

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 (ОЯФиТ)

**Выпускная квалификационная работа –  
дипломный проект (дипломная работа)**

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

Специализация: «Проектирование и эксплуатация атомных станций»

**«Расчётные исследования распределения температур в пучке ТВЭЛ в  
реакторе ВВЭР-1200»**

Выполнил:

студент гр. АЭС2 – С15

Акер Мустафаджан

(подпись, дата)

Руководитель ВКР,  
Профessor Отделения  
ядерной физики и технологий  
НИЯУ МИФИ, д.т.н.

Лескин С.Т.

(подпись, дата)

Нормоконтроль

Чистозвонова Е.А.

(подпись, дата)

Выпускная квалификационная  
работа допущена к защите

№1 от 18.01.2021

(№ протокола, дата заседания  
комиссии)

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

Лескин С.Т.

(подпись, дата)

Обнинск 2021

## РЕФЕРАТ

Работа 60 стр., 35 рис., 36 ист

Объектом исследования является тепловыделяющими элементами

Предмет исследования — расчетные исследования распределения температур в пучок ТВЭЛ в реакторе ВВЭР-1200

Цель работы — исследования распределения температур в пучок ТВЭЛОВ

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что полученные результаты можно использовать в обоснование работоспособности твэлов

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАШЕНИЯ

Сокращение (обозначение)	Расшифровка (пояснение)
КВ	Коэффициент воспроизведения
КВА	Коэффициент воспроизведения активной зоны
АС	Атомная станция
АЭС	Атомная электрическая станция
КПД	Коэффициент полезного действия
ВВЭР	Водо-водяной энергетический реактор
НУЭ	Нормальные условия эксплуатации
ВКУ	Внутрикорпусное устройство
ВХР	Водно-химический режим
РУ	Реакторная установка
ПЭЛ	Поглащающий элемент
ДР	Дистанционирующая решетка
ЗМ	Запирающий магнит
КГО	Контроль герметичности оболочек ТВЭЛ
ЯЭ	Ядерная энергетика
ТП	Тепловой поток
КНИТУ	Канал нейтронных измерений и температуры, и уровня топлива
РБМК	Реактор большой мощности канальный
ОКБ	Особое конструкторское бюро
КТ	Кризис теплообмена
КТП	Критический тепловой поток

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. НАЗНАЧЕНИЕ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ТВС .....	5
1.1 Назначение и классификация ТВС.....	5
1.2 Эволюция ТВС .....	8
1.3 Тепло-гидравлические характеристики ТВС .....	10
ГЛАВА 2.НАЗНАЧЕНИЕ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ТВЭЛА(ТВЭГА).....	17
2.1 Назначение ТВЭЛа(ТВЭГа).....	17
2.2 Пределы повреждения твэл и твэг .....	22
2.3 Топливная таблетка.....	25
ГЛАВА 3. КОНСТРУКЦИИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК .....	27
3.1 Жесткий каркас .....	27
ГЛАВА 4. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОГО КОДА ANSYS-CFX.ОБРАБОТКА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ.....	39
4.1 Описание программного комплекса ANSYS-CFX.....	39
4.2 Методика проведения численных экспериментов .....	41
4.3 Построение расчетных моделей .....	42
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА, ИХ АНАЛИЗ .....	47
5.1 Результаты распределения температур в поперечном сечении модели по высоте активной зоны.....	47
5.2 Полученные графики зависимости температур от высоты активной зоны при разных значениях расхода для топлива; теплоносителя и направляющего канала .....	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	54

## ВВЕДЕНИЕ

Во первых оптимизация и обеспечение имеют главную роль при эксплуатации атомной электростанции по сравнению с другими решаемыми задачами ,которые включают сохранение работоспособности оборудования ,оптимальное достижение экономичности и получение идеального графика нагрузки .основный и определенный принцип эксплуатации в опытной промышленной эксплуатации и в документах Международном агентстве по атомной энергии является бесопасностью.

В поисках решения вопросов ядерного энергетического оборудования фундаментальная положительная сторона занимает на активной зоне .для того чтобы изучать процессы ,происходящих в активной зоне реактора ,важно исследование разных параметров, соответствующие за работу способность оборудования реактора ,и иниегральные эксперименты с проведением комплексных испытаний ТВЭлов И ТВС.

