroup Scheme	7
2.4.2 Monte Carlo Universal.....	7
2.4.3 SCALE (OrigenArp)	7
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	7
Список публикаций.....	22

Введение

Актуальность темы. Ядерное топливо является наиболее важным материалом, используемым в ядерной энергетике. В настоящее время подавляющее большинство реакторов в силу определенных причин использует керамическое топливо в форме двуокиси урана. Однако у нее имеется ряд недостатков (к примеру, относительно низкие теплопроводность и массовая концентрация ядерного горючего), которые отсутствуют у некоторых других керамических топлив – карбидов, нитридов и др. В частности, смешанное уран-плутониевое нитридное топливо является весьма перспективным, в силу следующих причин:

- относительно хорошие теплофизические свойства (коэффициент теплопроводности смеси моонитридов более чем в 2 раза превышает коэффициент теплопроводности двуокиси урана при температурах от 600 К [1,2]);
- более высокая массовая доля металла в керамическом топливе (более 94 % – смесь моонитридов, около 88 % – двуокись урана);
- снижение удельных затрат урана вследствие вовлечения плутония в процесс производства топлива;
- отсутствие необходимости обогащения урана (основным делящимся нуклидом является изотоп плутония Pu^{239});
- возможность использования обедненного урана, который в значительных количествах накапливается на стадии обогащения (запасы в России – более 100 тысяч тонн в форме UF_6 [3]) и который эффективно воспроизводит уже упомянутое выше вторичное ядерное топливо – плутоний.

При этом переход на новый вид топлива приведет к изменению нуклидного состава ОЯТ, который полностью определяет его радиационные характеристики. Поэтому является необходимым проведение сравнительного анализа изотопного состава облученных топливных композиций, результаты

которого позволили бы оценить возможные изменения радиационного поля ОЯТ.

Научная новизна. Впервые проведен комплексный сравнительный анализ полученных расчетных данных по нейтронной активности керамического ОЯТ из UO_2 , $(U,Pu)O_2$ и $(U,Pu)N$.

Целью данной работы: рассмотреть возможности использования смешанного уран-плутониевого монокристалла в качестве перспективного топливного материала для существующих и проектных ядерных энергетических установок.

Для достижения поставленной цели необходимым является решение ряда конкретных задач, а именно:

- 1) обзор литературных источников по теме работы;
- 2) изучение особенностей расчетного комплекса Origen-Arp (Scale 5.0), используемого в работе;
- 3) проведение расчета нуклидного состава облученных UO_2 , $(U,Pu)O_2$, $(U,Pu)N$;
- 4) сравнительный анализ радиационных характеристик (нейтронная активность) ОЯТ.

1 Обзор литературы

1.1 Нитридное ядерное топливо

1.1.1 Основные виды нитридной топливной керамики

1.1.1.1 UN

В системе U–N установлено существование трех нитридов: UN, U₂N₃ и UN₂. Подробный анализ системы U–N приведен в работе [4]. Мононитрид урана, будучи наиболее устойчивым соединением, представляющим интерес в качестве потенциального материала ядерного топлива, имеет гранецентрированную кубическую (ГЦК) структуру типа NaCl, теоретическую плотность 14,32 г/см³ [5] и относительно высокое содержание делящегося материала по сравнению с другими керамическими топливами (таблица 1.1). Мононитрид урана плавится без разложения (конгруэнтно) при 2830 ± 30 °С и давлении азота около 2,5 атм [2].

Таблица 1.1 – Плотность керамического топлива

Химическое соединение	ρ , г/см ³ [6]	Содержание U, г/см ³ [5]
UO ₂	10,97	9,68
UC	13,63	13,00
UN	14,32	13,50

Будучи во многом сравнимым по свойствам с другим относительно плотным керамическим топливом UC, UN, в то же время превосходит его по отдельным показателям. В частности, мононитрид урана имеет меньшую воспламеняемость, высокую теплопроводность (таблица 1.2) и прочность при повышенных температурах, лучшие ядерные свойства, не взаимодействует с водой, совместим со многими материалами.

Существенным недостатком UN является его разложение при температурах выше 1300 °С на уран и азот. Чтобы замедлить этот процесс требуется увеличивать давление азота в твэлах, что создает опасность их

разгерметизации [6]. Также стоит отметить, что наличие примесей кислорода и углерода повышают температуру диссоциации UN [2].

Таблица 1.2 – Теплопроводность моонитрида урана

Температура, К	Теплопроводность, Вт/(м·К) [2]
10	3,0
50	7,2
100	9,5
200	12,3
300	13,9
400	14,9
600	16,0
800	18,9
1000	20,6
1200	22,6
1400	24,5
1600	25,0

1.1.1.2 PuN, (U,Pu)N

В системе Pu–N известен только один нитрид плутония PuN. По своим свойствам он подобен моонитриду урана, обладает ГЦК кристаллической решеткой типа NaCl, теоретической плотностью 14,23 г/см³ [5], и температурой конгруэнтного плавления 2830 ± 50 °С при давлении азота 50 ± 20 атм. Нитрид плутония растворяется в UN при всех соотношениях. По этой причине температура конгруэнтного плавления сплавов будет меняться в зависимости от содержания урана и плутония крайне незначительно.

В отличие от моноснитрида урана, твердый раствор UN–PuN не распадается при повышении температуры, вместо этого испаряется таким образом, что соотношение между металлом и азотом в твердом веществе остается постоянным.

В таблице 1.3 [7] представлена зависимость теплопроводности смешанного уран-плутониевого моноснитрида от температуры на примере $(U_{0,8}Pu_{0,2})N$.

Таблица 1.3 – Теплопроводность смешанного уран-плутониевого моноснитрида

Температура, К	Теплопроводность, Вт/(м·К)
600	14,9
800	16,3
1200	18,6
1400	20,4

1.1.2 Опыт эксплуатации ЯЭУ со смешанным нитридным ядерным топливом

Экспериментальных данных о поведении под облучением нитридного (смешанного нитридного) топлива не так много (таблица А.1 приложения А).

Наибольший зарубежный опыт облучения нитридного топлива имеется в США, где в 1974–1980 гг. было изготовлено и облучено более 100 твэлов с $(U,Pu)N$ с разной геометрией [8]. Испытывали твэлы с натриевым и гелиевым подслоем, с оболочками из стали 304 и 316. Основное число твэлов имело натриевый подслой и высокую плотность таблеток (94–97 % теоретической).

Европейский опыт, в частности, включает в себя облучение нескольких твэлов в реакторе «Феникс» (Франция). Все твэлы имели гелиевый подслой [9, 10]. Были облучены две сборки: в первой – 11 твэлов до

максимального выгорания 6,9 % т. а. при максимальной линейной мощности 42 кВт/м, во второй – 5 твэлов до выгорания 5,8 % т. а. при линейной мощности 73 кВт/м. В твэле, облученном при максимальной линейной мощности (73 кВт/м), обнаружен плутоний на границе с оболочкой, что, по мнению авторов, свидетельствует о диссоциации нитрида при температуре ниже 2000 °С [9].

Отечественные исследования смешанного нитридного топлива, облученного в БОР-60 даже при более высокой линейной мощности (более 100 кВт/м), не выявили следов диссоциации [13]. В рамках российско-французской программы в БОР-60 облучили также 4 твэла со смешанным нитридным топливом с повышенным массовым содержанием плутония – 45 и 60 % с гелиевым подслоем (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Условия облучения твэлов с $(U,Pu_{0,45})N$ и $(U,Pu_{0,6})N$ в БОР-60

Параметр	$(U,Pu_{0,6})N$		$(U,Pu_{0,45})N$	
	1-й этап	2-й этап	1-й этап	2-й этап
Длительность облучения, эф. сут.	514	900	514	900
Максимальное выгорание, % т. а.	7,0	12,1	5,4	9,4
Максимальная температура оболочки, °С	587	604	567	588
Максимальная температура топлива, °С	1110	1760	930	1490
Максимальная линейная мощность, кВт/м	35,0	54,5	26,0	41,9

Исследования неразрушающими и разрушающими методами твэлов с $(U,Pu_{0,45})N$ и $(U,Pu_{0,6})N$ показали [12]:

- наличие газообразных продуктов деления под оболочкой твэлов подтверждает их герметичность и позволяет оценить выход криптона и ксенона из топлива: 19 и 19,3 % образовавшегося количества;

- коррозионное взаимодействие топлива и продуктов деления с оболочкой незначительное;

– следы диссоциации нитридного топлива ни по состоянию микроструктуры, ни по изменению содержания азота в газовой фазе под оболочкой твэлов, ни по каким-либо иным признакам не обнаружены.

Положительные результаты радиационных испытаний высокочистого смешанного монокридного топлива в БОР-60 до выгорания 12,1 % т. а. при максимальной линейной мощности 54,5 кВт/м следует объяснить высокой исходной гомогенностью распределения плутония, низким содержанием кислорода и углерода – менее 0,15 и 0,10 % по массе соответственно, равномерно распределенной пористостью, сочетанием пор по границам и внутри зерен [14].

Для исследования поведения смешанного нитридного топлива, полученного карботермическим синтезом, во ВНИИНМ были изготовлены экспериментальные твэлы типа твэлов для реактора БРЕСТ, которые в составе пяти разборных облучательных устройств на момент 2014 года [14] проходили испытания в реакторе БОР-60 (таблица А.2 приложения А).

В изготовленном таблеточном топливе (U,Pu)N содержание кислорода гарантировано составляет 0,15 % по массе. Для достижения такого же показателя содержания углерода потребовались дополнительные технологические приемы для его удаления из исходных порошков.

Лабораторная технология смешанного нитридного топлива с карботермическим синтезом исходных порошков, разработанная во ВНИИНМ, в большом масштабе внедрена на Сибирском химическом комбинате, где создана возможность изготовления полномасштабных экспериментальных ТВС для испытаний в БН-600. По данной технологии были изготовлены экспериментальные твэлы для испытаний в БН-600 в составе трех комбинированных экспериментальных ТВС, которые также на момент 2014 года [14] облучались в активной зоне БН-600 (таблица А.2 приложения А).

2 Объект и методы исследования

2.1 Постановка задачи проводимых расчетов

Основная задача проводимых изотопных расчетов заключается в определении радиационных характеристик излучения (нейтронной активности) керамических ОЯТ с их последующим сравнительным анализом. В частности в данной работе будут рассмотрены 3 топливные композиции – «традиционная» двуокись урана, МОКС-топливо и перспективное смешанное уран-плутониевое мононитридное топливо. Данный относительно оптимальный выбор позволит наиболее полно оценить различия радиационных полей рассматриваемых видов ОЯТ.

2.2 Алгоритм расчета изотопного состава ОЯТ

В общем случае нуклидный состав ОЯТ является функцией начального состава топлива, истории облучения, времени выдержки, состава активной зоны (количества и размещения поглотителей). Зная состав свежего, загружаемого в реактор топлива, а также историю его облучения и время выдержки, можно рассчитать изотопный состав ОЯТ.

В общем, изменение нуклидного состава топлива описывается следующим алгоритмом. Изотопный состав материала, находящегося в нейтронном поле, меняется во времени. Это происходит в результате различных реакций нейтронов с ядрами и последующего радиоактивного распада продуктов реакции. Задача состоит в том, чтобы определить изотопный состав ОЯТ в момент времени $t = T$ при известной зависимости от времени мощности реактора $P(t)$. Концентрации изотопов в начальный момент $t = 0$ известны.

Присвоим каждому нуклиду порядковый номер i и имя NAM_i . Концентрацию нуклида i будем обозначать C_i . Зависимость C_i от времени в

каждой точке пространства описывается системой дифференциальных уравнений, вида:

$$\frac{dC_i}{dt} = -\omega_i \cdot C_i + \sum_{j=i+1}^I \omega_{ji} \cdot C_{ji}, \quad (2.1)$$

где:

- $\omega_i = \lambda_i + \sigma_i \cdot \Phi$ (составляющая уравнения, отвечающая за пути убыли ядер нуклида NAM_i);
- $\omega_{ji} = \lambda_{ji} + \sigma_{ji} \cdot \Phi$ (составляющая уравнения, отвечающая за пути прибыли ядер нуклида NAM_i);
- λ_{ji} – постоянная распада радиоактивного ядра NAM_j , в результате которого образуется ядро NAM_i ;
- λ_i – сумма λ_{ik} по всем типам распада k [распад может происходить по следующим пяти каналам: β^- (бета-распад), β^+ или ЕС (позитронный распад или электронная конверсия), α (альфа-распад), sf (спонтанное деление), IT (переход изомера из возбуждённого состояния в основное)];
- σ_{ji} – сечение реакции нейтрона с ядром NAM_j , приводящей к образованию ядра NAM_i ;
- Φ – плотность потока нейтронов, ее величина связана с мощностью следующим образом: $P = \sigma_f \cdot C \cdot E_f \cdot \Phi$ (E_f – энергия, выделяющаяся при делении ядра).

В реакторном спектре возможны следующие реакции: (n, γ) , (n, p) , (n, α) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$, (n, f) . В случае деления $\sigma_{ji} = \sigma_{fj} \cdot \epsilon_{ji}$, ϵ_{ji} – выход ядра NAM_i при делении ядра NAM_j (σ_j – сечение поглощения, сумма по всем парциальным сечениям).

Плотность потока нейтронов и макроскопические сечения зависят от координат, поэтому и концентрация изотопов в каждой точке пространства по-разному зависит от времени. По мере изменения изотопного состава топлива в нём меняется спектр нейтронов, что приводит к изменению сечений изотопов и плотности потока. Таким образом, в уравнении (1) не

только переменные C , но и коэффициенты ω и σ зависят от времени, и от координат. В таком приближении система (1) не имеет аналитического решения и может быть решена только численно с некоторыми приближениями упрощающими задачу.

Расчёт изменения изотопного состава материалов реактора в процессе его работы рассчитывался с помощью ORIGEN-ARP из расчетного комплекса SCALE 5.0.

ORIGEN-ARP решает задачу изменения изотопного состава в бесконечной однородной среде. При расчете принимается, что на временном интервале (t_n, t_{n+1}) поток и сечения постоянны и равны их значению при $t = t_n$, а значит, изменение изотопного состава топлива может быть описано традиционной системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида (1) [15].

