

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Обнинский институт атомной энергетики –

филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

(ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

Отделение Ядерной физики и технологий

Выпускная квалификационная работа -

(дипломная работа)

по специальности: 14.05.02 «Атомные станции: проектирование,
эксплуатация и инжиниринг»

Специализация: «Проектирование и эксплуатация атомных станций»

**«Способы повышения глубины выгорания топлива в реакторе ВВЭР-
1200»**

Выполнил:
студент гр. АЭС2-С14

(подпись, дата)

Одабашы О. Г.

Руководитель ВКР,
старший преподаватель
ОЯФиТ(О)

(подпись, дата)

Терехова А.М.

Нормоконтроль

(подпись, дата)

Фомин Р.В.

Выпускная
квалификационная работа
допущена к защите

(№ протокола, дата заседания комиссии)

Руководитель
образовательной программы
14.05.02 «Атомные станции:
проектирование,
эксплуатация и инжиниринг»,
д.т.н., профессор

(подпись, дата)

Лескин С.Т.

Обнинск, 2020 г.

РЕФЕРАТ

Работа 40 с., 8 рис., 8 табл., 16 ист.

ВЫГОРАНИЯ, ГЛУБИНА ВЫГОРАНИЯ, УВЕЛИЧЕНИЕ ГЛУБИНЫ
ВЫГОРАНИЯ, ВВЭР-1200, UNK, ТВС, АЭС.

Объектом исследования является ТВС ВВЭР-1200 на основе оксидного уранового топлива с разными обогащениями, с добавлением оксида гадолиния и с изменением диаметра оболочки твэла.

Предмет исследования – нейтронно-физические характеристики ТВС ВВЭР-1200 в течение кампании топлива.

Цель работы – исследовать возможные способы повышения глубины выгорания топлива в реакторе ВВЭР-1200.

Для решения поставленной цели проводил расчет нейтронно-физических характеристик для ТВС ВВЭР-1200 с использованием программного комплекса UNK.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЭС	-	атомная электрическая станция
ВВЭР	-	водо-водяной энергетический реактор
ВП	-	выгорающие поглотители
ГЦТ	-	главный циркуляционный трубопровод
РБМК	-	Реактор большой мощности канальный
КИУМ	-	коэффициент использования установленной мощности
ПС	-	поглощающий стержень
РУ	-	реакторная установка
СУЗ	-	система управления и защиты
ТВС	-	тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	-	тепловыделяющий элемент
МАГАТЭ	-	Международное агентство по атомной энергии
ОТВС	-	отработавшие тепловыделяющие сборки
ТВЭГ	-	тепловыделяющий элемент с уран-гадолиниевым топливом

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1200	5
1.1 Общие характеристики реактора типа ВВЭР-1200	5
1.2 Тепловыделяющий элемент	10
1.3 О проекте АЭС <Аккую>	12
ГЛАВА 2. ПОВЫШЕНИЕ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР-1200	14
2.1 Глубина выгорания	14
2.2 Общие сведения о глубине выгорания в активной зоне	16
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ	20
3.1 Моделирование ТВС ВВЭР -1200 с использованием программного комплекса UNK	20
3.2 Исследование разных способов повышения глубины выгорания и топливной кампании активной зоны в реакторе ВВЭР-1200	29
3.2.1 Исходные данные для расчетного анализа	29
3.2.2 Результаты расчетных исследований	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	39

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире работают пять типов ядерных реакторов — это реактор Водо-Водяной Энергетический реактор, Реактор Большой Мощности Канальный, реактор на тяжелой воде, реактор с шаровой засыпкой и газовым контуром, реактор на быстрых нейтронах. Все типы реакторов имеют общие конструкции, но у каждого типа есть свои отличительные элементы конструкции. ВВЭР строились в основном на территории СССР и в Восточной Европе, реакторы на тяжелой воде в основном строились в Америке и эти реакторы используют в странах Западной Европы и Юго-Восточной Азии.

Реактор - водо-водяной, корпусного типа, который работает на тепловых нейтронах с водо-водяным теплоносителем-замедлителем, он построен в виде вертикального цилиндрического корпуса с эллиптическим днищем, в котором находится активная зона и внутри корпусные устройства. Сверху реактор плотно закрыт крышкой с установленными на ней приводами механизмов и органов регулирования и патрубками для вывода кабелей датчиков внутриреакторного контроля. Крышка к корпусу крепится шпильками.

В верхней части корпуса имеются патрубки для подвода и отвода теплоносителя (на каждой петле по два патрубка), расположенные в два ряда, так же- патрубки для аварийного подвода теплоносителя при разгерметизации контура. Применение корпуса с двухрядным расположением патрубков дает возможность уменьшить габариты корпуса по сравнению с однорядным, и также упрощает схему циркуляции теплоносителя в реакторе за счет разделения потока теплоносителя сплошной кольцевой перегородкой.

Энергетика является одной из главных отраслей каждой страны, и по тому для её развития уделяют большое значение. Сейчас многие страны развивают атомную энергетику, так как она составляет низкую себестоимость получаемой электроэнергии, что делает ее взаимодействующей с энергетикой на органическом топливе. Путем максимального использования результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных в

обоснование проектов реакторной установки ВВЭР и учета опыта эксплуатации реакторной установки ВВЭР на АЭС дает возможность улучшение экономичности, надежности и безопасности реакторной установки. В данный момент придают большое значение модернизации топливного цикла, так как это позволит снизить себестоимость топливной составляющей. А именно работают над задачей по увеличению глубины выгорания и увеличению длины кампании топлива. И было разработано топливо с увеличенным обогащением, а также добавление выгорающих поглотителей.

Целью данной работы является исследование способов повышения глубины выгорания и длины топливной кампании активной зоны реактора ВВЭР-1200.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи

- изучение характеристик реактора типа ВВЭР-1200;
- анализ способов повышения глубины выгорания и продления топливной кампании активной зоны реактора типа ВВЭР-1200;
- изучение работы в программном комплексе «UNK»;
- разработка модели тепловыделяющей сборки;
- анализ полученных результатов.

ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1200

1.1 Общие характеристики реактора типа ВВЭР-1200

В качестве исходных данных был взят энергоблок Нововоронежской АЭС с реактором ВВЭР-1200. Основные конструктивные отличия реактора ВВЭР-1200 для АЭС-2006 (В-491) по отношению к реактору ВВЭР-1000:

- улучшены показатели эффективности использования топлива в активной зоне;
- усовершенствованы эксплуатационные характеристики реактора;
- длина корпуса реактора увеличена на 300 мм за счет увеличения длины опорной обечайки.

Удлинение корпуса реактора позволяет:

- сократить отметку верха активной зоны по отношению к отметке формы опорной, что позволяет сократить дозовые нагрузки на персонал, который обслуживает ГЦНА при работе реактора на мощности;
- увеличить расстояние от верха активной зоны до шва приварки опорной обечайки с обечайкой зоны патрубков, что приведет к уменьшению величины флюенса быстрых нейтронов;
- увеличить расстояние от входного патрубка корпуса до верха активной зоны, иными словами, улучшить условия охлаждения активной зоны в аварийных ситуациях с потерей теплоносителя;
- увеличен внутренний диаметр корпуса реактора активной зоны на 100 мм.

Увеличение диаметра корпуса дает возможность:

- уменьшить значение флюенса быстрых нейтронов на стенку реактора с целью обеспечения проектного срока службы до 60 лет;

– снизить потоки нейтронов в месте шахты реактора и зоны патрубков, тем самым улучшить радиационную обстановку (если при работе реактора будет необходим доступ людей в указанные зоны). Основные параметры корпус реактора показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры корпус реактора

Параметр	ВВЭР-1000	ВВЭР-1200
Длина, мм	11185	11185
Внутренний диаметр, мм	4150	4250
Толщина стенки в месте активной зоны, мм	192,5	197,5
Масса, т	320	330

Источник: [1]

В активной зоне реактора находится 163 тепловыделяющие сборки (ТВС), часть из которых содержит органы регулирования (ОР). Все ТВС активной зоны имеют шестигранное сечение. Топливо — это слабо обогатенная двуокись урана (UO_2).

На реакторе ВВЭР-1200 используется ТВС-2М, конструкция основана на ТВС-2, при этом удлинени топливный столб. ТВС разработана с учётом обеспечения мирового уровня основных показателей: максимальная глубина выгорания 60 МВт.сут/Кг U для топливного цикла 4х12 месяцев, геометрическая стабильность во время срока эксплуатации ремонтпригодность с применением стенда инспекции. В качестве ядерного топлива на АЭС применяется двуокись урана, спеченная в виде таблеток. Из таблеток собирается цилиндрический тепловыделяющий элемент-ТВЭЛ, из ТВЭЛ создают тепловыделяющие сборки ТВС, которые устанавливаются в активную зону реактора. ТВС для АЭС по геометрии одинаковые характеристикам ТВС ВВЭР–1000, но имеют некоторые усовершенствования в конструкции и технологии изготовления. В реакторной установке АЭС спроектировано применение порядка 12 типов ТВС, которые отличаются по обогащению топлива, а также по наличию и схеме расположения выгорающего поглотителя. Среднее обогащение топлива от 1,30 % до 4,95 %.

Основные характеристики реактора и параметры теплоносителя написаны в таблице 2.

Таблица 2 – Основные характеристики реактора и параметры теплоносителя

Характеристика	Значение
Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	3200
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	298,2
Температура теплоносителя на выходе из реактора, °С	328,9
Количество петель, шт	4
Время работы на номинальной мощности в течение года, ч, эффективное	8400
Номинальное время пребывания ТВС в активной зоне, годы	4-5
Количество ТВС в активной зоне, шт.	163
Количество ТВС с ПС СУЗ, шт.	121

Источник: [1]

Для регулирования поля энерговыделения по радиусу активной зоны, уменьшения $K_{эфф}$ в начале цикла выгорания топлива и запуска реактора в области отрицательных коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя применяются топливные элементы с уран-гадолиниевым топливом (ТВЭГи), которые установлены в ТВС. В качестве интегрированного выгорающего поглотителя используется гадолиний (Gd), в виде оксида (Gd_2O_3).