ТВС содержит 312 тепловыделяющих элемента, расположенных с фиксированным шагом 12,75мм твэлы ,соединенные дистанционирующими решетками и закрепленные на нижней несущей решетке.Твэлы расположены по треугольной разбивке.твэлы гладкостержневого типа ,цилиндрической формы.

После того как начались системные исследовательские работы по развитию и оглавнению конструкции кассеты и ее элементов появились другие труды связанны с бесопасностью работоспособности реактора.во первых появляющиеся технические трудности при обусловлении искривлением кассет по мере работы ресурса привели к изменению параметров систем регулирования и защиты на отрицательную сторону .во время это явилось причиной ограничения ресурсов кассет и лимитирования возможности развития и повышения экономических показателей.по вторых в это время появился побольше труд зарубежных фирм по адаптации их видов топлива за реакторы ВВЭР.

При эксплуатации атомной станции в активной зоне по длину твэлов происходит локальная энталпия которая превышает энталпию насыщения .в результате возникает кризис теплоотдачи .для решения этого вопроса через метод интенсификации применяется дистанционирующая решетка.

Главная роль в поисках решения вопросов безопасности и оптимизации топлива считается дистанционирующим устройством .по дистанционированию тепловыделяющих стержней в реакторных сборках используются разные дистанционирующие устройства в частности, решетки, узки.

То не избежно влияние их на величину критического теплового потока и даже иногда это влияние достигает до существенной величины, затем должно учитывать это влияние при расчетах.

Поэтому предотвращение кризиса теплоотдачи на поверхности твэла называется главным критерием теплотехнической надёжности активных зон реакторов ВВЭР в режимах нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации.

# ГЛАВА 1. НАЗНАЧЕНИЕ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ТВС

## 1.1 Назначение и классификация ТВС

Тепловыделяющая сборка в составе активной зоны предназначена для того чтобы генерировать тепловую энергию и передать ее потоку теплоносителя в течение проектного срока службы в отсутствии превышения допустимых пределов повреждения топлива.