2.3 Точность расчета образования нуклидов в ОЯТ

Кинетика накопления и убыли концентраций нуклидов описывается системой линейных дифференциальных уравнений. В настоящее время известно много различных программ для расчета выгорания и определения изотопного состава ОЯТ. В каждой из них реализованы разные подходы и разнообразные алгоритмы решения системы уравнений, например, численный метод Рунге-Кутты в программе ТВС-М или аналитический метод матричных экспонент в программе ORIGEN-ARP. В частности, в ГИЦ РФ-ФЭИ разработана программа WIMS/ABBN, предназначенная для нейтронно-физического расчета реакторов типа ВВЭР и определения мощности каждой ОТВС. Специалистами LANL разработана программа MONTEBURNS, в которой, по их мнению, наиболее оптимально сочетание MCNP-5 и ORIGEN-S. Следует заметить, что перечисленные выше программы занижают значения концентраций младших актиноидов на десятки процентов, а многие

используемые в России программы, например ТВС-М, не аттестованы по содержанию многих нуклидов.

Одна из причин неточности при расчете многих важных, с точки зрения радиационной безопасности, нуклидов – существующие неопределенности в сечениях для этих нуклидов. Сложность расчета их содержания связана с зависимостью не только от выгорания топлива, но и от флюенса нейтронов. Другая причина – ограниченная экспериментальная информация.

Попытка подготовить базу данных для отечественных реакторов, была недавно предпринята для программы ORIGEN-ARP, работающей с новой 5-ой версией комплекса SCALE. Однако погрешность рассчитываемых концентраций изотопов кюрия для реакторов ВВЭР составляет в среднем около 25 % и более. Для более удаленных актиноидов (от Cm²⁵⁰ и до Cf²⁵⁴) эта погрешность будет еще выше [15].

2.3.1 Анализ библиотек ядерных данных для тяжелых ядер

Как уже упоминалось выше, существует неопределенность в ядерных данных (эффективные микросечения взаимодействия) различных библиотек в особенности, когда речь заходит о резонансной энергетической области нейтронов. Ниже, на примере U²³⁸ и Th²³², имеющих ярко выраженные резонансы в промежуточной энергетической области (1 эВ ÷ 30 кэВ), будут представлены результаты сравнения современных библиотек оцененных ядерных данных (ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2, JENDL-4.0u2, TENDL-2014, ROSFOND-2010), используемых при расчете нуклидного состава ОЯТ.

2.3.1.1 Эффективное микросечение радиационного захвата U²³⁸ и Th²³²

В таблицах 2.1–2.2 [16] будут представлены значения сечения радиационного захвата для U^{238} и Th^{232} соответственно в зависимости от рассматриваемой базы данных.

Таблица 2.1 – Эффективное микросечение радиационного захвата U^{238} в различных базах данных

E, эВ	$\sigma_c(U^{238}), б$				
	ENDF/B-VII.1	JEFF-3.2	JENDL-4.0u2	TENDL-2014	ROSFOND-2010
6,67E+00	7,11414E+03	7,11410E+03	7,11415E+03	7,11414E+03	7,11449E+03
2,09E+01	6,85681E+03	6,84963E+03	6,85681E+03	6,85681E+03	6,85722E+03
3,67E+01	5,44943E+03	5,43649E+03	5,44943E+03	5,44943E+03	5,44974E+03
6,60E+01	2,13612E+03	2,14034E+03	2,13612E+03	2,13612E+03	2,13625E+03
1,03E+02	1,53384E+03	1,50510E+03	1,53397E+03	1,53397E+03	1,53392E+03
1,90E+02	6,31264E+02	6,30723E+02	6,31330E+02	6,31330E+02	6,31290E+02
2,09E+02	5,12735E+02	5,13946E+02	5,12788E+02	5,12788E+02	5,12765E+02
5,18E+02	1,33917E+02	1,34822E+02	1,33930E+02	1,33930E+02	1,33925E+02
9,92E+02	5,91888E+01	5,91453E+01	5,91957E+01	5,91956E+01	5,91911E+01
1,00E+04	2,05009E+00	2,01849E+00	2,05046E+00	2,05046E+00	2,05023E+00
2,00E+04	5,27430E-01	5,42278E-01	5,21987E-01	5,26474E-01	5,27430E-01

Таблица 2.2 – Эффективное микросечение радиационного захвата Th^{232} в различных базах данных

E, эВ	$\sigma_c(Th^{232}), б$				
	ENDF/B-VII.1	JEFF-3.2	JENDL-4.0u2	TENDL-2014	ROSFOND-2010
2,18E+01	1,76428E+03	1,76428E+03	1,76428E+03	1,82094E+03	1,82014E+03
2,35E+01	2,74604E+03	2,74604E+03	2,74604E+03	2,82937E+03	2,79953E+03
6,92E+01	2,40302E+03	2,40302E+03	2,40302E+03	2,34915E+03	2,35354E+03
1,21E+02	8,49331E+02	8,49418E+02	8,49418E+02	8,58197E+02	8,42203E+02
1,70E+02	7,34723E+02	7,34808E+02	7,34808E+02	7,28317E+02	7,45500E+02
1,93E+02	3,63462E+02	3,63493E+02	3,63493E+02	3,76305E+02	3,40519E+02

2,21E+02	4,04679E+02	4,04716E+02	4,04716E+02	4,07983E+02	3,96257E+02
1,01E+03	6,13947E+01	6,13970E+01	6,13970E+01	5,30976E+01	6,20311E+01
1,00E+04	8,26053E-01	8,26053E-01	8,03514E-01	8,26071E-01	8,18224E-01
2,00E+04	6,21042E-01	6,21042E-01	6,08610E-01	6,21053E-01	6,20960E-01
3,00E+04	5,16864E-01	5,16864E-01	5,10909E-01	5,50121E-01	5,22818E-01

В таблицах 2.3–2.4 приведены относительные различия в значениях сечения радиационного захвата.

Таблица 2.3 – Относительные различия в значениях эффективного микросечения радиационного захвата U^{238}

E, эВ	X(U^{238}), %			
	ENDF/B-VII.1	JENDL-4.0u2	TENDL-2014	ROSFOND-2010
6,67E+00	-5,62E-04	-7,03E-04	-5,62E-04	-5,48E-03
2,09E+01	-1,05E-01	-1,05E-01	-1,05E-01	-1,11E-01
3,67E+01	-2,38E-01	-2,38E-01	-2,38E-01	-2,44E-01
6,60E+01	1,97E-01	1,97E-01	1,97E-01	1,91E-01
1,03E+02	-1,91E+00	-1,92E+00	-1,92E+00	-1,91E+00
1,90E+02	-8,58E-02	-9,62E-02	-9,62E-02	-8,99E-02
2,09E+02	2,36E-01	2,25E-01	2,25E-01	2,30E-01
5,18E+02	6,71E-01	6,62E-01	6,62E-01	6,65E-01
9,92E+02	-7,35E-02	-8,52E-02	-8,50E-02	-7,74E-02
1,00E+04	-1,57E+00	-1,58E+00	-1,58E+00	-1,57E+00
2,00E+04	2,74E+00	3,74E+00	2,91E+00	2,74E+00

Таблица 2.4 – Относительные различия в значениях эффективного микросечения радиационного захвата Th^{232}

E, эВ	X(Th^{232}), %			
	ENDF/B-VII.1	JENDL-4.0u2	TENDL-2014	ROSFOND-2010
2,18E+01	0,00E+00	0,00E+00	-3,21E+00	-3,17E+00

2,35E+01	0,00E+00	0,00E+00	-3,03E+00	-1,95E+00
6,92E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,24E+00	2,06E+00
1,21E+02	1,02E-02	0,00E+00	-1,03E+00	8,49E-01
1,70E+02	1,16E-02	0,00E+00	8,83E-01	-1,46E+00
1,93E+02	8,53E-03	0,00E+00	-3,52E+00	6,32E+00
2,21E+02	9,14E-03	0,00E+00	-8,07E-01	2,09E+00
1,01E+03	3,75E-03	0,00E+00	1,35E+01	-1,03E+00
1,00E+04	0,00E+00	2,73E+00	-2,18E-03	9,48E-01
2,00E+04	0,00E+00	2,00E+00	-1,77E-03	1,32E-02
3,00E+04	0,00E+00	1,15E+00	-6,43E+00	-1,15E+00

Для оценки относительных различий в значениях сечений была использована наиболее современная общеевропейская библиотека JEFF-3.2.

Для выбранных энергий нейтронов относительные различия в значениях сечений U^{238} не превышают 4 %. Наибольшая согласованность данных наблюдается в области более низких энергий – до 1 кэВ.

В случае с Th^{232} , относительные различия в значениях его сечений носят неоднозначный характер. Данные библиотеки ENDF/B-VII.1 отличаются наибольшей согласованностью – различия в сечениях наблюдаются только в области энергий порядка 100 эВ и не превышают 0,02 %. Для JENDL-4.0u2 также характерна относительно хорошая согласованность данных, различия (порядка 1 %) наблюдаются только лишь для энергий > 10 кэВ. Рассогласованность в значениях сечений баз данных TENDL-2014 и ROSFOND-2010 для всех энергий составляет порядка 1 %, а для TENDL-2014 при $E \approx 1$ кэВ и вовсе достигает 13 %.

2.3.1.2 Эффективное микросечение деление U^{238} и Th^{232}

В таблицах 2.5–2.66 [16] будут представлены значения сечения деления для U^{238} и Th^{232} соответственно в зависимости от рассматриваемой базы данных.

Таблица 2.5 – Эффективное микросечение деления U^{238} в различных базах данных

E, эВ	$\sigma_f(U^{238}), б$				
	ENDF/B-VII.1	JEFF-3.2	JENDL-4.0u2	TENDL-2014	ROSFOND-2010
6,67E+00	3,09140E-03	3,09206E-03	3,09140E-03	3,09140E-03	3,09157E-03
2,09E+01	1,62547E-02	1,62052E-02	1,62547E-02	1,62547E-02	1,62557E-02
3,67E+01	2,31484E-03	2,32077E-03	2,31484E-03	2,31484E-03	2,31498E-03
6,60E+01	4,82548E-03	4,82424E-03	4,82548E-03	4,82548E-03	4,82580E-03
5,95E+02	5,45266E-03	5,45311E-03	5,45313E-03	5,45313E-03	5,45297E-03
7,08E+02	9,21178E-02	9,25238E-02	9,21239E-02	9,21239E-02	9,21219E-02
7,22E+02	8,43158E-01	1,37818E-01	8,43199E-01	8,43199E-01	8,43195E-01
1,21E+03	3,77178E-01	2,29504E-01	3,77195E-01	3,77194E-01	3,77195E-01
1,14E+04	3,90974E-02	3,90978E-02	3,90978E-02	3,90978E-02	3,90991E-02

Таблица 2.6 – Эффективное микросечение деления Th^{232} (TENDL-2014)

E, эВ	$\sigma_f(Th^{232}), б$
2,18E+01	1,79120E-01
2,35E+01	2,76065E-01
5,95E+01	7,29798E-02
6,92E+01	2,50507E-01
1,21E+02	8,76378E-02
1,70E+02	7,31352E-02
2,21E+02	4,09682E-02
1,04E+03	2,46871E-03
1,00E+04	2,48316E-06

В таблице 2.7 приведены относительные различия в значениях сечения деления U^{238} .

Таблица 2.7 – Относительные различия в значениях эффективного микросечения деления U^{238}

E, эВ	X(U^{238}), %			
	ENDF/B-VII.1	JENDL-4.0u2	TENDL-2014	ROSFOND-2010
6,67E+00	2,13E-02	2,13E-02	2,13E-02	1,58E-02
2,09E+01	-3,05E-01	-3,05E-01	-3,05E-01	-3,12E-01
3,67E+01	2,56E-01	2,56E-01	2,56E-01	2,49E-01
6,60E+01	-2,57E-02	-2,57E-02	-2,57E-02	-3,23E-02
5,95E+02	8,25E-03	-3,67E-04	-3,67E-04	2,57E-03
7,08E+02	4,39E-01	4,32E-01	4,32E-01	4,34E-01
7,22E+02	-5,12E+02	-5,12E+02	-5,12E+02	-5,12E+02
1,21E+03	-6,43E+01	-6,44E+01	-6,44E+01	-6,44E+01
1,14E+04	1,02E-03	0,00E+00	0,00E+00	-3,32E-03

Значения сечения деления различных баз данных относительно хорошо согласуются друг с другом. В основном, относительные различия в значениях сечения деления лежат в диапазоне $10^{-4} \div 10^{-1}$ % (относительно JEFF-3.2). Однако имеют место значительные расхождения (порядка 100 %) для некоторых резонансов в области энергий ~ 1 кэВ.

В случае с Th^{232} , данные по резонансам в рассматриваемой энергетической области имеются только лишь в библиотеке TENDL-2014. В остальных базах данных резонансы либо отсутствуют (JENDL-4.0u2, ROSFOND-2010), либо данная область энергий нейтронов не рассматривается вовсе (ENDF/B-VII.1, JEFF-3.2).

2.4 Программы расчета нуклидного состава ОЯТ

2.4.1 Winfrith Improved Multigroup Scheme

Программа Winfrith Improved Multigroup Scheme (WIMS) предназначена для нейтронно-физического расчета ячеек ядерных реакторов различного типа (включая расчет выгорания). Программа применяется для расчетов тепловых и быстрых реакторов. Она успешно применяется и для проектирования реакторов, и для расчетов и анализа различных эффектов в существующих реакторах.

WIMS использует универсальную 69-групповую библиотеку констант, подготовленную на основе файлов оцененных нейтронных данных (ENDF, JEF, JENDL) в ГНЦ РФ ФЭИ. Требуемая входная информация сравнительно невелика по объему. Входная информация вводится в достаточно простой форме и содержит описание рассматриваемого варианта, то есть сведения о материалах и геометрии ячейки. Программа дает возможность пользователю выбирать на разных этапах расчета различные физические модели и методы решения. В программе предусмотрен очень подробный вывод результатов. Вывод производится по частям (сегментам, блокам), причем пользователю предоставлена возможность выбора, какие блоки и с какой детальностью требуется выводить на печать.

Библиотека констант содержит 90 нуклидов. Для некоторых из них имеются по несколько наборов микроконстант, полученных по разным теоретическим моделям. Разные наборы констант имеются для водорода, бора, изотопов урана и плутония.

Программа может решать задачи в плоской, цилиндрической и сферической одномерных геометриях и в двумерной rz-геометрии.