Характеристики топлива для реакторной установки АЭС показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики топлива для РУ ВВЭР-1200

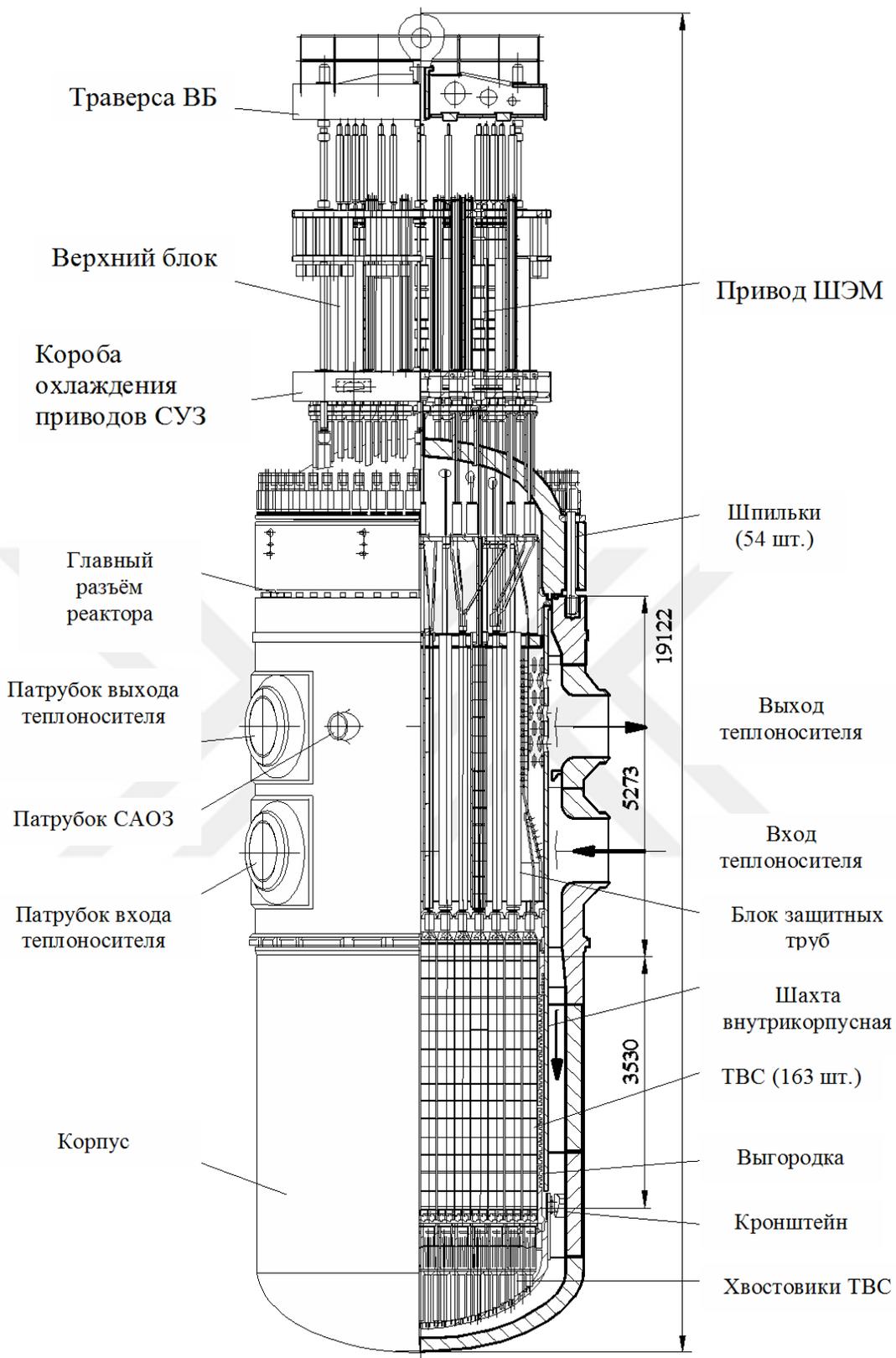
Наименование характеристик	Значение
Масса ТВС, кг	742
Количество ТВЭлов и ТВЭгов в ТВС, шт.	312
Шаг между ТВЭлами (ТВЭгами), мм	~12,8
Количество направляющих каналов под ПС СУЗ в ТВС, шт.	18

Продолжение таблицы 3

Материал направляющих каналов	Сплав Э-635
Диаметр НК (наружный/внутренний), мм	~0,8
Инструментальный канал: -количество, шт. -материал; -наружный диаметр, номинальный, мм; -внутренний диаметр, номинальный, мм	1 Э-635 ~13 ~11
Топливо таблетки твэла	Диоксид урана (UO_2)
Топливо таблетки твэга Массовая доля Gd_2O_3 в топливе твэга, %вес.5.0-8.0	Спеченная смесь Диоксид урана и оксида гадолиния ($UO_2 + Gd_2O_3$)
Материал оболочки твэла (твэга)	Сплав Э-110
Наружный диаметр оболочки твэла (твэга), номинальный, мм	9,1
Внутренний диаметр оболочки твэла (твэга), мм	~7,7
Наружный диаметр таблетки, номинальный, мм	7,6
Диаметр центрального отверстия в топливной таблетке твэла (твэга), мм	1,2
Среднее обогащение топлива ТВС по $U235$ для первой загрузки, % масс.	1,3 2,4 3,3 4,0 4,4
Среднее обогащение топлива ТВС по $U235$ для стационарных топливных загрузок, % масс.	4,0 4,8 4,90
Количество твэгов в пределах одной ТВС, шт	0 6 9 12
Обогащение топлива в твэгах по $U235$, % масс.	2,4 3,3 3,6

Источник: [1]

Конструкции реактора ВВЭР-1000 корпуса с двухрядным расположением патрубков дает возможность уменьшить габариты корпуса. Общий вид строение представлен на рисунке 1.



Источник: [2]

Рисунок 1 – Строение ВВЭР-1200

Основные характеристические отличия между реакторами ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000 написаны в таблице 4.

Таблица 4 – Основные характеристические отличия реактора ВВЭР-1200 для АЭС-2006 (В-491) по отношению к реактору ВВЭР-1000

Наименование характеристики	ВВЭР-100	ВВЭР-1200
Количество ТВС, загружаемых при перегрузке, шт:	42	42
Среднее обогащение топлива подпитки по ^{235}U , массовый %	4,26	4,79
Длительность топливной загрузки при работе на номинальной мощности, эфф. сут	292,9	342,5
Выгорание выгружаемого топлива, МВт·сут/кгU:		
- среднее по всем ТВС	48,4	55,5
- максимальное по ТВС	51,5	59,1
Максимальная в ходе работы топливной загрузки относительная мощность ТВС (Kq)	1,31	1,37
Максимальная в ходе работы топливной загрузки относительная мощность твэла (Kг)	1,46	1,52
Максимальная линейная мощность твэла (Ql), Вт/см	288	299

Источник: [2]

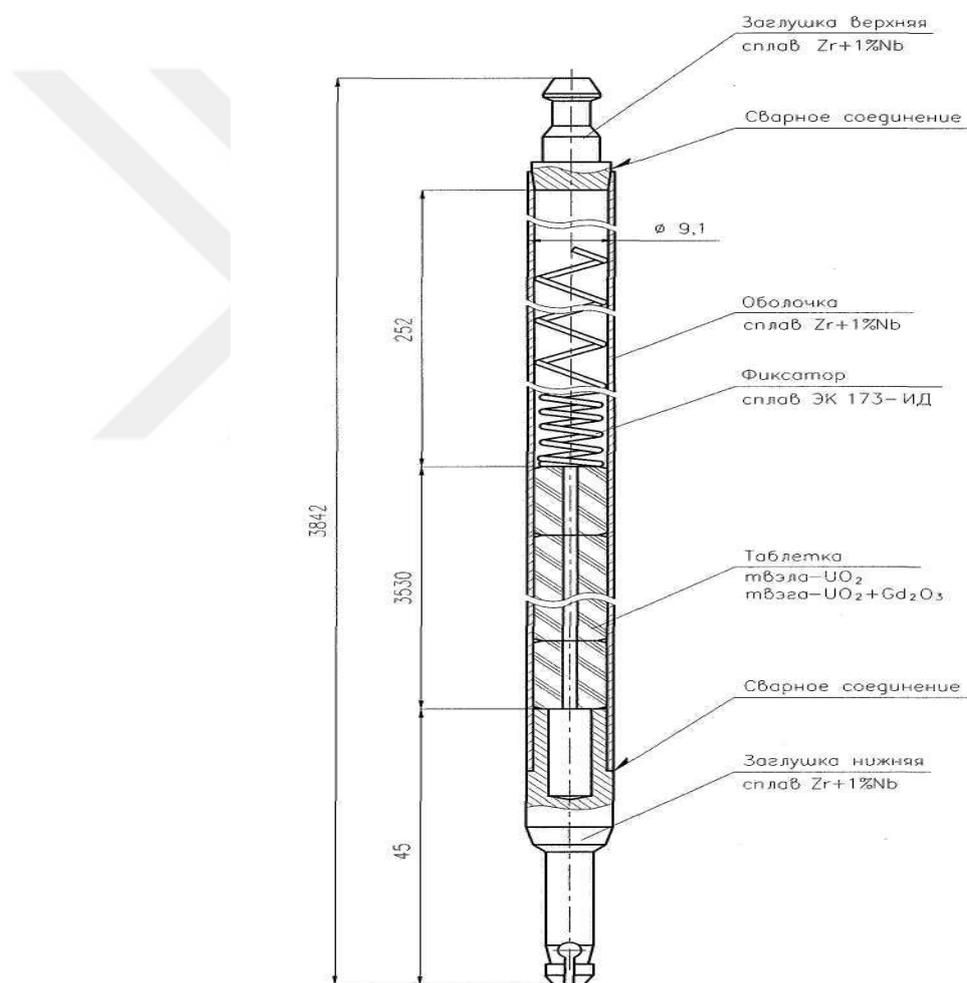
1.2 Тепловыделяющий элемент

Твэлы и твэги предназначены для выработки тепла и подогрева проходящего через него теплоносителя, твэл ядерного реактора ВВЭР-1200 представляет собой трубку, размещенную таблетками из двуокиси урана (UO_2) и герметично уплотненную концевыми деталями с помощью сварки.