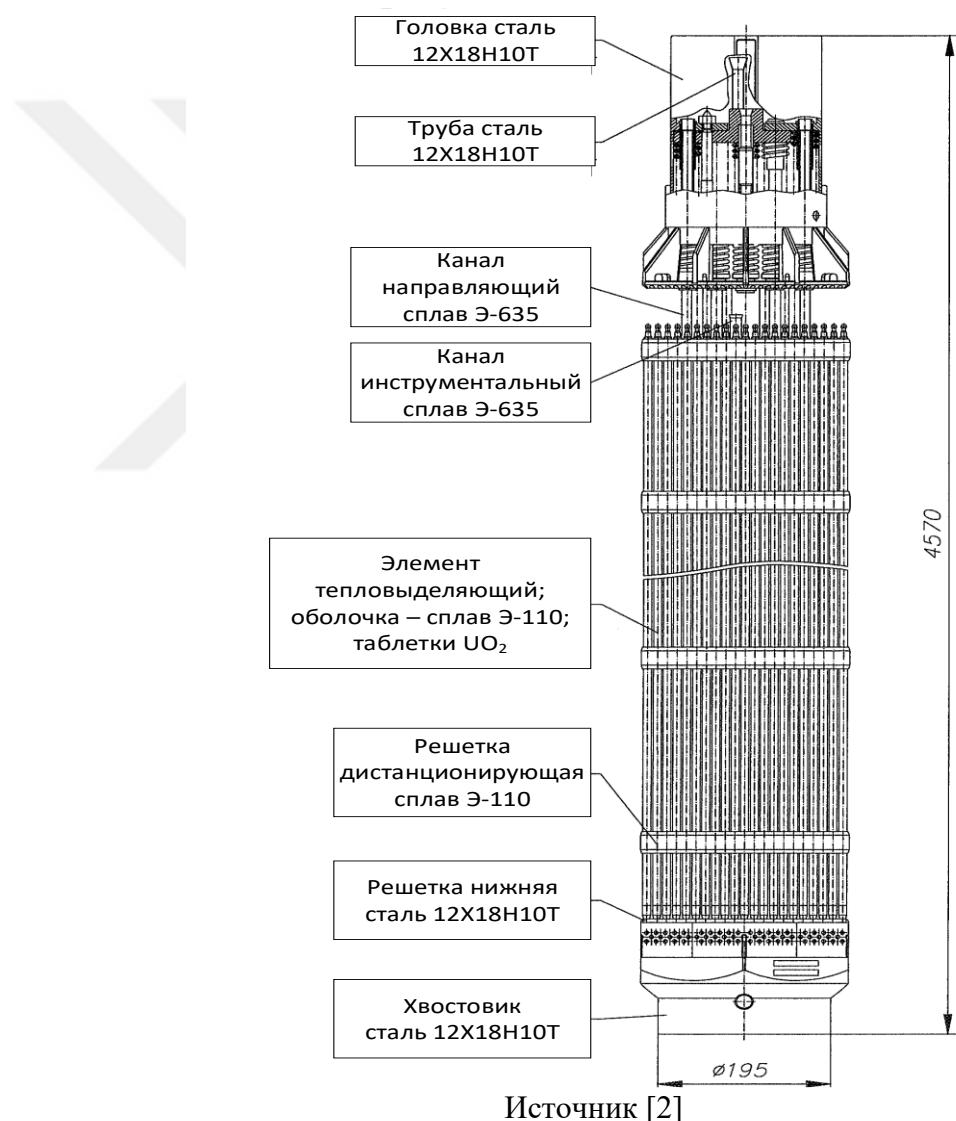
ТВС (рисунок 1) по назначению и влиянию на безопасность относится к 1 классу безопасности, классификационное обозначение 1Н и I категории сейсмостойкости по НП-031-01 и НП-01-15. ТВС относится к элементам АС, отказы которых являются исходными событиями аварий, приводящими при проектном функционировании систем безопасности к повреждению твэлов с превышением максимального проектного предела (значения максимального проектного предела повреждения твэлов устанавливаются в соответствии с федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии). Оболочка твэл и топливная матрица относится к системе физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду.

ТВС имеет гексагональное(шестигранное) сечение и содержит:

- 1) 312 тепловыделяющих элемента (твэл), расположенных с фиксированным шагом 12,75 мм;
- 2) концевые детали (хвостовик, головку), предназначенные для закрепления ТВС внутри реактора и обеспечения выполнения транспортно-технологических операций;
- 3) 18 правляющих каналов для движения ПС СУЗ;
- 4) один измерительный канал для датчиков СВРД.

Жесткий радиационностойкий каркас, изготовленный из циркониевого сплава Э-635 обеспечивает стабильность геометрических характеристик ТВС в течение всего срока эксплуатации внутри реактора (4-5 лет).

Быстроотъемная головка, конструкция концевых элементов ТВЭЛ, а также наличие в центральном зале стенда инспекции и ремонта обеспечивают возможность ремонта ТВС непосредственно на АС. (рисунок-2)



Источник [2]

Рисунок 1. Общий вид ТВС



Источник [1]

Рисунок 2. месторасположение ТВС

Современные экономические показатели определяются выполнением следующих требований к ТВС: Требование к твс определяется современными экономическими показателями которые рекомендуют следующие:

- 1) обеспечение максимально возможной загрузки топлива в ТВС для достижения высоких КИУМ;
- 2) максимально возможное обогащение топлива (до 5%);
- 3) обеспечение топливных циклов с максимальным выгоранием топлива до  $70 \text{ МВт}^*\text{сут}/\text{кгU}$ .