Расчет пространственно-энергетического распределения нейтронов в ячейке реактора происходит следующим образом:

- 1) рассчитывается детальный спектр в 69 группах в каждой из зон, типичной для ячейки: в топливе, оболочке, теплоносителе и замедлителе;

2) осуществляется свертка сечений к заданному мало групповому приближению, в котором рассчитываются детальные пространственные распределения нейтронов по ячейке;

3) проводится модификация полученного решения с учетом утечки;

4) мало групповые потоки разворачиваются в 69-групповое представление и рассчитываются скорости реакций для заданных изотопов.

При расчете используются методы вероятностей первых столкновений (ВПС), дискретных ординат.

2.4.2 Monte Carlo Universal

MCU – это проект по разработке и практическому использованию универсальной компьютерной программы для численного моделирования процессов переноса различного вида излучений (нейтронов, гамма-квантов, электронов, позитронов) в трёхмерных системах методом Монте-Карло.

Преимущества метода Монте-Карло заключаются в том, что он позволяет проводить моделирование взаимодействия излучения с веществом на основе информации из файлов оценённых ядерных данных (т. е. используются наиболее точные данные без дополнительных приближений и огрублений) и практически не накладывает ограничений на геометрию рассматриваемых систем.

Общепризнано, что, во многих случаях метод Монте-Карло в совокупности с оценёнными ядерными данными, может с успехом заменить эксперимент. Этот класс программ находит всё более широкое применение при анализе радиационной и ядерной безопасности существующих и при проектировании новых объектов использования атомной энергии и других приложениях [17].

2.4.3 SCALE (OrigenArp)

2.4.3.1 Интерфейс

Интерфейс Origen-Arp удобен и прост. Ниже представлено описание некоторых панелей инструментов.

TOOLBAR (Панель управления) Рисунок 1

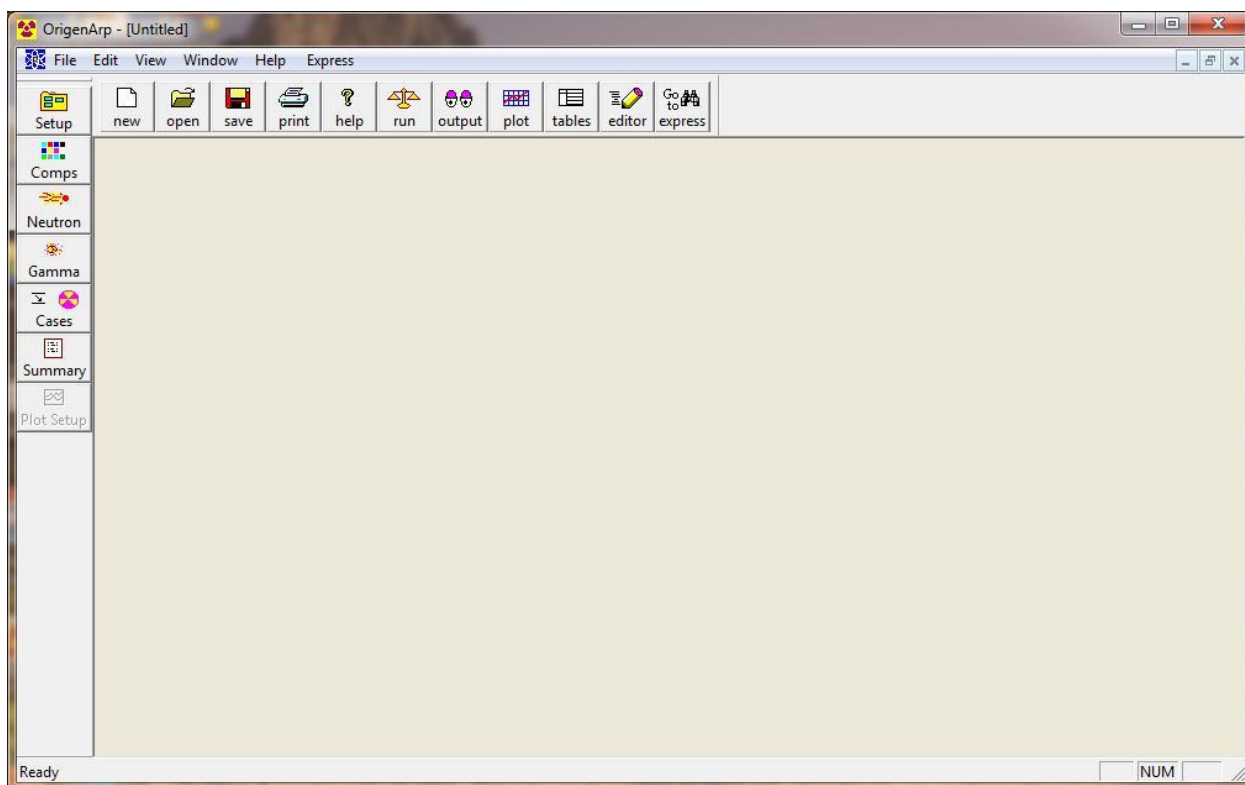


Рисунок 1.1

Всего имеется шесть панелей. Однако отображаются только три: стандартная панель, главная панель и панель DETAIL/EXPRESS.

TOP TOOLBAR(Standart) (Верхняя панель) Рисунок 2

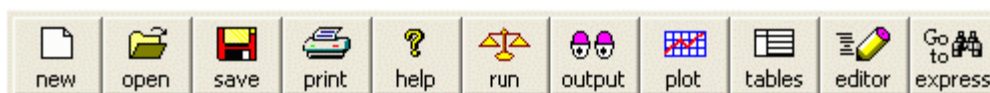


Рисунок 1.2

Верхняя панель имеет 10 кнопок. Первые четыре кнопки относятся к процедурам загрузки и сохранения файлов с входными данными. Пятая кнопка предоставляет информацию об OrigenArp. Пять кнопок справа используются, чтобы запустить внешние программы.

- NEW FILE – создать новый файл;

- OPEN FILE – открыть существующий файл;
- SAVE FILE – сохранить файл;
- PRINT– напечатать файл;
- HELP – помощь;
- RUN – сохраняет бинарное представление файла входящих данных (.arp), создает файл входящих данных SCALE (.inp) и запускает программу SCALE ;
- OUTPUT – отобразить выходные данные, используя текстовый редактор;
- PLOT – запускает программу PlotOPUS, чтобы отобразить графики, которые были получены;
- TABLES - показывает таблицы, по которым были построены графики;
- EDITOR – просмотреть файл с входными данными, используя редактор;
- GO TO BUTTON – изменяет вид входных данных из EXPRESS в DETAIL и обратно.

LEFT TOOLBAR-DETAIL VIEW (Левая панель) Рисунок 3



Рисунок 1.3

- SETUP – позволяет изменять размер кнопок панели, число композиций на странице их заполнения, максимальное число

энергетических групп, число колонок на форме ввода числа энергетических групп, а также выбирать предпочитаемый текстовый редактор для просмотра файлов. Кнопка “RESET DEFAULTS” вернет все настройки к тем, что были изначально при установке программы;

- COMPOSITIONS – страница/окно с входными данными по составу топлива. Может занимать несколько окон/страниц;
- NEUTRON GROUPS – позволяет пользователю установить структуру групп нейтронов;
- GAMMA GROUPS - позволяет пользователю установить структуру гамма-групп;
- CASE DATA – кнопка выбора случая/сценария. (облучение/распад);
- SUMMARY – выводит экран , показывающий уже введенные данные;
- PLOT SETUP – здесь можно установить информацию (внести/исправить данные), необходимую для создания графика, используя программу SCALE/OPUS.

LEFT TOOLBAR-ORIGEN EXPRESS VIEWS Рисунок 4



Рисунок 1.4

1.3.2 ORIGENARP DETAIL FORMS

Окно DETAIL FORM показанное на рисунке 5, используется, чтобы просмотреть или модифицировать/изменить входные данные DETAILED INPUT DATA. В свою же очередь DETAILED INPUT DATA используются, чтобы сгенерировать файл SCALE с входными данными с целью дальнейшего запуска APR и ORIGEN-S. DETAILED INPUT можно создать

используя непосредственно эту форму, импортировав ранее созданные файлы с входными данными или используя опцию Origen EXPRESS

Окно COMPOSITION

	Element	Isotope	Library	Concentration
1	U	235	Actinide	125033.6
2	U	238	Actinide	62391766
3	Pu	239	Actinide	1849920
4	Pu	240	Actinide	924960
5	Pu	241	Actinide	308320
6	O	Natural	Natural	8817789.6
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Рисунок 1.5

Во входные данные должна входить нуклидная композиция, чтобы ORIGEN-S мог определить исходную конфигурацию системы, которую нужно проанализировать. В левой верхней части окна пользователь может выбрать "Enter composition data" или "Restart from existing data file"

Enter composition data (Ввести данные, используя данную форму ввода)

Если пользователь выбрал "Enter data using this form", поле "units" (единицы) дает ему выбрать входные единицы. Пользователь выбирает каждый нуклид из меню, в котором элементы расположены в алфавитном порядке, и нужный изотоп. Затем пользователь выбирает библиотеку элементов: природные, легкие элементы, актиниды или продукты деления. Выбор библиотеки основан на происхождении нуклида. Если доступна

только одна библиотека, то программа автоматически выберет ее. Последняя колонка – концентрация.

Fuel Type (тип топлива), Enrichment (обогащение), и Moderator Density (плотность замедлителя) – формы ввода для этих величин также находятся в этом окне. Обогащение не учитывается в расчетах, если входные единицы – Кюри. Кюри допускаются только для расчета распада (“Decay”).

Чтобы ввести обогащение, первые четыре ряда формы вводы элементов должны быть либо пусты, либо содержать следующие нуклиды в данном порядке: U234, U235, U236, and U238.

Если пользователь вводит обогащение, то количество U234, U235, U236, and U238 генерируется программой с использованием специальных алгоритмов. Соответственно, если пользователь задал определенные концентрации изотопов, то программа посчитает обогащение соответствующего топлива.

Диапазон величин плотности замедлителя определяется файлом ARPDATA.TXT, который требует OrigenAmp и находится в директории SCALE в папке "Data". Если ARPDATA.TXT ограничивает плотность замедлителя до 1, значит OrigenAmp не позволяет пользователю изменить эту величину.

Тип топлива выбирается из списка возможных видов топлива. Типы топливных сборок включают 8×8 (for BWR топлива), 14×14 (for ABB Combustion Engineering-type PWR топлива with large water holes - большими пустотами для воды), and 15×15 and 17×17 (for Babcock & Wilcox and Westinghouse-type PWR fuel).

Fuel distribution (Распределение топлива) Рисунок 6

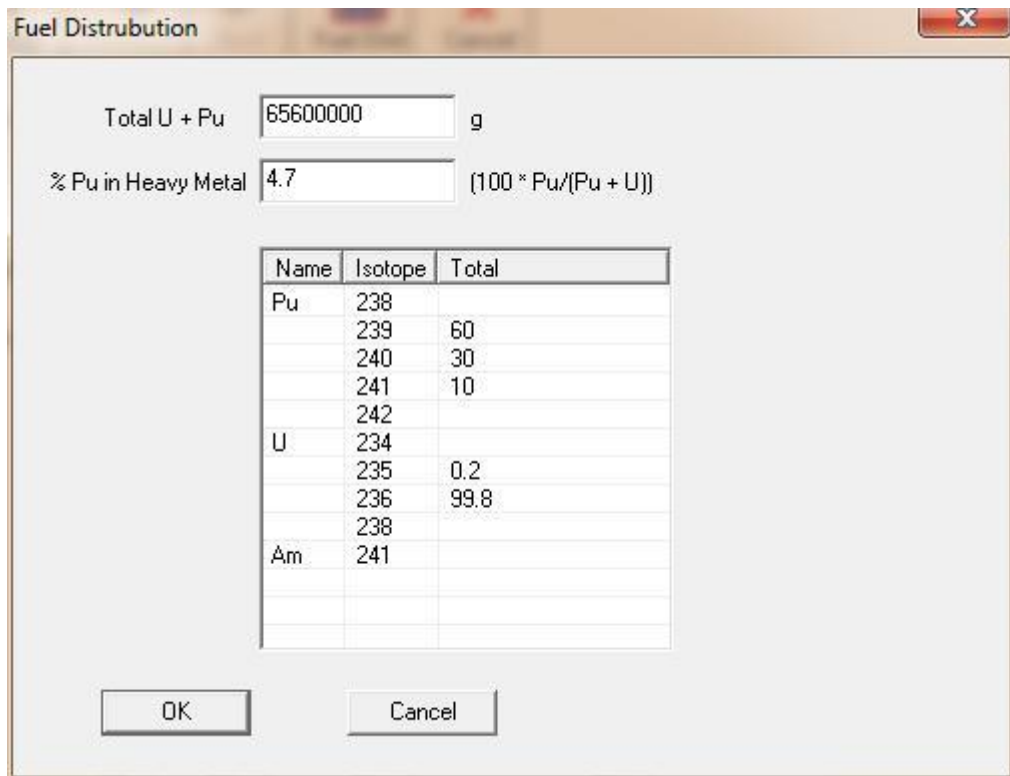


Рисунок 1.6

Здесь можно задать нуклидный состав топлива в процентах от массы тяжелого металла. Процентное содержание изотопов U и Pu задается в процентах от массы U и Pu соответственно, а не от массы тяжелого металла.