Твэл (твэг) состоит из заглушки верхней, оболочки, заглушки нижней, топливного сердечника, набранного из топливных таблеток и фиксатора. Для изготовления оболочки и заглушек твэла (твэга) используется сплав Э -110. Он подтвердил качественную многолетнюю проверку в ходе эксплуатации на ВВЭР-1000 (опыт эксплуатации в УТВС с 1993 года) и ВВЭР - 440 для, он освоен

производством для применения его в качестве конструкционного материала для ЦДР.

Для увеличения загрузки топлива в ТВС удлинен твэл (твэг) и топливный столб в твэле (твэге) на 200 мм относительно существующего штатного твэла (твэга) и увеличена таблетка (наружный диаметр с 7,57 до 7,60 мм и уменьшен диаметр центрального отверстия с 1,4 до 1,2 мм). В процессе сохранения величины газосборника и наличия центрального отверстия используется предложенный опыт разработки, эксплуатации твэлов ВВЭР-1000 и технологии их изготовления. Общий вид твэл представлен на рисунке 2.



Источник: [1]

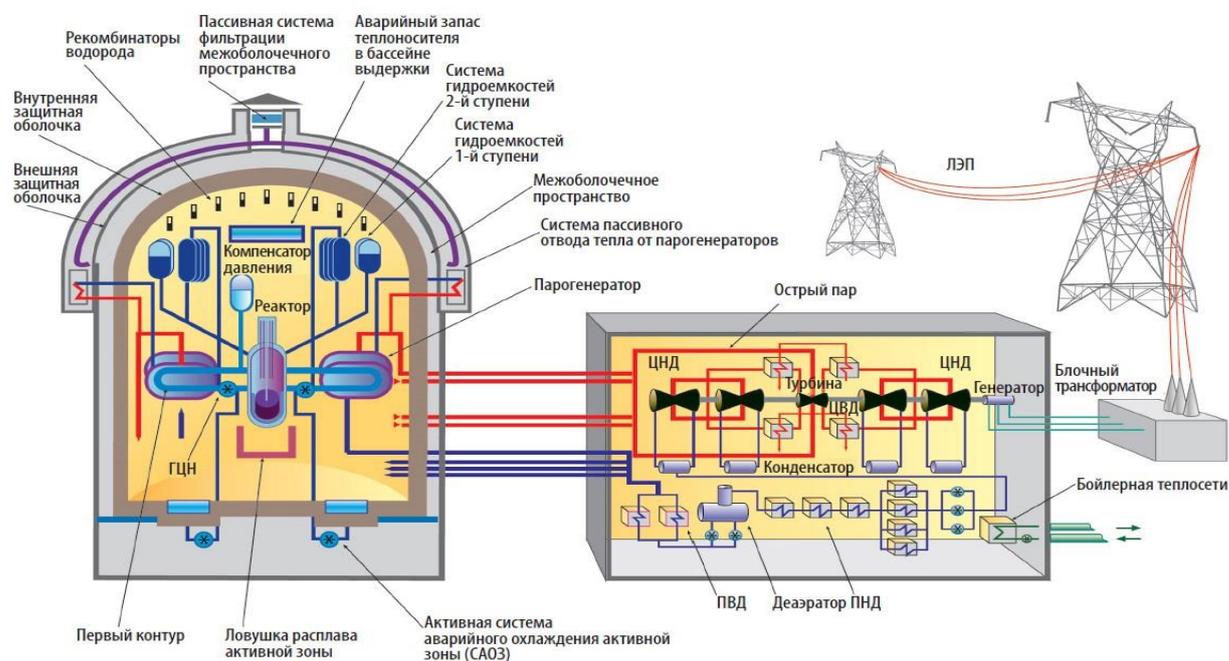
Рисунок 2 – ТВЭЛ и ТВЭГ

Спроектировано увеличение топливного цикла взамен использования температурного и мощностного эффектов реактивности на срок до 30-ти суток.

Также предусмотрен повышенный уровень выгорания топлива на уровне 70 МВт.сут/кг U в среднем по топливу максимально выгоревшей ТВС. Используется урановое топливо UO_2 , можно заменить уран-гадолиниевым топливом $UO_2Gd_2O_3$ [1].

1.3 О проекте АЭС <Аккую>

В 1955 году Турция с США заключили соглашение о мирном использовании атома. В последующие годы комиссия начала работу по атомной энергетике, исследования по вопросам строительства АЭС и по выбору площадки строительства первой АЭС. В 1976 году получена лицензия на площадку «Аккую» на Средиземноморском побережье. После того как было подписано соглашение о сотрудничестве с МАГАТЭ, развитие вопроса комиссии по строительству приостановилось из-за экономических проблем в Турции. Проект АЭС «Аккую» показан на рисунке 3.



Источник: [3]

Рисунок 3 – Схема энергоблока ВВЭР-1200 «Аккую»

В январе 2010 года было объявлено совместное заявление начала двусторонних переговоров между заместителем председателя правительства Российской Федерации и министра энергетики и природных ресурсов Турецкой Республики о сотрудничестве в области строительства АЭС в Турции.

В мае 2010 году подписано соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Турецкой Республики (МПС) о сотрудничестве в сфере строительства и эксплуатации атомной электростанции на площадке «Аккую» в Турецкой Республике.

Проект АЭС «Аккую» предусматривает 4 энергоблока, мощностью 1200 Мвт каждый. Это серийный проект атомной электростанции АЭС-2006 на основе проекта Нововоронежской АЭС-2 (Россия, Воронежская область). Срок службы АЭС «Аккую» – 60 лет. Топливом является слабообогащенная двуокись урана [3].

ГЛАВА 2. ПОВЫШЕНИЕ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР-1200

2.1 Глубина выгорания

Выгорание ядерного топлива – постоянное снижение количества ядерного топлива за счет поглощения нейтронными ядрами. Выгорание приводит к уменьшению запас реактивности. Другое определение глубины выгорания ядерного топлива — это физическая величина, равная энергии деления, выделяющейся при работе ядерного топлива в реакторе на единицу массы тяжелых атомов в свежем топливе. В этом случае используется размер глубины выгорания МВт·сут/кг. В эксплуатационном процессе для количественной оценки выгорания топлива используется понятие глубины выгорания.

Глубины выгорания – определяется как отношение энерговыработка, $Q_K = W_p \cdot t$ (МВт·сут) полученной за время t работы реактора на мощности W_p (МВт), к полной начальной загрузке реактора M_U (кг) [4].

$$B = \frac{Q_K}{M_U} \left[\frac{\text{МВт.сут}}{\text{Кг}} \right]. \quad (1)$$

Основным процессом, происходящим в ядерном реакторе, является деление ядер урана и плутония при поглощении нейтронов. В результате реакции деления ядро тяжелого изотопа распадается на два более легких ядра - осколок деления. Все части деления являются радиоактивными ядрами. Они испытывают бета-распад из-за избытка нейтронов в этих ядрах. Очень часто дочернее ядро распада будет в возбужденном состоянии. Гамма-лучи или задержанные нейтроны излучают гораздо меньше при переходе из захватывающего состояния в основное ядро. Фрагменты с одинаковым массовым числом образуют изобарную изотопную цепь из различных элементов.

Все изотопы в работающем ядерном реакторе могут взаимодействовать с нейтронами. Некоторые ядерные реакции приведут к появлению новых изотопов, большинство из которых являются радиоактивными. В ядерных реакторах на тепловых нейтронах основными реакциями, вызывающими появление новых изотопов, являются радиационный захват нейтрона и деление тяжелых ядер.

В результате реакции захвата нейтронного излучения конкретным ядром ядро нового изотопа того же химического элемента, как правило, возникает в возбужденном состоянии. Возбужденная ситуация устраняется излучением гамма-лучей, часто называемым захватом.

Во время деления тяжелого ядра выделяется приблизительно 200 МэВ энергии, и частицы деления подвергаются воздействию. Масса осколков деления практически равна массе разделенного ядра. Фрагменты деления подвергаются бета-деградации и образуют изобарические цепи со стабильными изотопами или долгоживущими изотопами на концах. Учитывая это, глубину сгорания можно определить как отношение массы продуктов деления (ПД или FP), накопленных при облучении топлива в реакторе, к соответствующей первой тяжелой атомной массе (ТА). В этом случае размер глубины горения будет равен гПД/кгТА. Между двумя определениями глубины выгорания, данными выше, существует приблизительное соответствие: 1~1,07.

Деление 1 г ^{235}U = 0,933 МВтсут.

Глубина выгорания также может быть определена как доля первого числа ядер данного типа, которые подвергаются ядерному превращению в реакторе при воздействии нейтронов. В этом случае размер глубины выгорания может быть выражен в процентах от первого тяжелого атомного номера. Однако это определение ставит вопросы об учете или расчете реакций захвата излучения в тяжелых ядрах.