## 1.2 Эволюция ТВС

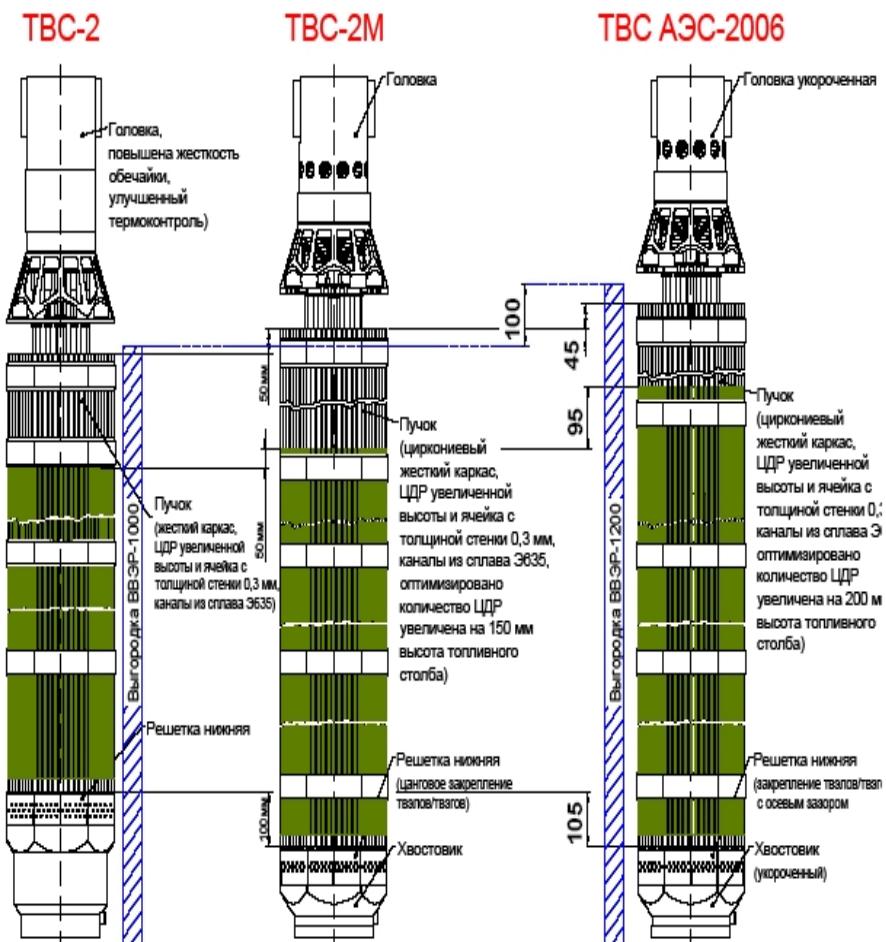
ТВС-2 ,который используется по опытной промышленной эксплуатации на 1-м блоке Балаковской АЭС, удовлетворяет этим требованиям. даже ее прототип - ТВС-2 с жестким каркасом, который образуется приваркой 12-ти ДР к НК, - в 2006 году успешно завершилась опытная и переведен в промышленную эксплуатацию.

ТВС-2 и ТВС-2М (рисунок-3) называются эволюционным развитием конструкций предшествующих бесчехловых ТВС (ТВС-М, УТВС), по сравнению с которыми в нее не добавлено ни одного нового элемента. Все новые качества получены путем применения положительно зарекомендовавших себя в эксплуатации решений, усовершенствования конструкции отдельных составляющих элементов.

Конструкция ТВС-2 наиболее простая, надежная и технологичная, что подтверждено опытом изготовления и эксплуатации ее на АЭС. ТВС-2 имеет подтверждение высокой геометрической стабильности и качества конструкторско-технологических решений.

Конструкция ТВС-2М представляет возможность для максимального удлинения топливного столба .Она также более приспособленая к любым усовершенствованиям, применимая для любых внедряемых или планируемых топливных циклов. ТВС-2М используется с 2006 года на энергоблоках с РУ В-320 в России. В 2011 году шесть пилотных ТВС-2М загружены в активную зону блока №1 АЭС «Тяньвань» состоящую из УТВС.

В настоящее время энергоблоки №1-4 Балаковской АЭС 1,2 и №1,2 Ростовской АЭС предпочитают эксплуатироваться с активными зонами полностью состоящими из ТВС-2М в 18 месячном топливном цикле на мощности 104% Нном (3120 МВт).



Источник [2]

Рисунок 3. Эволюция ТВС с временем

По сравнению с прототипом ТВС-2М ТВС ВВЭР-1200 имеет следующие основные изменения:

- 1) увеличена длина ТВЭЛ на 50 мм;
- 2) увеличена высота топливного столба на 50 мм;
- 3) укорочена головка на 45 мм;
- 4) укорочен хвостовик на 5 мм.