Окно NEUTRON GROUPS

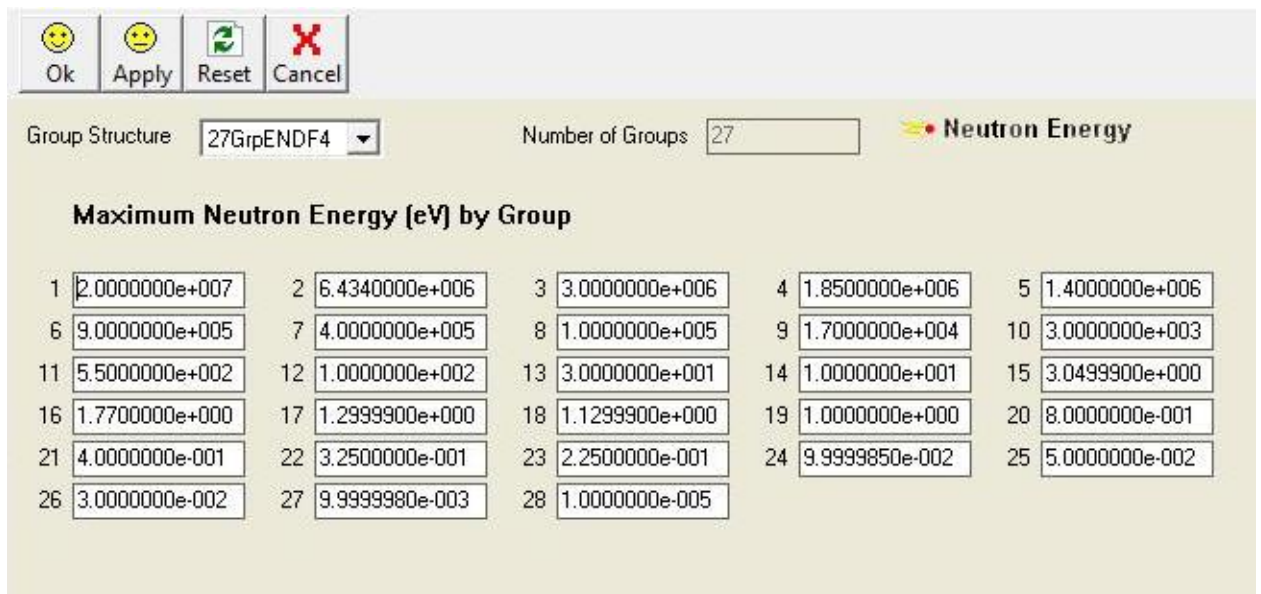


Рисунок 1.7

Отображает структуру энергетических групп нейтронов. Можно выбрать стандартную из существующей библиотеки, либо задать свою,

выбрав “Other”. Если пользователь работает с “Irradiation cases”, то можно просто выбрать “None”. Пользователь может добавлять новые структуры энергетических групп, модифицируя файлы OR_ARP_GroupLibOptions.dat и OR_ARP_GammaGroups.dat. О том, как это сделать рассказано в “How to Add an Energy Group Structure for Neutron or Gamma Groups”.

Если пользователь выбрал стандартную структуру или “None”, то никакие входные данные не требуются. Если было выбрано “Other”, то тогда нужно определить/задать число энергетических групп и нажать “Apply” или “OK”. OrigenArp отобразит окно редактирования каждой энергетической группы. Число этих окон редактирования будет равно числу групп + 1. Необходимо будет ввести максимальную границу энергии в Эв для каждой группы, начиная с группы 1 (самой высокой энергетической группы). Поле, следующее за полем максимального значения энергии – минимальное значение энергии для этой группы. ВАЖНО вводить энергии от большего к меньшему!

Окно GAMA GROUPS

Maximum Gamma Energy (eV) by Group									
1	1.1000000e+007	2	8.0000000e+006	3	6.0000000e+006	4	4.0000000e+006	5	3.0000000e+006
6	2.5000000e+006	7	2.0000000e+006	8	1.5000000e+006	9	1.0000000e+006	10	7.0000000e+005
11	4.5000000e+005	12	3.0000000e+005	13	1.5000000e+005	14	1.0000000e+005	15	7.0000000e+004
16	4.5000000e+004	17	3.0000000e+004	18	2.0000000e+004	19	0.0000000e+000		

Рисунок 1.8

Окно SELECT CASE

С помощью этого диалогового окна пользователь может создать новый случай или отобразить уже существующий.

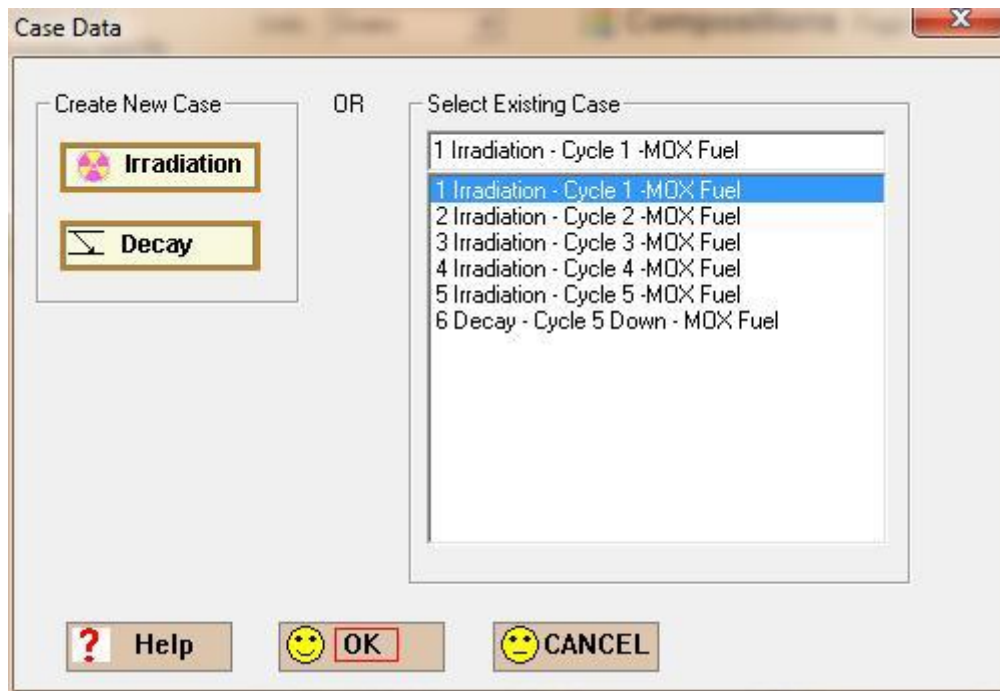


Рисунок 1.7

Все просто – кликаем на то, что нам нужно – Irradiation или Decay и выбираем из списка либо создаем новый. Затем нажимаем ОК.

Окно IRRADIATION DATA

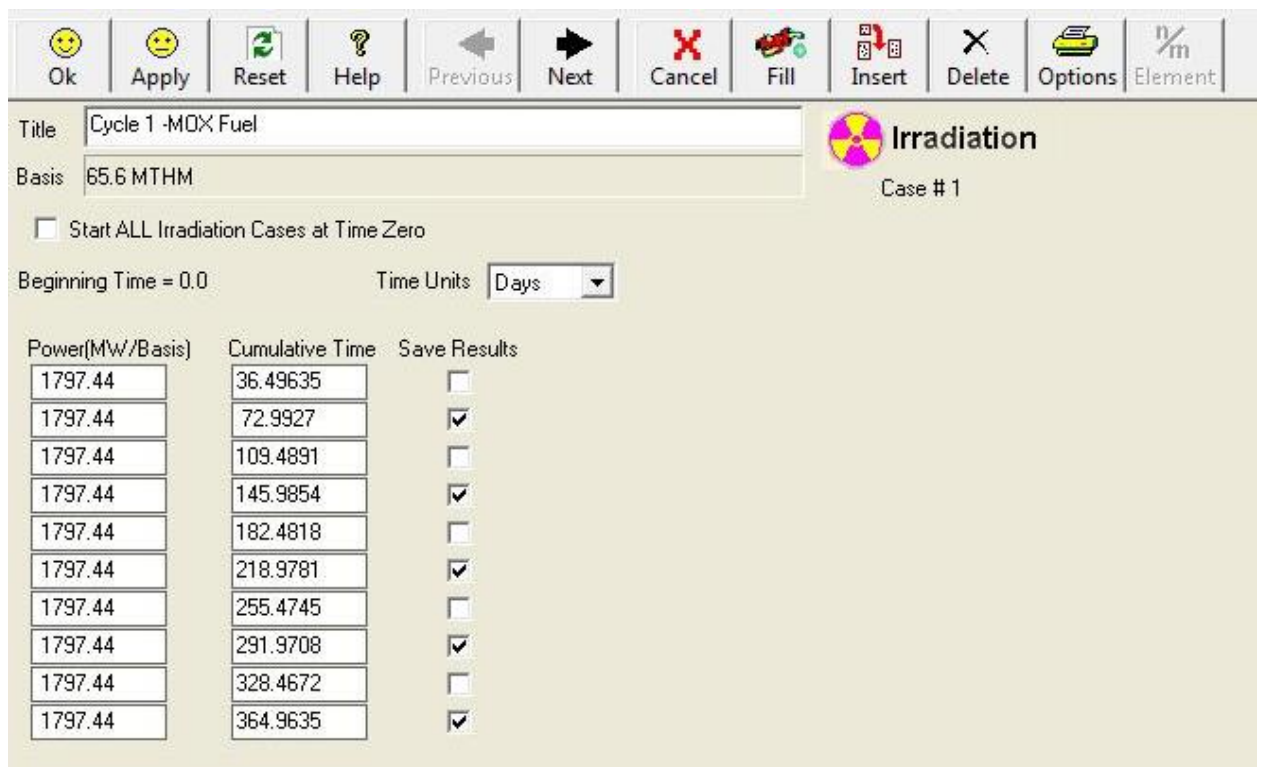


Рисунок 1.10

Работа с данным диалоговым окном будет описана ниже на конкретном примере.

Окно DECA Y DATA

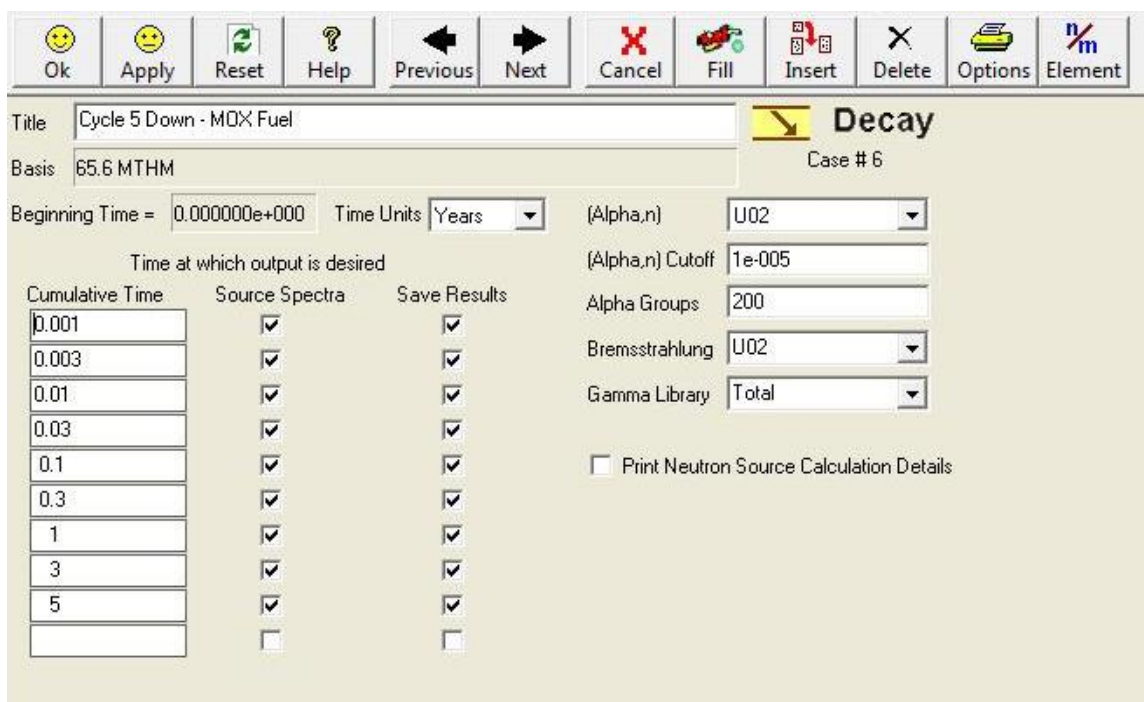


Рисунок 1.11

1.3.3 MOX Express Form

The Origen “MOX Express Form” используется для того, чтобы быстро сгенерировать подробно описанные входные данные, основанные на минимальном количестве информации. К ним относятся: тип топлива, соотношение урана и плутония, обогащение, глубина выгорания и режим облучения

MOX Fuel

Fuel Type:

Heavy Metal (g): (Pu + U + Am)

% (Pu + Am) / Heavy Metal:

% Am / (Pu + Am):

Burnup (MWd/MTHM):

Cycles:

Libraries: Per Cycle

Cooling Time: Years

Moderator Density (g/cc):

Reference Date:

Loading Date:

Power History

100% Up

Average Power: MW/MTU

Heavy Metal Distribution

Wt % Grams

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	60
	240	30
	241	10
	242	
U	234	
	235	0.2
	236	
	238	99.8

Рисунок 1.12

“Total heavy metal” обозначает суммарную начальную концентрацию Pu238, Pu239, Pu240, Pu241, Pu242, U234, U235, U236, U238 и Am241 в граммах.

Типы конфигурации топливных сборок, доступные программе OrigenArp, указаны в ARPDATA.TXT. Пользователь может добавлять другие типы топливных сборок в файл ARPDATA.TXT для библиотек, которые он создает. Техники создания APR-библиотек описаны в Sect. D1.A.2 учебника SCALE.

Процентное содержание Pu+Am в тяжелом металле и процентное содержание Am в Pu+Am необходимы, чтобы охарактеризовать топливное распределение.

Глубина выгорания. Единица измерения глубины выгорания - MWd/MTHM (МВт*сут/т тяжелого металла) (MTHM - metric ton of heavy metal). Допустимый диапазон глубины выгорания указан в ARPDATA.TXT.

Пользователь может добавлять другие величины глубины выгорания в ARPDATA.TXT для библиотек, которые он создает.

Пользователь устанавливает необходимое число циклов для заданного типа топлива, полного количества урана, обогащения, глубины выгорания, режима работы (power history). OrigenArp сгенерирует столько случаев распада/облучения, сколько необходимо для постановки задачи.

Пользователь может устанавливать минимальное число случаев, которые необходимо сгенерировать за цикл. OrigenArp ограничивает “irradiation cycles” (циклы облучения) максимум до 1000 дней. В течение перехода от “express ” к “detailed” input (входные данные), если число “libraries per cycle” меньше, чем требуемая величина, тогда будет использована введенная величина для “libraries per cycle”. Однако, если 1000-дневное ограничение требует, чтобы больше “libraries per cycle” было сгенерировано, чем запрошено пользователем, тогда “libraries per cycle” фактически использованных будет больше, чем было запрошено.

“Cooling time” – это конечное время распада. Используя “Express form”, конечный случай (последний) будет случаем распада.