2.2 Общие сведения о глубине выгорания в активной зоне

Глубина выгорания — весьма важная эксплуатационная характеристика, так как она определяет общую продолжительность кампании без перегрузки активной зоны.

Увеличение глубины выгорания топлива является одной из основных проблем повышения эффективности топливного цикла водо-водяного энергетического реактора. Снижение потребления топливных групп и сокращение хранения отходов, и снижение потребления природного урана даст наиболее эффективный результат. Чтобы увеличить выгорание топлива (≈ 60 МВт·сут/кг) обогащение следует увеличить до 5%. Увеличение обогащения потребует увеличения объема сепарационных работ при его изготовлении. Увеличение выгорания топлива и, следовательно, уменьшение потребления топливных сборок принесет пользу, но следует обеспечить, чтобы затраты на производство топливных сборок, предназначенных для более глубокого выгорания топлива, не увеличивались.

Непрерывная перезагрузка в реакторах с водой под давлением практически полностью исключена. В этих реакторах периодическая перегрузка обычно осуществляется с той или иной частотой, в зависимости от типа реактора, сложности операций перегрузки и других параметров. Кроме того, во время работы реактора от одной перегрузки к другой выгорает только избыточное топливо выше критической массы [1].

В последнее время разработка усовершенствований реакторов ВВЭР направлена на увеличение глубины выгорания ядерного топлива. Эта направленность обусловлена многими параметрами, основными из них являются: увеличение обогащения топлива, добавление поглотителя вместе топливами, увеличение времени проведения кампании и коэффициента использования установленной мощности, снижение скорости разгрузки, уменьшение потребности в хранилищах для сборок отработавшего топлива.

Обогащение урана, используемого в качестве топлива, является основным фактором, хотя и не единственным показателем экономической эффективности АЭС с ВВЭР-1200. Расход природного урана и работа по разделению зависят от количества единиц обогащения. Глубина выгорания топлива, которая определяет эксплуатационные расходы и стоимость производства новых топливных элементов, также является наиболее важной.

Средняя глубина выгорания топлива в реакторе ВВЭР-1200 при использовании низкообогащенного урана ($\approx 4,95\%$) составляет примерно 60 МВт.сут/кг. Глубина выгорания топлива напрямую показывает эффективность использования урана. В качестве характеристики эффективности использования урана можно принять полное количество электричества, которое производится с единицы используемого природного урана [12]:

$$U \cdot \left(\frac{kwh}{1bU_3O_8} \right) = 9,231 \left(\frac{x_f - x_w}{x_p - x_w} \right) \eta \cdot \beta_{dis}, \quad (2)$$

где η коэффициент полезного действия, который для реактора ВВЭР-1200 равен $\approx 0,37$

β_{dis} -глубина выгорания (МВт·сут/кг);

x_f -обогащение природного урана wt%;

x_p -обогащение загружаемого урана wt%;

x_w -обогащение урана в отвале $\approx 0,2$ wt%.

Большая глубина выгорания приводит к уменьшению количества тепловыделяющих сборок, выпускаемых из реактора в конце топливного цикла, что приводит к уменьшению проблем хранения, обработки и транспортировки использованных топливных сборок (ОТВС) [2].

Главная цель научно-технических разработок в работе [13], которые касаются топливного цикла энергетических реакторов — это увеличение глубины выгорания топлива. Обычно оно достигается путем повышения

начального обогащения и использования выгорающих поглотителей. При увеличении обогащения выгорающий поглотитель снижает размножающие свойства активной зоны реактора в начале кампании до значения, которое может быть скомпенсировано системой СУЗ.

В качестве выгорающего поглотителя в топливо ВВЭР-1200 добавляется Gd_2O_3 . Гадолиний отличается аномально высоким поглощением тепловых нейтронов. В природном гадолинии содержится шесть стабильных изотопов. Сечение поглощения тепловых нейтронов природным гадолинием достигает величины 49 000 барн, а у изотопа ^{157}Gd сечение захвата 254 000 барн [5].

Изотопы ^{157}Gd и ^{155}Gd мгновенно сжигают нейтроны в реакторах и превращаются в соседние ядра, где сечение захвата намного меньше. Гадолиний характеризуется не только высоким сечением поглощения нейтронов, но и хорошим взаимодействием с другими металлическими компонентами, включая оксид урана. Однако следует также отметить довольно высокую стоимость гадолиния. Изотопный состав природного гадолиния и сечение поглощения тепловых нейтронов при энергии 0,0253 эВ [6]. Отдельные изотопы приведены в таблице 5.

Таблица 5– Изотопный состав природного гадолиния и тепловое сечение поглощения

Изотоп	Массовая доля, %	σ , б
152	0,2	1070
154	2,18	92,3
155	14,8	60 000
156	20,47	1,7
157	15,65	254 000
158	24,84	2
160	21,86	0,8

Источник: [7]

В настоящее время поставщики топлива рассматривают способы увеличения глубины выгорания топлива для определенного начального

обогащения. В некоторых случаях цель состоит в том, чтобы увеличить водоурановое отношение топливной решетки и увеличить количество диоксида урана в топливных элементах (ТВЭЛ); в других - еще большее увеличение водоуранового отношения клетки, в том числе уменьшение топливной нагрузки в топливных группах (ТВС). В первом случае количество воды увеличивается за счет уменьшенной толщины оболочки ТВЭЛ, во втором дополнительный эффект получается из-за уменьшения числа ТВЭЛ в ТВС и загрузки топлива. В обоих случаях уменьшается поверхность охлаждения ТВЭЛ и увеличиваются поверхностные удельные нагрузки.

Наиболее важным способом увеличения глубины выгорания является выравнивание мощности по активной зоне. Дополнительное выравнивание энерговыделения по радиусу активной зоны на 5 —10% увеличивает среднюю глубину выгорания на 1,0—2,0%.

Использование отрицательного мощностного и температурного эффектов реактивности в конце топливной кампании (после исчерпания запаса реактивности на номинальной мощности реактора до нуля) позволяет удлинить кампанию реактора и увеличить глубину выгорания топлива. Работа на мощностном эффекте осуществляется в конце кампании, после исчерпания запаса реактивности на номинальной мощности реактора до нуля [14].

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЕЛИЧИНУ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ

3.1 Моделирование ТВС ВВЭР -1200 с использованием программного комплекса UNK

Нейтронно-физические расчеты ячейки проводились с использованием программного комплекса UNK с учетом выгорания топлива и поглотителя.

Пакет программ UNK предназначен для нейтронно-физических расчетов реактора. Он включает в себя три основные программы, которые выполняют различные этапы нейтронно-физического расчета. Программные комплексы, скомпилированные на основе программ пакета UNK, позволяют рассчитывать как стационарное состояние реактора, так и режимы связанные с выгоранием топлива. Основными программами пакета UNK являются программы UNKCELL, UNKGRO, UNKBURN.

Программа UNKCELL [8;9] программа расчета ячейки или кассеты (ТВС) реактора, предусмотрено для определения нейтронно-физических характеристик ячеек реакторов различных типов, и получения малогрупповых нейтронно-физических констант, которые необходимы для расчета всего реактора, микросечений изотопов нужные для расчета выгорания.

Библиотека ядерных данных программы UNKCELL сгенерирована из файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-VI содержит данные для 337 изотопов, включая продукты деления. Для некоторых изотопов имеются дополнительные варианты библиотек ядерных данных, полученных из файлов JEF-2.2 и JENDL. Особенностью программы UNK является детальный расчет спектра нейтронов в резонансной области энергий (2,15эв. – 2,15 Кэв). Этот энергетический диапазон описывается в групповом приближении (рядка 7000групп) используется мелкая неравномерная энергетическая сетка, сгущающаяся вблизи резонансов разных изотопов и более широкая в промежутках между ними.

Программа UNKGRO [10] – программа полномасштабного расчета реактора в реальной геометрии, в рамках группового приближения методом характеристик. Так же, как и методе Монте-Карло при расчете используется реальное описание геометрии реактора. Результатом расчета являются: значение $K_{эфф}$, групповые распределения потока нейтронов, поле энерговыделения, нейтронный баланс по материалам.

Программа UNKBURN [10, С.200-202]–программа расчета выгорания топлива. Эта программа проводит расчет выгорания изотопов на временном шаге. Программа имеет библиотеку выходов продуктов деления, полученную из файлов ENDF/B для 196 осколков.

При расчете выгорания в ячейке реактора или кассеты совместно с программой UNKCELL нормировка потока нейтронов на заданный уровень мощности выполняется непосредственно в программе UNKBURN ссылаясь на заданные мощности ячейки или кассеты. При расчете выгорания топлива в реакторе (при работе комплекса UNKCELL, UNKGRO, UNKBURN) из расчетов по программе UNKCELL используются групповые микросечения всех изотопов в материалах реактора, а из расчетов по программе UNKGRO получают нормированные на мощность групповые потоки нейтронов в каждой из регистрационных зон, содержащих выгорающие изотопы.

Программные комплексы UNK.

Программы, перечисленные выше, могут использоваться самостоятельно и в рамках комплексного расчета.

Комплекс UNKCELL/UNKGRO–расчет различных стационарных состояний реактора.

Комплекс UNKCELL/UNKBURN–расчет выгорания ячейки или кассеты реактора.

Комплекс UNKCELL/UNKGRO/UNKBURN–расчет выгорания в реакторе.

Расчет кассеты с микротопливом проводится в два этапа. На первом этапе рассчитывается микроячейка (или микроячейки), которая состоит из микротвэла

с приходящейся на него долей топливной матрицы. В результате расчета определяются усредненные по всему объему микроячейки характеристики в групповом представлении (89 или 7400 групп) и подготавливается «усредненный изотоп» который в дальнейшем используется для расчета всей кассеты в качестве материала топливной матрицы.