Плотность замедлителя должна быть в диапазоне плотностей, указанных в файле ARPDATA.TXT. Данные, предоставленные OrigenArp устанавливают плотность воды в г/см³. Значение плотности замедлителя по умолчанию равно 1. Пользователи могут добавлять другие величины плотности замедлителя в ARPDATA.TXT для библиотек, которые они создают.

“Power history” устанавливает среднее значение уровня мощности и соотношение “up-time-to-downtime”.

“Reference date “– это время, когда топливные композиции были установлены.

“Loading Date” – это время, когда начинаются расчеты.

Окно HEAVY METAL DISTRIBUTION

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	60
	240	30
	241	10
	242	
U	234	
	235	0.2
	236	
	238	99.8

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	1.84992e+006
	240	924960
	241	308320
	242	
U	234	
	235	125034
	236	
	238	6.23918e+007
Am	241	

Рисунок 1.13

Панель “The heavy metal distribution” позволяет вводить как вес, так и весовую долю для каждого изотопа U и Pu.

Select/Save Scenario (Выбрать/сохранить сценарий)

Origin “Express data” (данные) могут быть сохранены в бинарном формате, прежде чем будут преобразованы в детальный формат. Сохраненные сценарии позже могут быть выбраны, чтобы инициализировать “Express form”.

Setup Plot (Установка графики)

После введения данных можно указать какие данные выводить отдельно в виде графиков и прилагаемых к графикам таблиц.

Нажмите кнопку “Plot Setup”

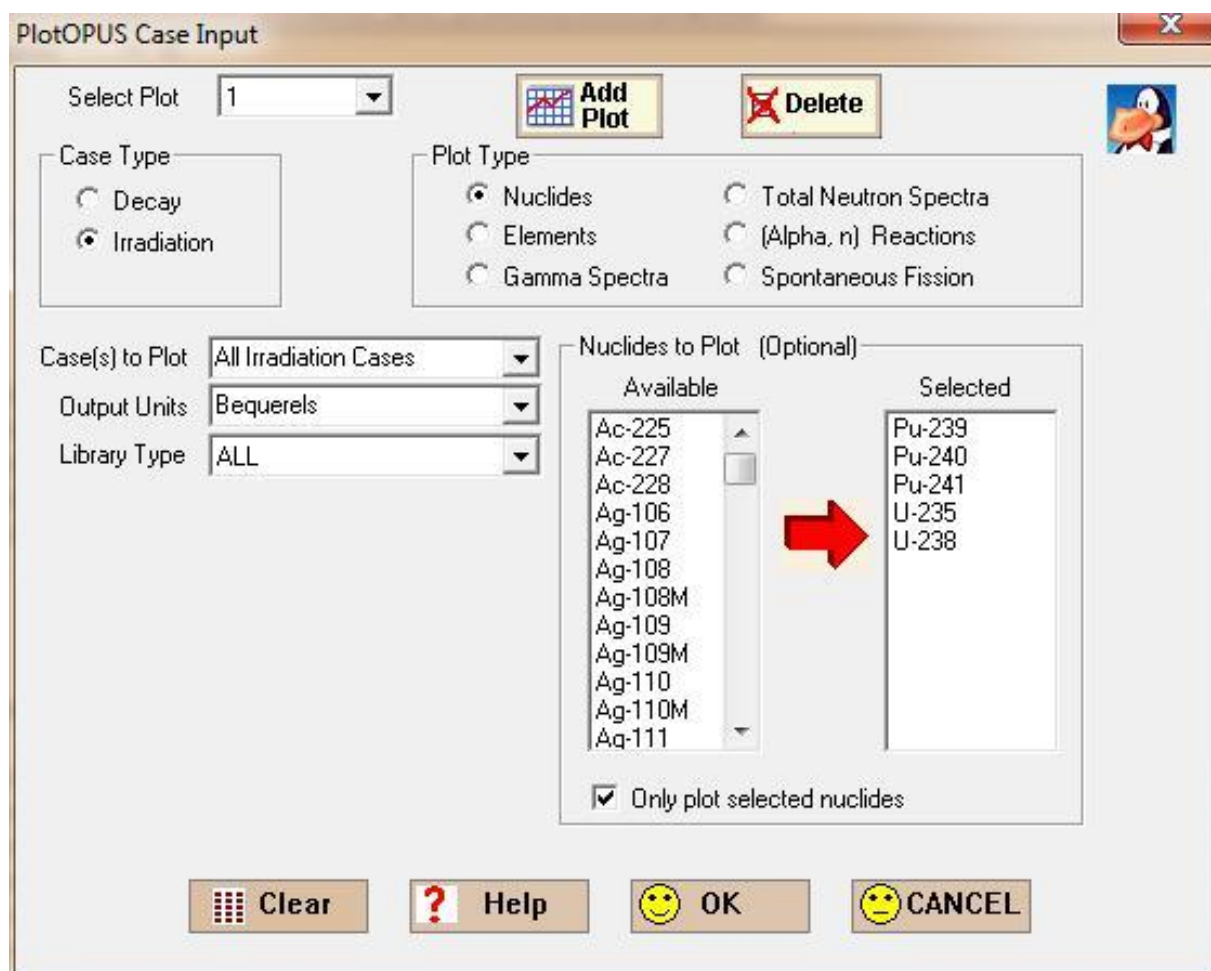


Рисунок 1.14

В появившемся окне указать тип случая и сам случай для которого будет построен график.

Можно указать какие нуклиды и в каких единицах (граммах, беккерелях и др.) будут выводиться. Для этого необходимо заполнить поля Output Units и nuclides to plot.

(нажав кнопку add plot можно рассмотреть другой случай, переключатся между графиками с помощью select plot)

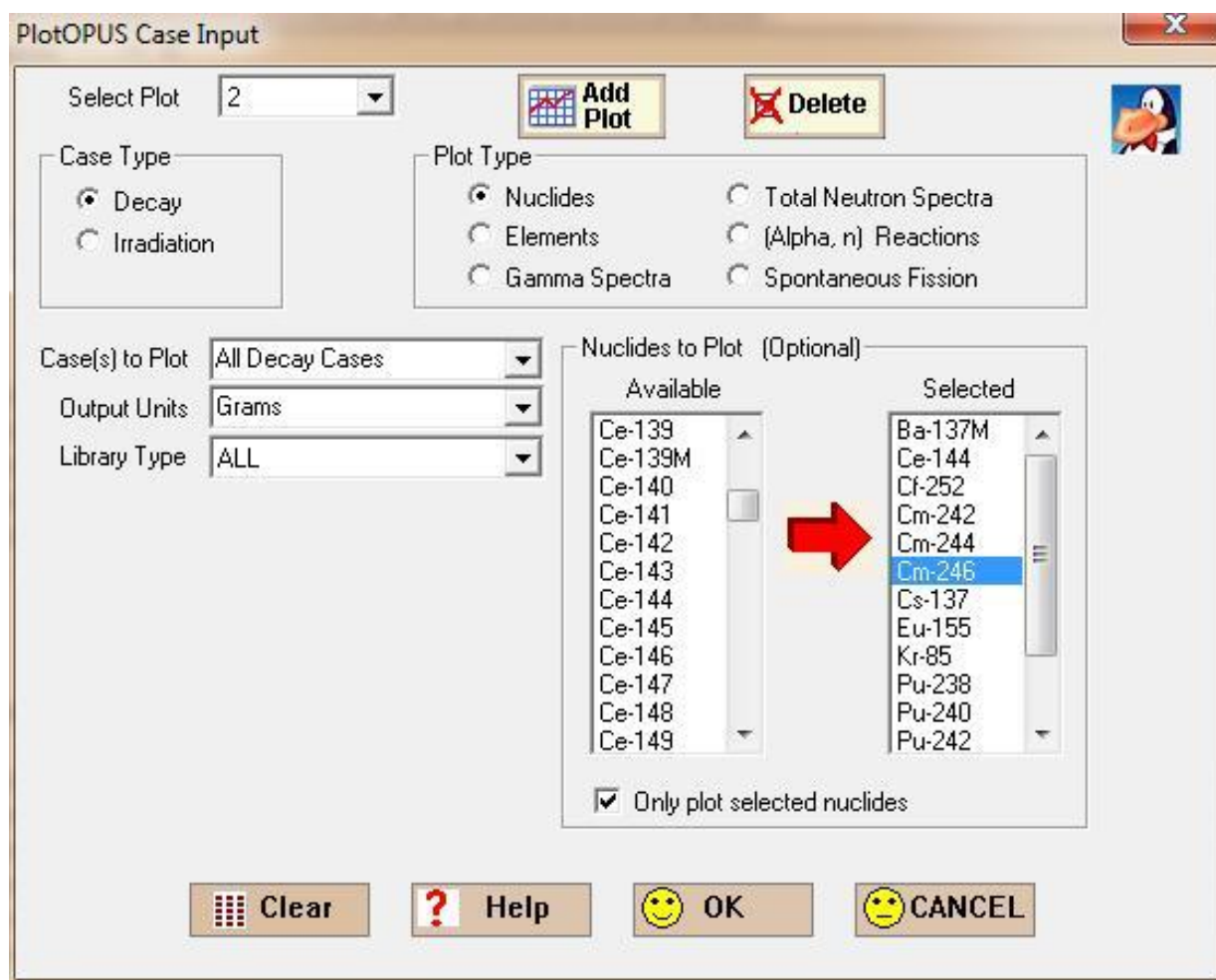


Рисунок 1.15

Сам график можно просмотреть, нажав кнопку plot в главном окне, для рассмотрения других указанных случаев необходимо нажать в появившемся окне open и выбрать нужный файл. (в случае если пользователь создал несколько графиков, программа создает несколько файлов .plot00x.plt, где x номер графика)

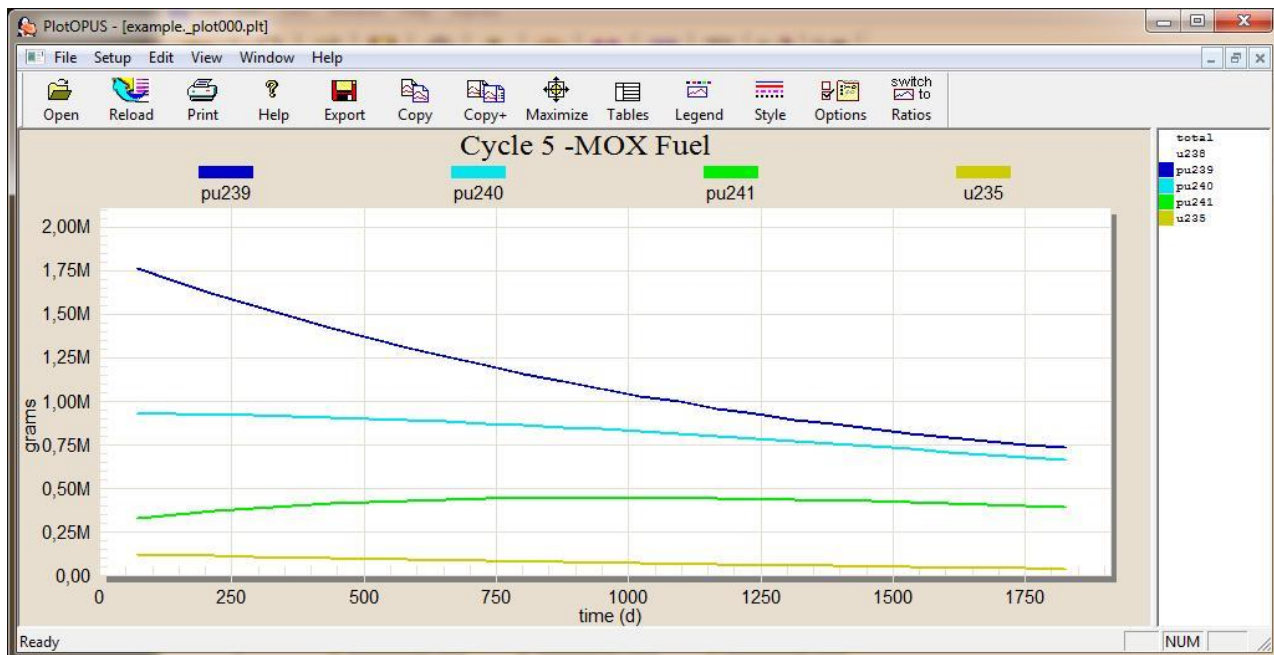


Рисунок 1.16 Пример графика

Чтобы выбрать какой-то один нуклид, нужно щелкнуть по нему левой кнопкой мыши в панели справа, что бы выбрать несколько нуклидов, следует зажать **ctrl** и щелкнуть по нужным нуклидам.

```

Cycle 5 -MOX Fuel
time (d)
grams
nuclide
25
6
7.299E+01 1.460E+02 2.190E+02 2.920E+02 3.650E+02 4.380E+02 5.109E+02 5.839E+02 6.569E+02 7.299E+02 8.029E+02 8.759E+02 9.489E+02 1.
u238 6.231E+07 6.222E+07 6.214E+07 6.205E+07 6.196E+07 6.188E+07 6.179E+07 6.170E+07 6.161E+07 6.151E+07 6.142E+07 6.133E+07 6.124E+07 6.
pu239 1.764E+06 1.687E+06 1.615E+06 1.547E+06 1.485E+06 1.420E+06 1.360E+06 1.304E+06 1.253E+06 1.206E+06 1.156E+06 1.111E+06 1.069E+06 1.
pu240 9.269E+05 9.264E+05 9.235E+05 9.185E+05 9.115E+05 9.071E+05 9.008E+05 8.926E+05 8.828E+05 8.716E+05 8.622E+05 8.513E+05 8.392E+05 8.
pu241 3.300E+05 3.502E+05 3.687E+05 3.856E+05 4.008E+05 4.112E+05 4.206E+05 4.287E+05 4.357E+05 4.415E+05 4.439E+05 4.455E+05 4.463E+05 4.
u235 1.206E+05 1.163E+05 1.120E+05 1.078E+05 1.036E+05 9.962E+04 9.569E+04 9.183E+04 8.805E+04 8.435E+04 8.077E+04 7.727E+04 7.384E+04 7.
total 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.442E+07 7.

Cycle 5 Down - MOX Fuel
time (years)
bequerels
nuclide
9
15
1.000E-03 3.000E-03 1.000E-02 3.000E-02 1.000E-01 3.000E-01 1.000E+00 3.000E+00 5.000E+00
cs137 3.888E+17 3.888E+17 3.887E+17 3.886E+17 3.879E+17 3.861E+17 3.799E+17 3.628E+17 3.464E+17
ba137m 3.672E+17 3.671E+17 3.671E+17 3.669E+17 3.663E+17 3.646E+17 3.588E+17 3.426E+17 3.271E+17
ce144 2.091E+18 2.087E+18 2.074E+18 2.037E+18 1.914E+18 1.603E+18 8.605E+17 1.455E+17 2.462E+16
sr90 1.306E+17 1.306E+17 1.306E+17 1.306E+17 1.303E+17 1.297E+17 1.275E+17 1.213E+17 1.155E+17
cm244 9.055E+16 9.058E+16 9.058E+16 9.051E+16 9.027E+16 8.958E+16 8.721E+16 8.078E+16 7.482E+16
cn242 1.043E+18 1.042E+18 1.032E+18 1.000E+18 8.972E+17 6.576E+17 2.218E+17 1.020E+16 7.332E+14
pu238 2.003E+16 2.005E+16 2.011E+16 2.027E+16 2.078E+16 2.197E+16 2.406E+16 2.475E+16 2.441E+16
sb125 3.182E+16 3.181E+16 3.177E+16 3.164E+16 3.113E+16 2.959E+16 2.477E+16 1.491E+16 8.972E+15
kr85 1.678E+16 1.678E+16 1.678E+16 1.675E+16 1.668E+16 1.646E+16 1.573E+16 1.383E+16 1.215E+16
eu155 1.603E+16 1.602E+16 1.601E+16 1.596E+16 1.579E+16 1.533E+16 1.382E+16 1.028E+16 7.643E+15
pu240 5.571E+15 5.571E+15 5.571E+15 5.571E+15 5.571E+15 5.573E+15 5.579E+15 5.596E+15 5.611E+15
pu242 3.558E+13 3.558E+13 3.558E+13 3.558E+13 3.558E+13 3.558E+13 3.558E+13 3.558E+13 3.558E+13

```

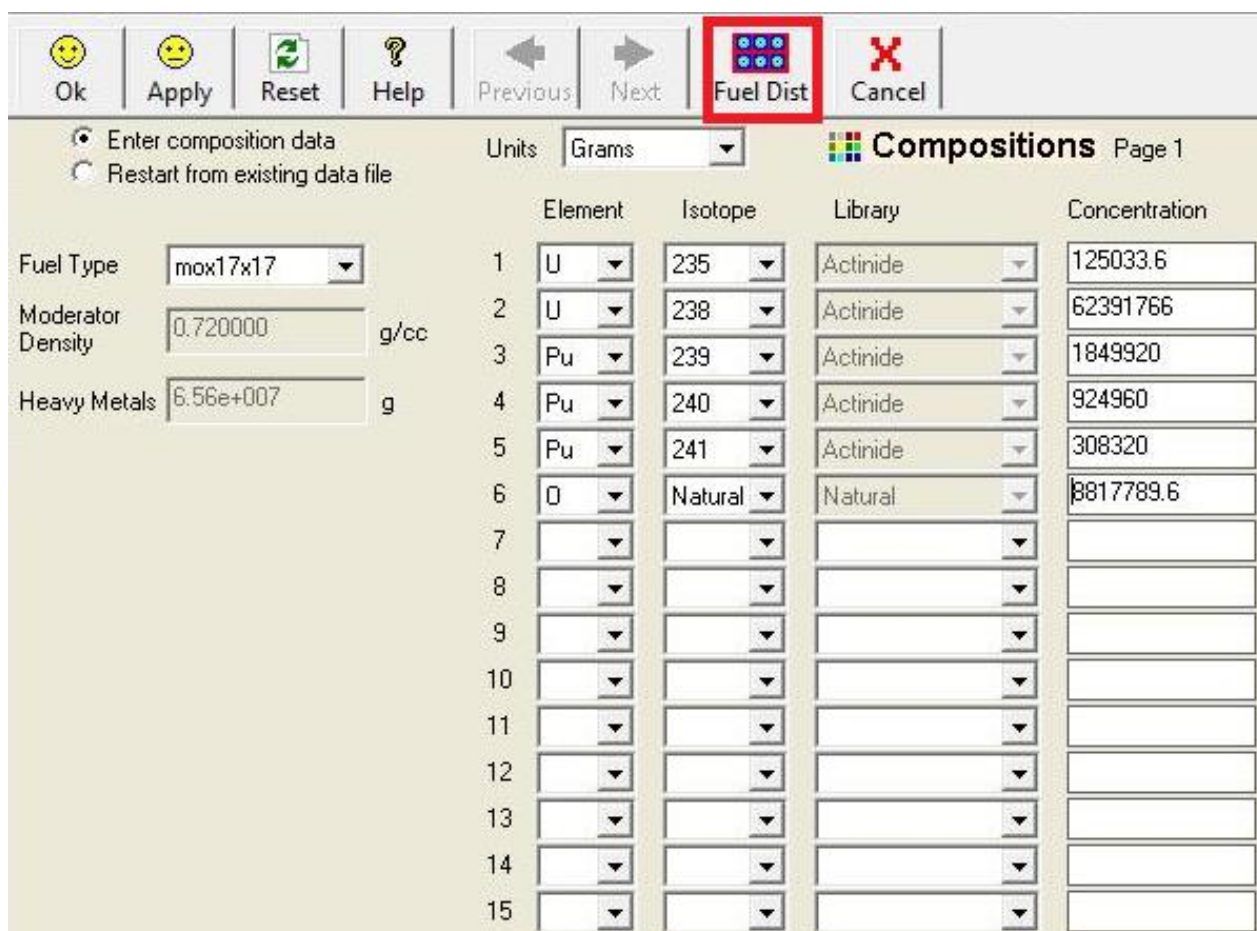
Рисунок 1.17 Пример таблицы по которой построен график

1.4 Пример - DETAIL FORM

1) Откройте OrigenArp. Если начальный вид не является “Detail Mode”, нажмите кнопку "go to detail". Заметьте, что кнопка "Plot Setup" не активна. Вы не сможете задать графические данные до тех пор, пока не будут созданы “Case data” (см. ниже).

Введите состав топлива и обогащение

Выберите кнопку "compositions", чтобы открылось окно для введения состава топлива.



The screenshot shows the 'Compositions' window in OrigenArp. The 'Fuel Dist' button is highlighted with a red box. The window contains the following data:

Element	Isotope	Library	Concentration
1 U	235	Actinide	125033.6
2 U	238	Actinide	62391766
3 Pu	239	Actinide	1849920
4 Pu	240	Actinide	924960
5 Pu	241	Actinide	308320
6 O	Natural	Natural	8817789.6
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

Рисунок 1.18

Задать нуклидный состав можно введением массы каждого нуклида в граммах или с помощью кнопки Fuel Dist

Total U + Pu g

% Pu in Heavy Metal (100 * Pu/(Pu + U))

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	60
	240	30
	241	10
	242	
U	234	
	235	0.2
	236	99.8
	238	
Am	241	

Рисунок 1.19

Здесь задается масса тяжелого металла(U+Pu) в граммах, затем содержание Pu в %.

После, задается процентное содержание изотопов U и Pu в %, так что $C(\text{Pu}239) + C(\text{Pu}240) + C(\text{Pu}241) + \dots = 100$ и $C(\text{U}235) + C(\text{U}238) + \dots = 100$

Причем, $C(\text{Pu}239) = 50-70$, $C(\text{Pu}241) > 0$.

Тип топлива устанавливаем $\text{mox}17 \times 17$, заполнение формы “Composition” закончено. Необходимо нажать “Apply” или “OK”, чтобы закончить установку состава топлива.

2) Можно задать количество групп нейтронов и гамма квантов в соответствующих окнах. (не является обязательным условием)

3) Enter Irradiation Data (Введение данных облучения)

Чтобы ввести данные облучения, нажмите кнопку "Case Data".

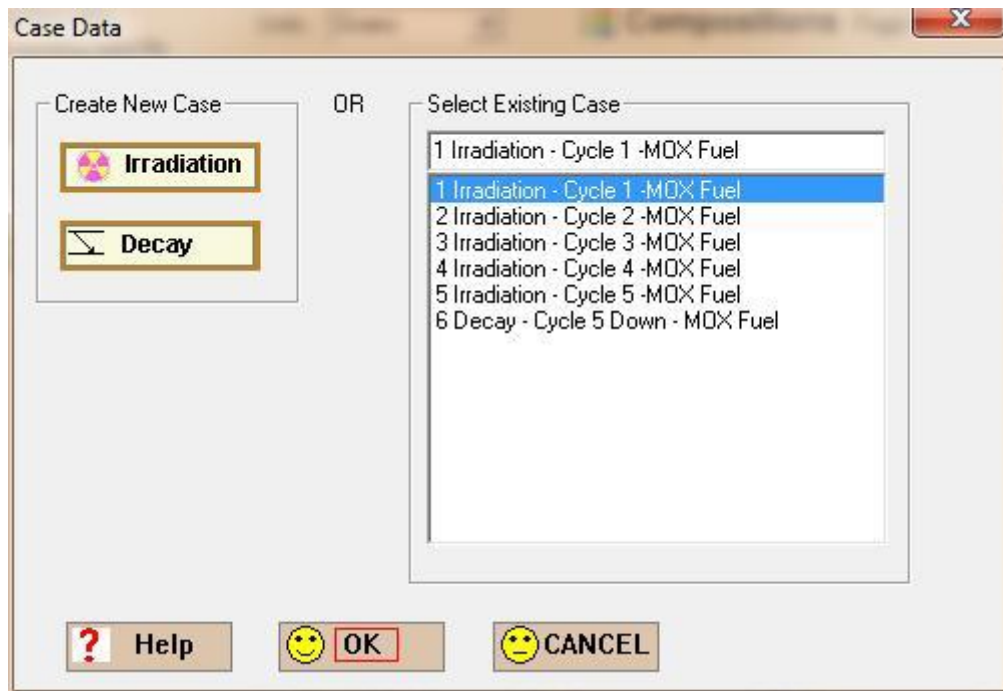


Рисунок 1.20

Выберите "Irradiation", чтобы появилось окно "irradiation for cycle 1"

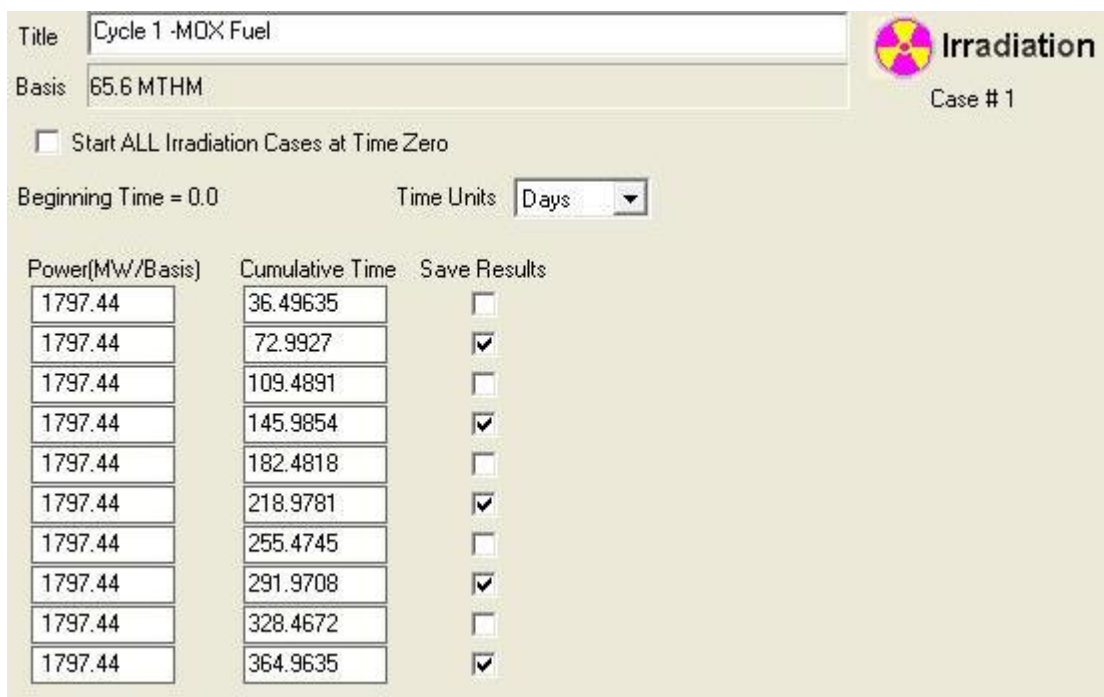


Рисунок 1.21

Введите данные облучения ("irradiation data") для Цикла №1.

Power – энерговыделение вводится в МВт/Базис (Базис=масса тяжелого металла)

Cumulative time – время выгорание(накопленное), т.е. если шаг 1=36, шаг 2 =50, шаг 3= 40, следует вводить 36, 36+50=86, 86+40=126.

Шаг не может быть больше 100 дней.

Когда данные для Цикла№1 заданы, нажмите кнопку "Next" и введите данные облучения для Цикла№2. Затем для Цикла№3.

Убедитесь, что вы выбрали “ОК” после того, как были введены данные для Цикла№3. Также, если постоянная мощность является приемлемым выбором, вы можете ввести полное время и среднюю мощность в “row one” (первый ряд) и затем использовать кнопку "Fill Form", чтобы создать данные облучения (“irradiation data”).

Данные для случая распада задаются подобно случаю облучения.