Таким образом, для расчета выгорания кассеты с микротвэлами по программе UNK мы должны задать описание самой кассеты и микроячейки.

Исходные файлы:

Для расчета выгорания необходимо сформировать следующие файлы:

CASSINP.DAT

Файл CASSINP.DAT содержит описание геометрии кассеты и материалов блока. Этот форматный файл, содержит следующие блоки:

Блок 1. Два числа: количество оболочек кассеты (NCOVER) и идентификатор типа подготовки данных INDEF. В данной версии INDEF тождественно равен 1:

Блок 2. Половинные размеры оболочек кассеты под ключ (шаг кассет). Число размеров равно NCOVER.

Блок 3. Материалы оболочек кассеты. Число чисел равно NCOVER–1. Нужно отметить, что для расчета без чехольных кассет рекомендуется задавать оболочку с тем же материалом, что и межтвэльный материал. Например, воду или графит в зависимости от типа кассеты.

Блок 4. NTYPE–число типов ячеек описывающих твэлы.

Блок 5. Число зон в ячейке первого типа.

Блок 6. Внешние радиусы зон. Последний радиус задается в интерпретации, как половинный размер под ключ решетки твэлов (шаг решетки твэлов)

Блок 7. Материалы зон. Номера материалов зон задаются в соответствии со списком, задаваемом в файле MATERIAL.LST.

Блоки 5, 6 и 7 повторяются согласно индексу NTYPE (число типов ячеек).

Блок 8. шаг решетки твэлов.

Блок 9. NLAYS- число слоев центров твэлов в кассете.

Блок 10. Список типов ячеек в картограмме кассеты. Данная запись в отличии от всех остальных является бесформатной. Структура записи, следующая:

Запись содержит $NLAYS*2+1$ строк в каждой из которых записаны типы ячеек, располагаемых по “горизонтали” “сверху -вниз” или “снизу-вверх”, что не является принципиальным.

В первой строке записи должны быть указаны NLAYS типов ячеек, расположенных в верхнем ряду кассеты, во второй строке $NLAYS+1$, и так далее, до центра кассеты. Затем число типов соответственно уменьшается на 1. Пример задания кассеты приведен ниже:

```
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1
1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1
1 1 1 1 3 1 1 1 3 1 1 1 3 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 2 1 1 3 1 1 1 1 3 1 1 1 3 1 1 2 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 3 1 1 1 1 3 1 1 1 3 1 1 1 1
1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1
1 1 1 1 1 3 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 3 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
```

Ограничений по расстановке типов ячеек в кассеты нет. Единственное программное требования - необходимо, чтобы все описанные типы ячеек, приведённые выше должны появиться, по крайней мере один раз в картограмме кассеты.

Блок 11. Идентификатор конец ввода информации. Должен быть всегда равен 0.

MATERIAL.LST

Файл MATERIAL.LST содержит список имен файлов (одна запись - одно имя файла) с описанием материалов блока и, в случае расчета с микротопливом, микроячейки. Имена файлов записываются с первой позиции. Таким образом номера материалов в файлах MICRO1.DAT и CASSINP.DAT соответствуют номерам строк в файле MATERIAL.LST.

fuel.str

cover.str

water.str

tveg1.str

tveg2.str

Отметим, что в качестве имен файлов рекомендуется использовать не более пяти символов (не считая расширения .STR). Более длинные имена файлов не сказываются на работу программы CASSGEOM.EXE, однако в случае расчетов с использованием других модулей программы UNK (в частности расчета реактора) это ограничение существенно.

FUEL– набор файлов с описанием материалов (один файл – один материал).

В файле с расширением .STR содержится описание материала. Файл бесформатный. Первая запись начинается с символов TEMP, за которыми идет значение температуры материала. В случае, если материал выгорающий, за значением температуры следует написать: BURNUP (большими буквами). Записи начинающиеся с «RO» (два пробела после RO обязательны) описывают изотопный состав материала. Одна запись – один изотоп. Ниже приведен пример возможного состава файла:

TEMP 1200,00 BURNUP

RO o-16 4,04600E-02 0 0 GAS

RO u-238 2,25600E-05 0 0 GAS

```
RO  u-239      0,96000E-02    0 0    GAS
RO  pu-239      1,46655e-03    0 0    GAS
END
```

После «RO» следуют пять величин, описывающих изотоп.

Первое Идентификатор изотопа. Идентификатор изотопа записывается маленькими буквами. В случае, если материал выгорающий (топливо) необходимо вводить только те изотопы, которые содержатся в самом начале топлива. То есть можно не вводить осколки и трансурановые изотопы, появляющиеся в процессе выгорания топлива. В случае выгорания поглотителя дополнительные изотопы с концентрацией $1.0E-25$ необходимо добавить в файл. Ввод дополнительных изотопов для выгорающих элементов (Hf, Er, Dy,) можно сделать автоматическим, если в этом возникнет необходимость.

2-е число— ядерная концентрация изотопа.

3-е и 4-е числа 0 0 или 16 24.

0 0 означает, что расчет данного изотопа будет проводится в 89-ти группах.

16 24 означает, что расчет будет проводится в 7400 группах (расчет с микрогруппами).

Следует отметить, что в случае, если даже один изотоп задан с микрогруппами (16 24), то это значит, что весь расчет кассеты будет проводится с микрогруппами (время расчета при этом намного продлится). В текущей версии библиотеки программы UNK для изотопов u-235, u-238, Pu-239, Zr-0, Er-166, Er-167 можно проводить расчет в микрогруппах.

5-ая величина – Идентификатор расчета тепловой области:

GAS— матрица тепловых сечений рассчитывается в приближении рассеяния на свободном газе.

MAT— используется матрица тепловых сечений, полученная с учетом фононных спектров в молекуле.

Символы «TEMP», «RO», «END» должны вводиться с первой позиции, остальные величины произвольно, но в описанном выше порядке. Последняя строка «END» необязательна.

DAYS. ***- Файл с данными для программы выгорания, бесформатный. Содержит два блока:

Блок 1. Удельная мощность ячейки в Вт/см³.

Блок 2. Время шага выгорания в сутках. (число).

В процессе выгорания ячейки я могу использовать несколько файлов типа DAYS. Количество файлов и величины содержащиеся в них зависят от компетенции моих познаний. Пользователь, то есть сам могу выбрать имена файлов типа DAYS, при этом следует внести соответствующие изменения в файл UNK_STEP.BAT, который генерирует программа CASSGEOM.EXE.

В качестве нейтронно-физического параметра выбрал эффективный коэффициент размножения нейтронов $K_{эфф}$, который количественно характеризует возможность осуществления цепной реакции деления. $K_{эфф}$ представляет собой отношение числа нейтронов n_1 (или делений ядер) в данном поколении к числу нейтронов n_2 (или делений ядер) в предыдущем поколении:

$$K_{эфф} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 \pm \Delta n}{n_1} = 1 \pm \frac{\Delta n}{n_1} = 1 \pm \delta_{K_{эфф}} \quad (3)$$

или из уравнения баланса его можно определить, как отношение числа нейтронов, возникших от всех актов деления в единицу времени, к числу всех поглощенных нейтронов в единицу времени и вышедших из реактора:

$$K_{эфф} = \frac{\text{Число рожденных нейтронов}}{\text{Число поглощенных нейтронов} + \text{число нейтронов, вышедших из реактора}}$$

При $K_{эфф} > 1$ состояние реактора называют надкритическим $\delta_{K_{эфф}} > 0$.
 При $K_{эфф} < 1$ состояние реактора называют подкритическим $\delta_{K_{эфф}} < 0$.
 Значению $K_{эфф} = 1$ соответствует критическое состояние реактора $\delta_{K_{эфф}} = 0$ [4].

Теперь приведу пример расчета концентраций для программного обеспечения UNK.

Тепловое сечение поглощения изотопного состава природного гадолиния написаны в таблице 6.

Таблица 6 – Изотопный состав природного гадолиния и тепловое сечение поглощения

Изотоп	Массовая доля, [%]	σ_a , [барн]
162	0,14	19
164	1,56	13,2
166	33,40	35
167	22,90	670
168	27,10	1,95
170	14,90	5,7

Источник: [7]

Для варианта «оксидное урановое топливо с обогащением 4,8% по урану-235 и содержанием Gd_2O_3 5%». Для диоксида урана UO_2 значение плотности равно $\gamma = 10,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, тогда концентрация топлива и изотопов урана с учетом обогащения равны:

$$N_{\text{я}}(UO_2) = \frac{N_A \cdot \gamma}{M} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,4}{270} = 2,31997 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{235}\text{U}) = N_{\text{я}}(UO_2) \cdot x = 2,31997 \cdot 10^{22} \cdot 4,8\% = 1,113589 \cdot 10^{21} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{238}\text{U}) = N_{\text{я}}(UO_2) \cdot (1 - x) = 2,31997 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0,048)$$

$$N_{\text{я}}(^{238}\text{U}) = 2,20861 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(\text{O}) = N_{\text{я}}(\text{UO}_2) \cdot 2 = 2,31997 \cdot 10^{22} \cdot 2 = 4,63994 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

Для (U, Gd) O₂ с содержанием оксида гадолиния 5% от массы урана:

Массовые доли изотопов Gd:

¹⁵²Gd 0,2%

¹⁵⁴Gd 2,18%

¹⁵⁵Gd 14,8%

¹⁵⁶Gd 20,47%

¹⁵⁷Gd 15,65%

¹⁵⁸Gd 24,84%

¹⁶⁰Gd 21,86%

Из семи изотопов природного гадолиния в программном комплексе UNK используются все изотопы. Рассчитаем ядерную концентрацию:

$$N_{\text{я}}(\text{Gd}_2\text{O}_3) = \frac{N_{\text{A}} \cdot \gamma}{M} \cdot x = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 7,41}{362,5} \cdot 0,05 = 6,15592 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{152}\text{Gd}) = N_{\text{я}}(\text{Gd}) \cdot \varepsilon = 1,23118 \cdot 10^{21} \cdot 0,002 = 2,46237 \cdot 10^{18} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{154}\text{Gd}) = N_{\text{я}}(\text{Gd}) \cdot \varepsilon = 1,23118 \cdot 10^{21} \cdot 0,0218 = 2,68398 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{155}\text{Gd}) = N_{\text{я}}(\text{Gd}) \cdot \varepsilon = 1,23118 \cdot 10^{21} \cdot 0,148 = 1,82215 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{156}\text{Gd}) = N_{\text{я}}(\text{Gd}) \cdot \varepsilon = 1,23118 \cdot 10^{21} \cdot 0,2047 = 2,52023 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{157}\text{Gd}) = N_{\text{я}}(\text{Gd}) \cdot \varepsilon = 1,23118 \cdot 10^{21} \cdot 0,1565 = 1,92680 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{158}\text{Gd}) = N_{\text{я}}(\text{Gd}) \cdot \varepsilon = 1,23118 \cdot 10^{21} \cdot 0,2484 = 3,05826 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{160}\text{Gd}) = N_{\text{я}}(\text{Gd}) \cdot \varepsilon = 1,23118 \cdot 10^{21} \cdot 0,2186 = 2,69137 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

Концентрация оксида урана:

$$N_{\text{я}}(\text{UO}_2) = \frac{N_{\text{A}} \cdot \gamma}{M} \cdot \varepsilon = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,4}{270} \cdot 0,95 = 2,20397 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{235}\text{U}) = N_{\text{я}}(\text{UO}_2) \cdot x = 2,20397 \cdot 10^{22} \cdot 3,6\% = 7,93430 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(^{238}\text{U}) = N_{\text{я}}(\text{UO}_2) \cdot (1 - x) = 2,20397 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0,036)$$

$$N_{\text{я}}(^{238}\text{U}) = 2,12463 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

$$N_{\text{я}}(\text{O}) = N_{\text{я}}(\text{UO}_2) \cdot 2 + 3 \cdot N_{\text{я}}(\text{Gd}_2\text{O}_3) = 4,59262 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}$$

3.2 Исследование разных способов повышения глубины выгорания и топливной кампании активной зоны в реакторе ВВЭР-1200

3.2.1 Исходные данные для расчетного анализа

Проанализируем влияние следующих способов на увеличение топливной кампании (и как следствие на увеличение глубины выгорания):

- увеличение обогащения ядерного топлива;
- использования выгорающего поглотителя;
- увеличение водо-уранового отношения.

Получение значения будем сравнивать с ТВС реактора ВВЭР-1200 с обогащением топлива 4,8%.

Для анализа влияние обогащения топлива, сравним топливные кампании для диоксида урана 4%, 4,8 и 4,95% обогащением. Основные модели для сравнения представлены в таблице 7.

Таблица 7– Описание вариантов с различным обогащением топлива

Вариант	Количество и топливо твэлов и твэгов
X ₁	312 твэлов - 4%(235U)
X ₂	312 твэлов - 4,80%(235U)
X ₃	312 твэлов - 4,95%(235U)

Источник: собственная разработка

Для анализа влияние выгорающего поглотителя сравним топливо без выгорающего поглотителя и с выгорающим поглотителем (оксид гадолиния).

Основные варианты с различным содержанием выгорающего поглотителя представлены в таблице 8.

Таблица 8– Описание вариантов с различным содержанием выгорающего поглотителя в топливе

Вариант	Количество и топливо ТВЭЛОВ и ТВЭГОВ
X ₂	312 ТВЭЛОВ - 4,80% (²³⁵ U)
X ₄	300 ТВЭЛОВ - 4,80% (²³⁵ U) и 12 ТВЭГОВ - 3,6% (²³⁵ U) с 5%Gd ₂ O ₃
X ₅	303 ТВЭЛА - 4,80% (²³⁵ U) и 9 ТВЭГОВ - 3,6% (²³⁵ U) с 8%Gd ₂ O ₃
X ₆	300 ТВЭЛОВ - 4,80% (²³⁵ U) и 12 ТВЭГОВ - 3,6% (²³⁵ U) с 8%Gd ₂ O ₃

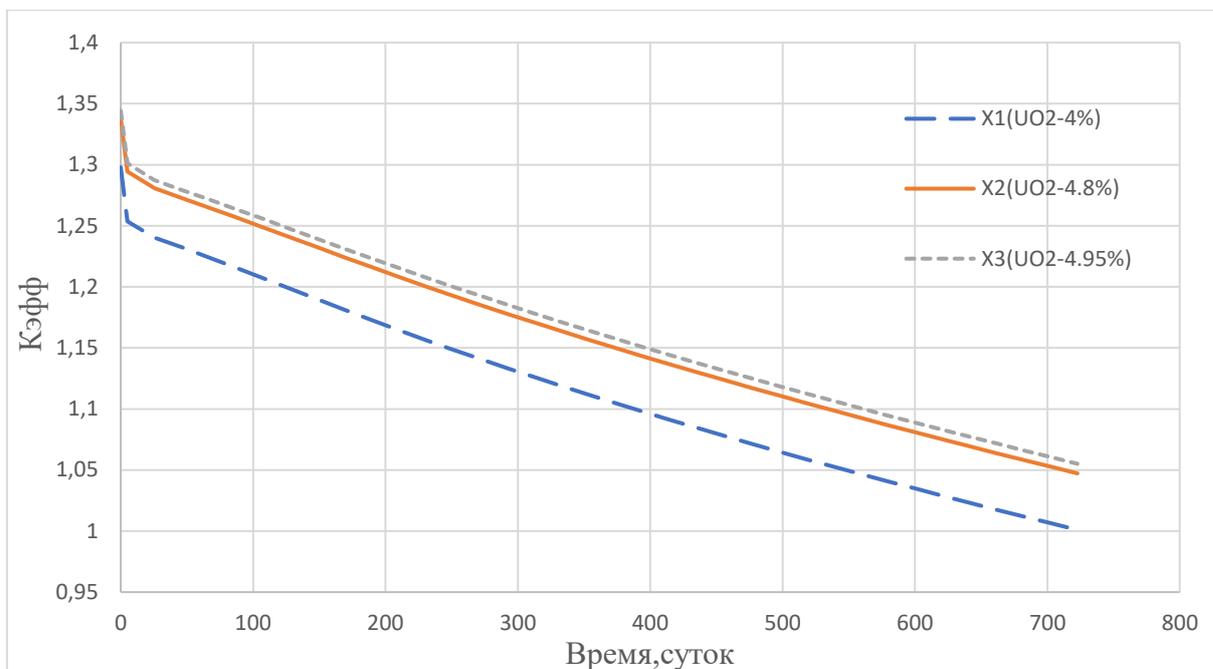
Источник: собственная разработка

Для анализа влияние выгорающего поглотителя сравним ТВС с различной толщиной оболочки ТВЭЛА. В данной работе не является целью обоснования возможности использования ТВЭЛОВ с более тонкой оболочкой.

Вариант X₇- наружный диаметр оболочки ТВЭЛА (ТВЭГА), 9 мм.

3.2.2 Результаты расчетных исследований

В начале расчета были рассмотрены варианты X₁-X₂-X₃, в которых изменялось обогащение топлива в ТВС, но общее количество ²³⁵U в ТВС оставалось неизменным. В этих вариантах отсутствует выгорающих поглотителей. X₂ выбрал в качестве эталонного сопоставления с другими вариантами, и он предполагает полностью жидкостное регулирование запаса реактивности. Расчетные характеристики представлены на рисунке 4.

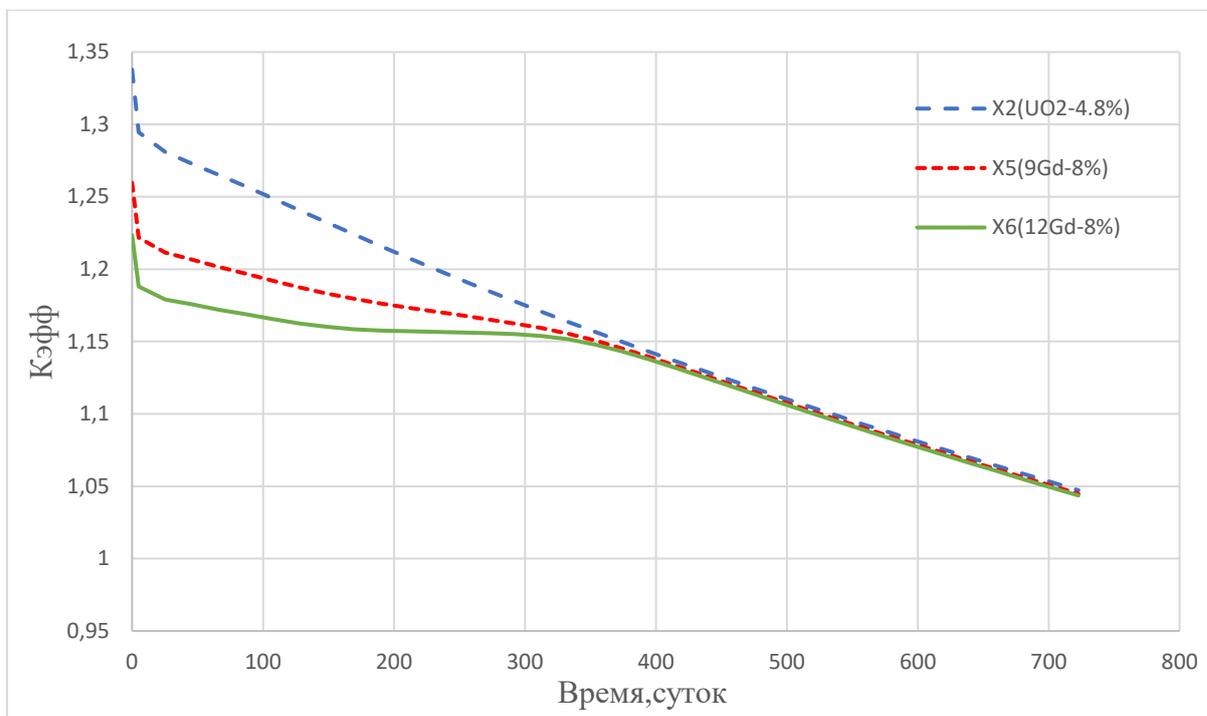


Источник: собственная разработка

Рисунок 4—Зависимость эффективного коэффициента размножения от времени выгорания для вариантов X_1 - X_2 - X_3

Кампания реактора на первом варианте невелика X_1 и равна 290 суток, а глубина выгорания 31,4 МВт·сут/кг. Без выгорающих поглотителей и с увеличением обогащения увеличивается кампания реактора, естественно, выгорания топлива увеличивается. Скорость выгорания максимальна в X_1 . Самая длинная кампания в X_3 равна 340 суток. В третьем варианте глубина выгорания увеличила до значения 37,4 МВт·сут/кг. Самое большое значение запаса реактивности в варианте X_3 .

В следующем случае были рассмотрены варианты X_2 - X_5 - X_6 , которые содержат одинаковое обогащение топлива с гадолиний в 9 и 12 твэлах. Результаты расчета показаны на рисунке 5.

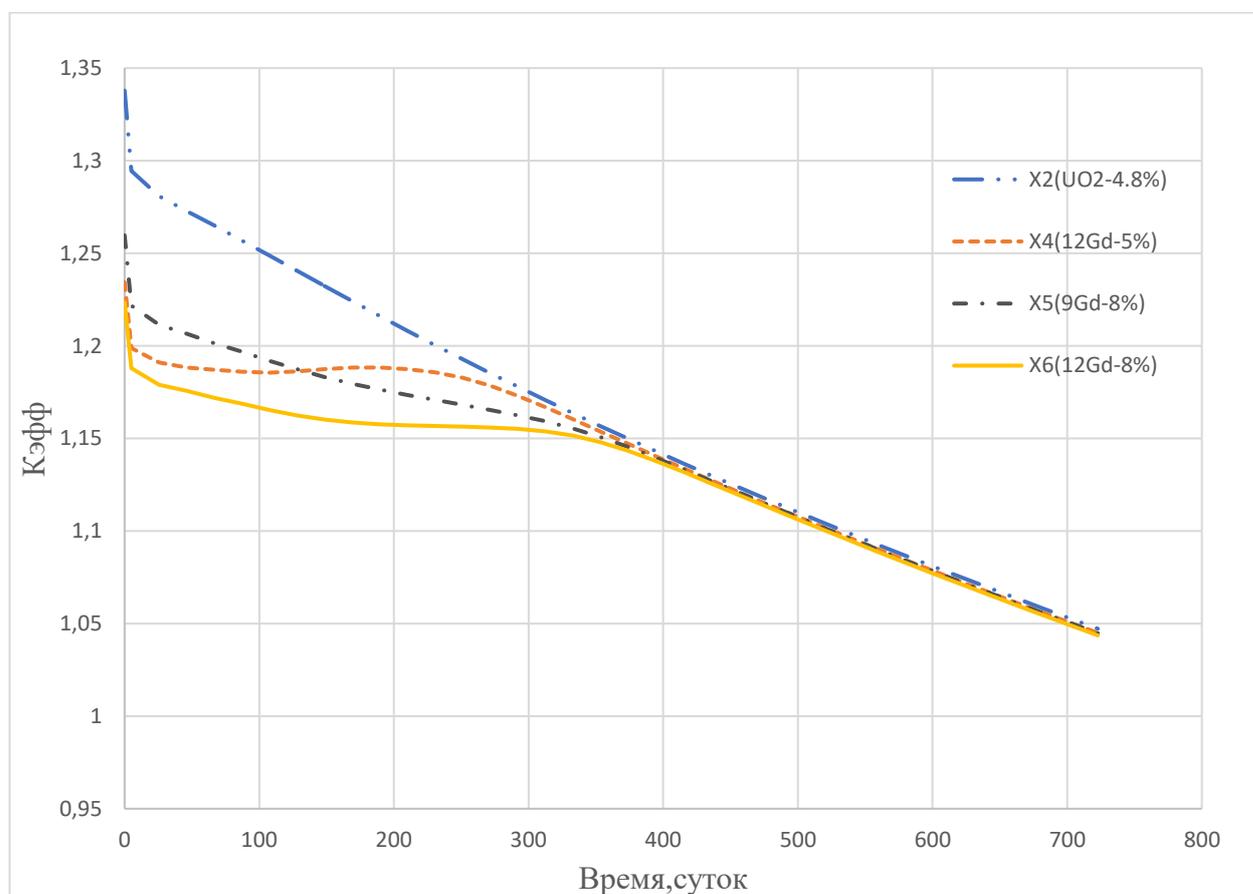


Источник: собственная разработка

Рисунок 5—Зависимость эффективного коэффициента размножения от времени выгорания для вариантов X₂-X₅-X₆

Повышение концентрации гадолиния в твэлах приводит к уменьшению начального значения $K_{эфф}$. Самое меньшее значение в X₆ $K_{эфф}=1,22$, и в этом варианте средняя глубина выгорания составляет 40,2 МВт·сут/кг. Добавление концентрации гадолиния дает возможность увеличения топливной кампании реактора может работать в 18-24 месячном топливном цикле. Для снижения концентрации бора в теплоносителе и управления энергораспределением активной зоны использован интегрированный с топливом выгорающий поглотитель в виде оксида гадолиния (Gd_2O_3) с естественным содержанием изотопов гадолиния. Гадолий равномерно распределяется по высоте топливного стержня. Обогащение урана в тепловыделяющих элементах с выгорающим поглотителем может быть снижено по сравнению с обогащением твэлов в ТВС. Поглотитель практически полностью выгорает в течение одной кампании реактора и это позволяет исключить экономические потери от его переработки и захоронению.

Были рассмотрены варианты X_2 - X_4 - X_5 - X_6 , которые содержат одинаковое обогащение топлива с разными концентрациями гадолиний в 9 и 12 твэлах. Результаты расчетов показаны на рисунке 6.



Источник: собственная разработка

Рисунок 6—Зависимость эффективного коэффициента размножения от времени выгорания для вариантов X_2 - X_4 - X_5 - X_6

Расчеты показывают, что при увеличении числа твэгов с одинаковой концентрацией Gd уменьшается влияние твэгов на характер изменения $K_{эфф}$, уменьшается начальное значение $K_{эфф}$ и максимальная концентрация борного поглотителя в активной зоне реактора. В обоих случаях гадолиний полностью выгорает в течении кампании.

Среднее обогащение топлива ТВС не превышает 4,95 %. При таком обогащении топлива одна ТВС подкритична в холодной воде без бора с учетом погрешности расчетов [11]. Для снижения концентрации бора в теплоносителе и управления энергораспределением активной зоны реактора ВВЭР-1200

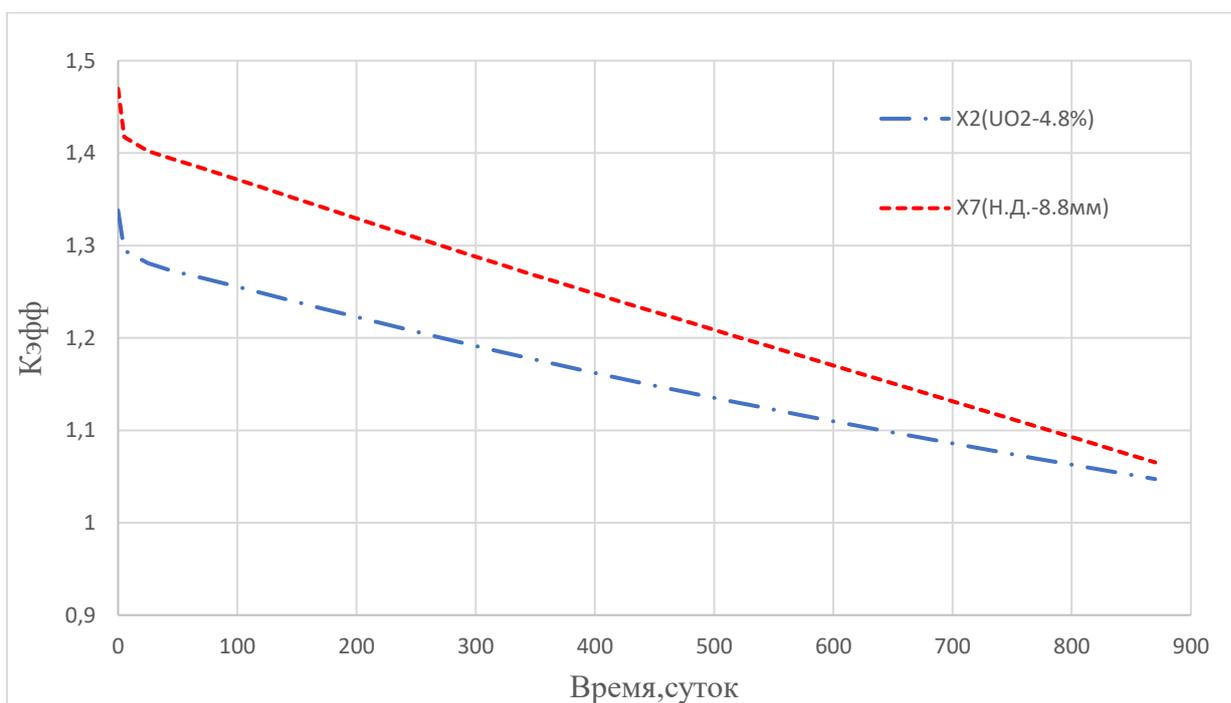
используется интегрированный с топливом выгорающий поглотитель в виде оксида гадолиния (Gd_2O_3) с естественным содержанием изотопов гадолиния. Гадолиний равномерно распределяется по высоте топливного стержня. Обогащение урана в тепловыделяющих элементах с выгорающим поглотителем снижено по сравнению с обогащением ТВЭлов в ТВС. Количество ТВЭгов в пределах одной ТВС, их расположение в топливном пучке, обогащение (3,6 %вес) и содержание Gd_2O_3 в топливе (5 или 8 % вес.). Определил вариантные расчеты с учетом следующих условий:

- поглотитель должен практически полностью выгорать в течение одной кампании реактора с тем, чтобы исключить экономические потери;
- распределение энерговыделения должно удовлетворять проектным ограничениям.