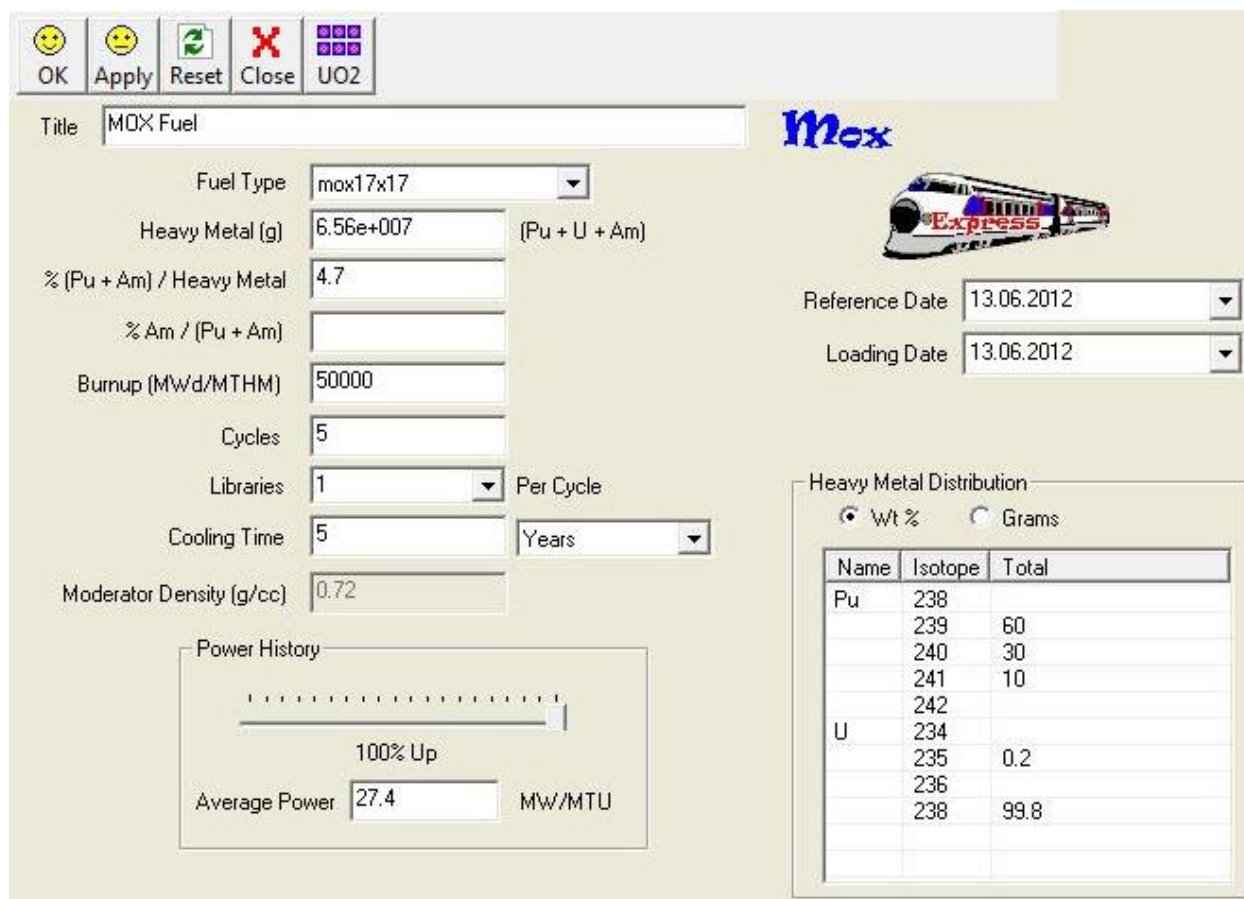
The screenshot shows the 'Decay' software interface. The title is 'Cycle 5 Down - MOX Fuel' and the basis is '65.6 MTHM'. The beginning time is '0.000000e+000' and the time units are 'Years'. The (Alpha,n) is 'UO2' and the (Alpha,n) Cutoff is '1e-005'. The Alpha Groups are '200', Bremsstrahlung is 'UO2', and the Gamma Library is 'Total'. There is a checkbox for 'Print Neutron Source Calculation Details' which is unchecked.

Time at which output is desired		
Cumulative Time	Source Spectra	Save Results
0.001	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
0.003	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
0.01	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
0.03	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
0.1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
0.3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рисунок 1.22

1.5 Пример - ORIGEN MOX EXPRESS FORM

Откройте OrigenArp. Если начальный вид не является “Express Mode”, нажмите кнопку "go to express". Также надо нажать кнопку MOX, если включен режим UO2.



The screenshot shows the 'MOX Fuel' form in the OrigenArp software. The interface includes a toolbar with buttons for OK, Apply, Reset, Close, and UO2. The form fields are as follows:

- Title: MOX Fuel
- Fuel Type:
- Heavy Metal (g): (Pu + U + Am)
- % (Pu + Am) / Heavy Metal:
- % Am / (Pu + Am):
- Burnup (MWd/MTHM):
- Cycles:
- Libraries: Per Cycle
- Cooling Time:
- Moderator Density (g/cc):
- Reference Date:
- Loading Date:

The 'Power History' section shows a graph with a 100% up trend and an Average Power of MW/MTU.

The 'Heavy Metal Distribution' section is set to 'Wt %' and contains the following table:

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	60
	240	30
	241	10
U	242	
	234	
	235	0.2
	236	
	238	99.8

Рисунок 1.23

Здесь задается тип сборки (Fuel type), Масса тяжелого металла, содержание Pu +Am в % в тяжелом металле, и содержание Am. Выгорание в МВТ*сут/т тяжелого металла, количество случаев облучения (Cycles) и на сколько частей эти случаи разбивать (Libraries), время выдержки/распада.

Нуклидный состав (Heavy metal distribution) можно задавать как в процентах аналогично подобномпу в детальной форме, так и в граммах

Heavy Metal Distribution

Wt % Grams

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	1.84992e+006
	240	924960
	241	308320
	242	
U	234	
	235	125034
	236	
	238	6.23918e+007
Am	241	

Рисунок 1.24

После введения и проверки введенных данных нажать Ок и программа сама переведет данные в детальную форму.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В данной диссертационной работе проведены изотопные расчеты облученных керамических ядерных топлив, проведена оценка их радиационных характеристик (нейтронной активности).

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Результатом является рассмотрение возможности использования смешанного уран-плутониевого мононитридного топлива в качестве перспективного топливного материала для существующих и проектных ЯЭУ, который может найти применение в атомной промышленности, в военно-промышленном комплексе, а также в космической промышленности.

Сегментировать рынок услуг по исследованию возможности можно по степени потребности исследуемого материала. Результаты сегментирования представлены на рисунке 4.1.

		Моделирование		
		Атомная промышленность	Военно-промышленный комплекс	Космическая промышленность
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по степени использования результатов исследования

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта (таблица 4.1). В качестве конкурирующих разработок были приняты: К1 – «традиционная» двуокись урана (UO_2), К2 – МОКС-топливо. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять единицу.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле (4.1):

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где:

- 1) К – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;
- 2) B_i – вес i -го показателя (в долях единицы);
- 3) B_i – балл i -го показателя.

Таблица 4.1 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Концентрация делящегося вещества	0,1	5	1	1	0,5	0,1	0,1
2. Глубина выгорания	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
3. Теплопроводность	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
4. Диапазон рабочих температур	0,05	5	5	5	0,25	0,2	0,2
5. Дымовыделение	0,01	5	4	4	0,05	0,04	0,04
6. Надежность	0,06	3	5	4	0,18	0,3	0,24
7. Потребность в материальных ресурсах	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
8. Функциональная мощность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
9. Радиационная стойкость	0,07	5	3	3	0,35	0,21	0,21
10. Физико-механические свойства	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	5	4	4	0,15	0,12	0,12
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	3	5	5	0,15	0,25	0,25
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
4. Послепродажное обслуживание	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
Итого	1				4,74	3,84	3,78

Из данного анализа видно, что исследуемый материал имеет значительные преимущества перед конкурентами. Основными из них являются относительная концентрация делящегося материала в керамическом соединении, теплопроводность и радиационная стойкость. Основной недостаток – надежность в условиях длительного реакторного облучения при относительно высоких температурах.

4.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

К сильным сторонам можно отнести следующие факторы:

- актуальность выбранной темы;
- бюджетное финансирование;
- наличие достоверных результатов измерений;
- высокая концентрация делящегося вещества в соединении;
- отличная радиационная стойкость исследуемого материала.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

К слабым сторонам можно отнести:

- надежность;
- потребность в материальных ресурсах.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

К возможностям можно отнести следующее:

- рост проникновения на рынок исследуемого материала;
- заинтересованность отечественными конструкторскими бюро;
- наладка производства материала отечественными предприятиями;
- дополнительный спрос на результаты исследования.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

К угрозам можно отнести следующее:

- невозможность проникновения на рынок исследуемого материала;
- разработка полного отечественного аналога исследуемого материала;
- появление на рынке материала со свойствами лучшими, чем у исследуемого;
- низкий спрос на результаты исследования или его отсутствие.

В таблице 4.2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	+	+	+	+
B3	–	+	+	–	–
B4	+	+	+	+	+
B5	+	+	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Актуальность выбранной темы</p> <p>С2. Бюджетное финансирование.</p> <p>С3. Наличие достоверных результатов измерений.</p> <p>С4. Высокая концентрация делящегося вещества в керамическом соединении.</p> <p>С5. Отличная радиационная стойкость исследуемого материала.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Надежность.</p> <p>Сл2. Глубина выгорания.</p> <p>Сл3. Недостаточно сведений о химической структуре и составе исследуемого материала.</p> <p>Сл4. Сложная технология производства образцов для исследований.</p> <p>Сл5. Дороговизна.</p>
--	---	--

<p>Возможности:</p> <p>В1. Рост проникновения на рынок исследуемого материала.</p> <p>В2. Заинтересованность отечественными конструкторскими бюро.</p> <p>В3. Становление исследуемого материала основным ядерным топливным материалом.</p> <p>В4. Наладка производства материала отечественными предприятиями.</p> <p>В5. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>1. Относительно высокая плотность исследуемого топливного материала приводит к улучшению нейтронного баланса ЯЭУ.</p> <p>2. Отличная радиационная стойкость материала позволяет создавать кабельные изделия, которые используются в полях ионизирующего излучения.</p>	<p>1. Увеличение глубины выгорания может быть достигнуто путем легирования исследуемого материала.</p> <p>2. Себестоимость данного перспективного топлива может быть снижена при освоении нового метода изготовления.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Невозможность проникновения на рынок исследуемого материала.</p> <p>У2. Разработка полного отечественного аналога исследуемого материала.</p> <p>У3. Появление на рынке материала со свойствами лучшими, чем у исследуемого материала.</p> <p>У4. Невозможность импорта исследуемого</p>	<p>1. Разработка полного отечественного аналога является больше преимуществом, чем недостатком, так как удешевится производство кабельных изделий с применением данного материала.</p>	<p>1. Низкий спрос или его отсутствие на результаты исследования маловероятен, так как исследуемый материал обладает большим рядом возможностей и достоинств.</p>

материала. У5. Низкий спрос на результаты исследования или его отсутствие.		
--	--	--

4.4 Планирование управления научно-техническим проектом

4.4.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта (рисунок 4.2).

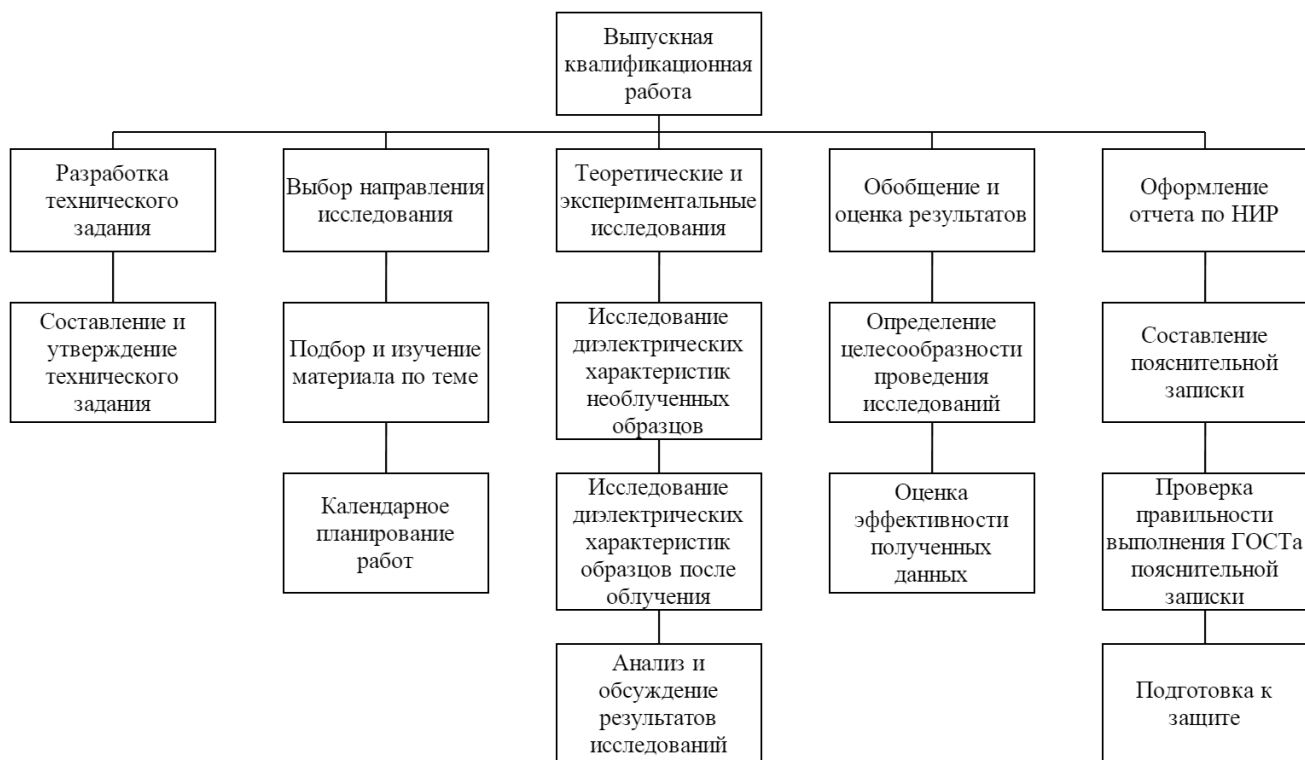


Рисунок 4.2 – Иерархическая структура работ

4.4.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2016	Приказ по ФТИ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2016	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2016	
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2016	Отчёт
5	Календарное планирование работ	12.02.2016	План работ
6	Исследование диэлектрических	13.02.2016-	Отчёт

	характеристик необлученных образцов	20.02.2016	
7	Исследование диэлектрических характеристик образцов после облучения	20.02.2016- 10.03.2016	Отчёт
8	Анализ и обсуждение результатов исследований	11.03.2016- 15.03.2016	Отчёт
9	Обобщение и оценка результатов	16.03.2016	Отчёт
10	Составление пояснительной записки	14.02.2016- 25.04.2016	Пояснительная записка
11	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2016	
12	Подготовка к защите	27.04.2016- 25.05.2016	

4.4.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ.


Линейный график представлен в таблице 4.5.


Таблица 4.5 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	2	1.02.2016	3.02.2016	Руководитель
2	Составление и утверждение технического	2	3.02.2016	5.02.2016	Руководитель

	задания				
3	Выбор направления исследований	5	5.02.2016	10.02.2016	Руководитель, студент
4	Подбор и изучение материалов по теме	2	10.02.2016	12.02.2016	Студент
5	Календарное планирование работ	1	12.02.2016	13.02.2016	Руководитель, студент
6	Исследование диэлектрических характеристик необлученных образцов	7	13.02.2016	20.02.2016	Студент
7	Исследование диэлектрических характеристик образцов после облучения	20	20.02.2016	10.03.2016	Студент
8	Анализ и обсуждение результатов исследований	4	11.03.2016	15.03.2016	Студент
9	Обобщение и оценка результатов	1	16.03.2016	16.03.2016	Руководитель, студент
10	Составление пояснительной записки	73	13.02.2016	25.04.2016	Студент
11	Проверка правильности выполнения	1	26.04.2016	27.04.2016	Руководитель, студент

	характеристик необлученных образцов																		
7	Исследование диэлектрических характеристик образцов после облучения	Студент	20																
8	Анализ и обсуждение результатов исследований	Студент	4																
9	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, студент	1																
10	Составление пояснительной записки	Студент	73																
11	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент	1																
12	Подготовка к защите	Студент	29																

 Руководитель

 Студент

4.5 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.5.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи} ,$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 4.7.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 2,05 \cdot 0,8 \cdot 360 = 590,4 \text{ руб.},$$

где $C_{\text{эл}}$ – тариф на промышленную электроэнергию (2,05 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{\text{об}}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 984 рубля.

Таблица 4.7 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электричество	–	288 кВт·ч	2,05	590,4
Бумага	SvetoCopy	300	0,35	105
Печать на листе А4	–	300	1,5	450
Ручка	Pilot BPS-GP	1	75	75
Доступ в интернет	–	4 месяца	350	1400
Всего за материалы				2620,4
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье C_m				2620,4

4.5.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ)

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме.

В данной исследовательской работе к спецоборудованию, необходимому для проведения экспериментальных работ, относятся измерительные ячейки ИЯ-2Т, ЭС-1ТМ и коаксиальный резонатор КР-500М.

Стоимость ИЯ-2Т составляет 800000 рублей, назначенный срок службы – 15 лет, стоимость ЭС-1ТМ составляет 750000 рублей, назначенный срок службы – 15 лет, стоимость КР-500М составляет 1000000, назначенный срок службы – 15 лет

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{аморт}} = C_{\text{об}} / T,$$

где $C_{\text{об}}$ – стоимость оборудования (руб);

T – срок службы (дней).

$$C_{\text{амортИЯ-2Т}} = (800000 / 5475) = 146,12 \text{ руб/дн.}$$

$$C_{\text{амортЭС-1ТМ}} = (750000 / 5475) = 136,99 \text{ руб/дн.}$$

$$C_{\text{амортКР-500М}} = (1000000 / 5475) = 182,65 \text{ руб/дн.}$$

Оборудование использовалось в течение 45 дней, таким образом, затраты на оборудование:

$$C_{\text{аморт(общ)}} = 146,12 \cdot 45 + 136,99 \cdot 45 + 182,65 \cdot 45 = 20959,2 \text{ руб.}$$

4.5.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}}$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

– при отпуске в 24 раб. дня $M=11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

– при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	24
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Студент во время прохождения преддипломной практики получает стипендию, равную 5070 руб/месяц. Среднедневная стипендия (оплата) составляет:

$$Z_{\text{дн}} = (5070 \cdot 11,2) / 223 = 254,6 \text{ руб/день.}$$

Основной заработок студента за время преддипломной практики составляет:

$$Z_{\text{осн}} = 254,6 \cdot 45 = 11457 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

– оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

– стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

– иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью доцента. Оклад доцента составляет 23265 рублей.

Надбавки к заработной плате составляют 10000 рублей (надбавки учёного совета), также районный коэффициент по Томску равен 1,3.

Основная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = 23265 \cdot 1,3 + 10000 = 40244,5 \text{ руб / месяц.}$$

Среднедневная заработная плата научного руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = (40244,5 \cdot 10,4) / 251 = 1667,5 \text{ руб / день.}$$

4.5.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}},$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы;

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

Примем коэффициент дополнительной заработной платы равным 0,15 для научного руководителя и 0,1 для студента. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Заработная плата, руб.	Руководитель	Студент
Основная зарплата	40244,5	11457
Дополнительная зарплата	6036,68	1145,7
Зарплата исполнителя	46281,18	12602,7
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	58883,88	

4.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 27,1 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (40244,5 + 6036,68) = 12542,2 \text{ руб.}$$

4.5.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Примем $k_{\text{накл}} = 30 \%$.

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (40244,5 + 6036,68) = 13884,35 \text{ руб.}$$

4.5.7 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	2620,4
2. Затраты на специальное оборудование	20959,2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	51701,5
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	7182,38
5. Отчисления во внебюджетные фонды	12542,2

6. Накладные расходы	13884,35
Бюджет затрат исследования	108890,03

4.6 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель). Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 4.3.

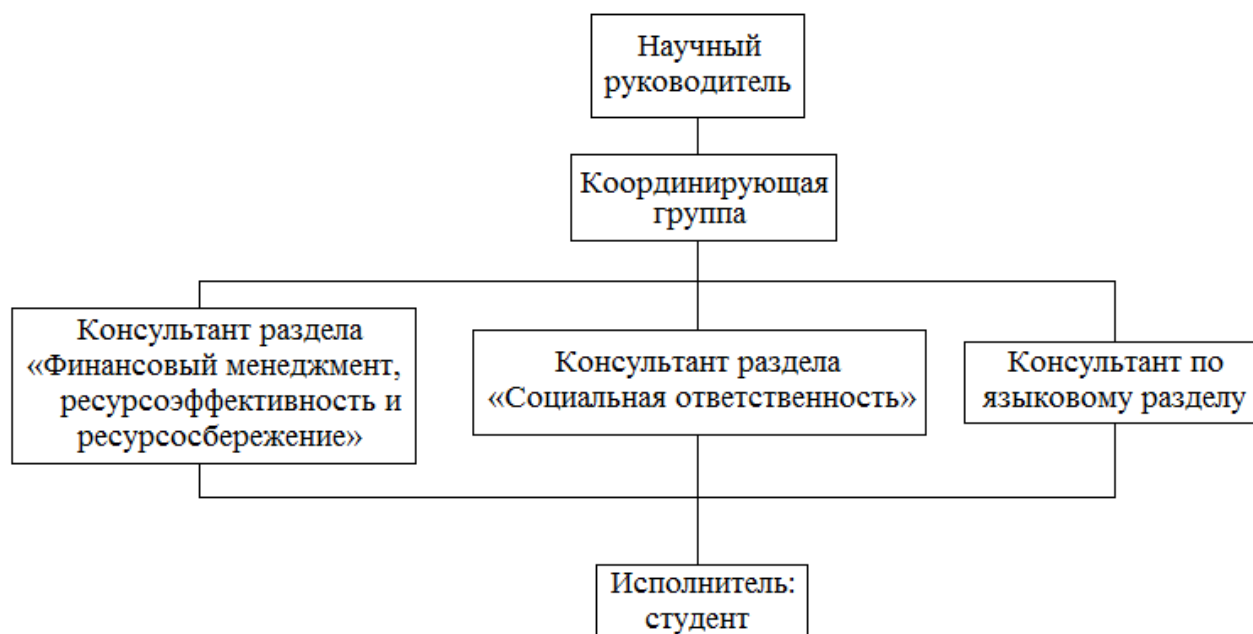


Рисунок 4.3 – Организационная структура научного проекта

4.7 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственность»	консультант по языковому разделу	Студент
Разработка технического задания	О				
Составление и утверждение технического задания	О				
Выбор направления исследований	О				И
Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	О				И
Исследование диэлектрических характеристик необлученных образцов	О				И
Исследование диэлектрических характеристик образцов после облучения	О				И
Анализ и обсуждение результатов исследований	О				И
Выполнение оценки		С			И

ресурсоэффективности и ресурсосбережения					
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);
- согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

4.8 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его

нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (таблица 4.12). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}},$$

где $I_{финр}^{исп.i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{финр}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{max}} = \frac{136827,9}{136827,9} = 1;$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{финал}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{155203,6}{136827,9} = 1,14; \quad I_{финал}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{151760,7}{136827,9} = 1,11;$$

Интегральный показатель ресурсэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности представлен ниже.

Таблица 4.12 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ ПО	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	4	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	5	3	4
3. Помехоустойчивость	0,05	5	2	3
4. Энергосбережение	0,2	5	3	4
5. Надёжность	0,15	5	5	2
6. Материалоёмкость	0,15	5	3	3
ИТОГО	1	5	3,1	2,9

$$I_{\text{тп}} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 = 5;$$

$$\text{Аналог 1} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,05 + 3 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 = 3,5;$$

$$\text{Аналог 2} = 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 = 3,25.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{финр}^p$) и аналога ($I_{финаi}^{ai}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{финр}^p}; I_{финаi}^{ai} = \frac{I_m^{ai}}{I_{финаi}^{ai}};$$

В результате:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{финр}^p} = \frac{5}{1} = 5; I_{фина1}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{фина1}^{a1}} = \frac{3,5}{1,14} = 3,07; I_{фина2}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_{фина2}^{a2}} = \frac{3,25}{1,11} = 2,93.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финаi}^{ai}}$$

Результат вычисления сравнительной эффективности проекта и сравнительная эффективность анализа представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,14	1,11	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,5	3,25	5
3	Интегральный показатель эффективности	3,07	2,93	5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,63	1,71	1

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами.

Список публикаций

1. Кнышев В. В. , Беденко С. В. , Плевака М. Н. , Бородай А. Ю. , Соболев В. К. Модель ядерно-физических процессов в мультиплицирующих системах на тепловых нейтронах с торием-232 и ураном-238 // Современные проблемы физики и технологии: тезисы докладов IV Международной молодежной научной школы-конференции: в 2 т., Москва, 17-22 Марта 2015. - Москва: НИЯУ МИФИ, 2015 - Т. 1 - С. 195-196.

2. Шаманин И. В. , Беденко С. В. , Бородай А. Ю. , Соболев В. К. , Синельникова М. -. Ядерно-физические процессы в размножающих решетках и системах с торием // Молодежь ЯТЦ: наука, производство, экологическая безопасность: сборник тезисов докладов научно-практической конференции молодых специалистов и аспирантов, Железногорск, 28-30 Октября 2015. - М.: Перо, 2015 - С. 8-11.

3. Шаманин И. В. , Губайдулин И. М. , Беденко С. В. , Мишина Н. В. , Соболев В. К. Резонансное поглощение эпитепловых нейтронов тяжелыми ядрами и внутренний блок-эффект // V Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 22-24 Октября 2014. - Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2014 - С. 91.

Приложение А

Таблица А.1 – Опыт эксплуатации ЯЭУ с нитридным, смешанным нитридным топливом

Страна	Топливо		Реактор	Максимальное выгорание, % т. а.	Максимальная линейная мощность, кВт/м	Плотность таблетки, % теоретической	Результат
	(U,Pu)N (подслой)	UN (подслой)					
США [8]	145 ТВЭЛОВ (He, Na)		EBR II, ETR, MTR	9,0 (Na) 18,7 (He)	78 ÷ 124	82 ÷ 97	Разгерметизация 20 ТВЭЛОВ с натриевым и 4 ТВЭЛОВ с гелиевым подслоями
		> 100 ТВЭЛОВ (He)	FFTF, EBR II, ETR, MTR	6	> 70	87 ÷ 96	Герметичны
ЕС [9, 10]	14 ТВЭЛОВ (He)		HFR, SILOE, DFR, "Рапсодия", "Феникс"	5,0	45 ÷ 130	81 ÷ 95	Разгерметизация Разгерметизация Герметичны
	1 ТВЭЛ (Na)			3,4	130	94	
	16 ТВЭЛОВ (He)			7,0	41 ÷ 73	82 ÷ 83	
Япония [11]	4 ТВЭЛА (He)		JMTR "Дзёё"	5,5	65 ÷ 73	83 ÷ 86	Герметичны Герметичны
	2 ТВЭЛА (He)			4,5	80	83 ÷ 86	
Россия [12, 13]	(U,Pu _{0,2})N: 5 ТВЭЛОВ (He) 4 ТВЭЛА (He)		БОР-60	4,00	104,5	85 ÷ 86	Герметичны
	(U,Pu _{0,45})N: 2 ТВЭЛА (He)			8,95	65,0	85 ÷ 86	
	(U,Pu _{0,65})N: 2 ТВЭЛА (He)			9,40	41,9	85	
		1300 ТВЭЛОВ (He) 91 ТВЭЛ (He)	БР-10 БОР-60	12,10	54,5	85	Разгерметизация Разгерметизация к концу облучения
			8,8	45	92		
			11,0	40	-		

Таблица А.2 – Характеристики экспериментальных твэлов БОР-60 и БН-600 со смешанным нитридным топливом

Параметр	БОР-60					БН-600		
	ОУ-1	ОУ-2	ОУ-3	ОУ-4	ОУ-5	КТВС-1	КТВС-2	КТВС-3
Плотность топлива, г/см ³	12,0±0,3	12,0±0,3	12,0±0,3	12,3 ± 0,2 13,0 ± 0,2	12,2±0,2 12,6±0,2	12,2 ± 0,3	12,2 ± 0,3	12,2 ± 0,3
Массовая доля изотопов плутония в смеси урана, %	12,0	12,0	12,0	12,0	20,0	14,0	11,5	9,8
Диаметр таблетки, мм	8,1	8,1	8,1	7,9	7,9	5,8	7,9	8,5
Материал оболочки	ЭП-823				ЧС-139, ЭК-181	ЧС-68	ЭК-164	ЭП-823
Диаметр оболочки, мм: наружный внутренний	9,4 8,4	9,4 8,4	9,4 8,4	9,4 8,4	9,3 8,1	6,9 6,1	9,3 8,1	9,7 8,7
Заполнение зазора	He			Легированный Рь	He			