Варианты X1- X2- X3, в которых отсутствует ВП показывают, что используется полностью жидкостное регулирование запаса реактивности. Варианты X4, X5 и X6 отвечают гомогенному расположению выгорающих поглотителей в топливной таблетке. Для выбранной концентрации гадолиния эффект блокировки потока нейтронов в блоке с ВП достаточно велик. Поэтому начальное значение $K_{эфф}=1,24$, но затем за счет большой скорости выгорания изотопов гадолиния образуется тяга реактивности до значения $K_{эфф}=1,18$. Для варианта с гадолинием скорость выгорания его изотопов существенно меньше, чем для варианта с обогащением, что приводит к наличию зависимости коэффициента размножения от выгорания области примерно постоянного значения $K_{эфф}$. Этот вариант может привести к существенному снижению доли жидкостного регулирования запаса реактивности.

Максимально выгорание ТВС реактора ВВЭР-1000 достигло 54,14 МВт·сут/кг после применения гадолиния. До внедрения ТВС с уран-гадолинивым топливом, максимальная глубина выгорания в ТВС 48,03 МВт·сут/кг. Увеличение глубины выгорания приводит к более эффективному использованию топлива [15].

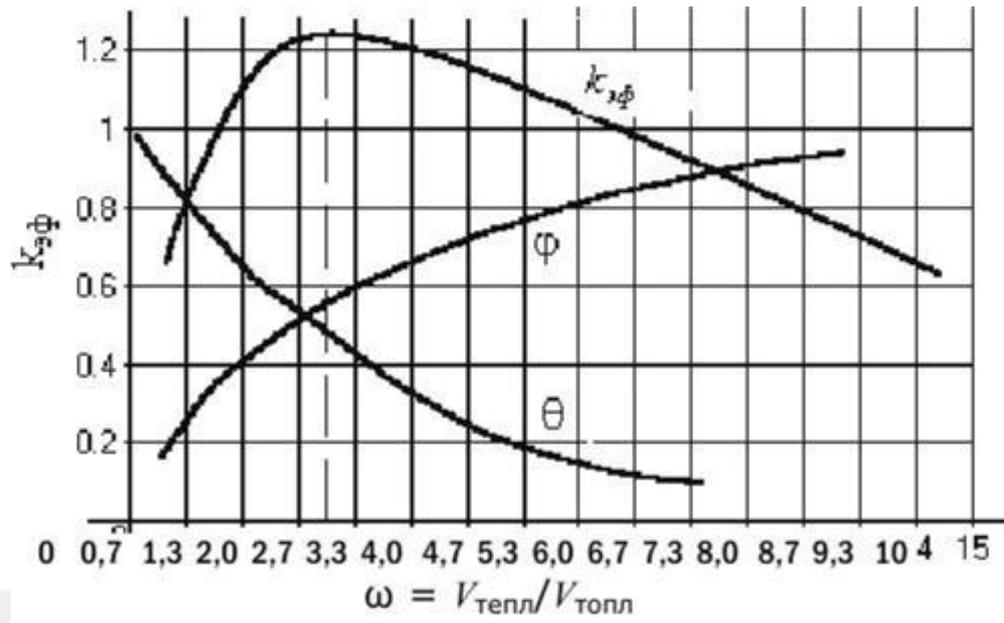
Рассмотрим влияние изменения водо-уранового отношения из-за уменьшения толщины оболочки твэла на длительность топливной кампании и глубину выгорания. Значения представлены на рисунке 7.



Источник: собственная разработка

Рисунок 7—Зависимость эффективного коэффициента размножения от времени выгорания для вариантов X₂- X₇

Как видно из рисунков 7-8, увеличение водо-уранового отношения увеличивает длительность топливной кампании, а, следовательно, и глубину выгорания.



Источник: [16]

Рисунок 8 – Зависимость эффективного коэффициента размножения от водо-уранового отношения для водо-водяных реакторов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе дипломной работы был проведен анализ различных способов увеличения глубины выгорания активной зоны реактора ВВЭР-1200.

Наиболее важным способом увеличения глубины выгорания является выравнивание мощности по активной зоне. Дополнительное выравнивание энерговыделения по радиусу активной зоны на 5 —10% увеличивает среднюю глубину выгорания на 1,0—2,0%.

Использование отрицательного мощностного эффектов реактивности в конце топливной кампании (после исчерпания запаса реактивности на номинальной мощности реактора до нуля) позволяет удлинить кампанию реактора и увеличить глубину выгорания топлива. При снижении мощности высвобождается запас реактивности. Это позволяет работать реактору еще некоторое время.

В работы более подробно было остановлено на следующих способах:

- увеличение обогащения ядерного топлива;
- использования выгорающего поглотителя;
- увеличение водо-уранового отношения.

Увеличения обогащения в ядерном топливе приводит как к положительным, так и к отрицательным эффектам. Эти эффекты зависят от того на каком топливном цикле будет работать реактор. В работе проведены сравнительные влияния выгорающих поглотителей и увеличение обогащение.

Для выбранных вариантов соотношения твэлов и твэггов использование гадолиния в гомогенном исполнении приводит к большому «выбегу» реактивности на начало кампании, использование разных обогащений топлива приводит к снижению запаса реактивности на выгорание меньше чем при использовании гадолиния. ВП практически полностью выгорела, так же увеличено срок кампании. В таком случае реактор может работать и в 18-ом и 24-ом топливном цикле.

Сравнение приведенных вариантов показывает, что наилучшими характеристиками и условиями обеспечения безопасности работы реактора обладают варианты использования выгорающих поглотителей, потому что размещение ВП дает дополнительные преимущества. Использование ВП в топливе стабилизирует изменение коэффициента размножения нейтронов в начале кампании (даже до 400 дней). ВП приводит к обеспечению приблизительного постоянства $K_{эфф}$ в начале кампании.

В работе были так же рассмотрены возможность увеличение водоуранового отношение и его влияние на длительность кампании и глубину выгорание. Данный вид изменений пока технически невозможен, но он приведёт к увеличению глубины выгорания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Андрушенко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. ВВЭР-1200 эволюция классики. Физические основы эксплуатации, системы и элементы, ядерное топливо, безопасность– М.: Логос, 2019. – С.140-550.
- 2 Андрушенко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта – М.: Логос, 2010.–500 с.
- 3 [Электронный ресурс] Сайт АО «АККУЮ НУКЛЕАР» Режим доступа: <http://www.akkuyu.com/aes> (дата посещения – 20.11.2019).
- 4 Лескин С.Т., Шелегов А.С. Учебное пособие по курсу «Ядерные энергетические реакторы» – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2008.– С.28.
- 5 Мишин В.А. Применение изотопически селективной фотоионизации атомов для разделения изотопов // Изотопы. -М.Издат, 2000.– С.308-328.
- 6 Коробейников В.В., Клинов Д.А. Введение в нейтронно-физический расчёт ядерных реакторов: Учебное пособие по курсу «Нейтронно-физический расчёт ядерных реакторов». – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2011. – 188с.
- 7 Конотоп Ю.Ф., Одейчук Н.П., Красноруцкий В.С. Современное состояние проблемы поглощающих нейтроны материалов и изделий на их основе для реакторов типа ВВЭР-1000, аналит. Обзор. – Харьков: ННЦХФТИ,1998.
- 8 Белоусов Н.И., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф., “Программа UNK для детального расчета спектра нейтронов в ячейке ядерного реактора”, препринт ИАЭ-6083/4, М.,1998г.
- 9 Davidenko V.D., Tsibulsky V.F. “Detailed Calculation of Neutron Spectrum in Cell of a Nuclear Reactor”, Int. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology, Oct. 5–8, 1998, Long Island, New York, pp.1755-1760.

10 Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф., “Метод характеристик. Программа UNKGRO”, сб. трудов семинара “Нейтроника 2000”. Обнинск, 2000—С.195-202.

11 Филиал АО «КОНЦЕРН РОСЭНЕРГОАТОМ» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС). Учебно-тренировочное разделение. 2016 г.

12 Аль Давахра Сааду, Диссертация “Использования выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР”. Москва, 2006 г.

13 Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С., Киселев Г.В., Тихомиров Г.В. Глубина выгорания ядерного топлива разными поглотителями. — Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 4, С. 194-197.

14 Овчинников Ф. Я., Семенов В. В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. — 3-е изд., переработанное и дополненное. — Москва: Энергоатомиздат, 1988.

15 Магистерская диссертация по направлению подготовки 14.04.01 Дорохина В.А. «Модернизация топливной загрузки ВВЭР-1000 5 блока НВ АЭС», ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2020 г.

16 Казанский Ю.А., Слекеничс Я.В. Кинетика ядерных реакторов. Коэффициенты реактивности. Введение в динамику: Учебное пособие. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012.