### 1.3 Тепло-гидравлические характеристики ТВС

Условия работы ТВС задаются основными параметрами и характеристиками реактора:

- 1) количество ТВС в активной зоне реактора, 163 шт.;
- 2) количество ТВС с ПС СУЗ , не более 121 шт.;
- 3) тепловая мощность реактора 3200+128 МВт;
- 4) расход теплоносителя через реактор (при температуре на входе в реактор),  
86000+/- 2900 м<sup>3</sup>/ч;

5) давление теплоносителя в первом контуре на выходе из реактора, абсолютное, 16,2+/-0,3 МПа;

- 6) температура теплоносителя на входе в реактор, 298,1+2 -4 °C;
- 7) температура теплоносителя на выходе из реактора, 329,5+/-5,0 °C.
- 8) Основные параметры характеризующие тепло-гидравлические условия работы ТВС:

- 9) перепад давления на реакторе - 0,392 ±0,04 МПа;
- 11) скорость теплоносителя в ТВС - 5,6 м/с;
- 12) коэффициент запаса до всплытия для ТВС составляет не менее 1,60 при номинальных параметрах теплоносителя и не менее 1,56 при температуре теплоносителя 200 °C;
- 13) температура оболочки твэл - 355°C;
- 14) паросодержание теплоносителя до 11,4 % по массе;
- 15) максимальная линейная мощность твэла (в нижней половине активной зоны) – 420 Вт/см;

16) максимальная линейная мощность твэга (в нижней части до уровня 74%) – 360 Вт/см. Максимальная линейная мощность твэла больше чем у твэга т.к. у твэг меньшая температура плавления топлива ввиду добавки гадолиния;

17) предел безопасной эксплуатации по запасу до кризиса теплообмена на поверхности твэла, отн. ед. 1,0. Фактический коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи в номинальном режиме составляет не менее 1,39 с вероятностью 95 %;

18) максимальная температура топлива в твэле реализована в начале первого года эксплуатации и не превышает для твэла - 1587 °С. Максимальная температура топлива в твэге составляет 1491 °С в конце первого года эксплуатации. Температура топлива не превышает температуру плавления топлива. Минимальный коэффициент запаса по температуре плавления топлива составляет 1,79 для твэла (нормативный коэффициент запаса 1,10) и 1,90 для твэга (нормативный коэффициент запаса 1,30). Температура плавления топливных таблеток (Тпл) уменьшается по мере выгорания топлива и для расчетного обоснования работоспособности твэлов определяется по формуле:

$$T_{pl} = 2840 - 0,56 \cdot B, (\text{°C}), \text{ где } B - \text{выгорание, МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг U};$$

Добавка оксида гадолиния в диоксид урана снижает температуру плавления. При содержании оксида гадолиния 5 % она составляет 2405 °С.

Максимальное давление газов в твэле в зависимости от выгорания составляет 15,2 МПа (ниже давления теплоносителя 16,2 МПа).

Важная характеристика эффективности использования ядерного топлива является выгоранием. В следствии выгорания ядерного топлива подразумеваются процесс уменьшения концентрации первоначально загруженного в активную зону делящегося нуклида ( $\text{U}^{235}$ ). Выгорание измеряется в  $\text{МВт}\cdot\text{сут}/\text{кг U}$ .

При работе ТВС в реакторе с увеличением глубины выгорания топлива и соответственно времени нахождения топлива в активной зоне, происходят и накапливаются определенные негативные изменения в ТВС.

Для разработки ВВЭР-1200 учитываны влияние облучения на материалы, внешнее и внутреннее давление, явление уплотнения и распухание топлива, ползучесть оболочки, циклическое изменение температуры, вибрация, вызванной потоком теплоноситель. Максимально допустимая глубина выгорания ТВС в настоящее время - 60 МВт·сут/кгU и будет доведена в перспективе до 70 МВт·сут/кгU.

Основные геометрические и эксплуатационные характеристики ТВС, предназначеннной для работы в четырехгодичном топливном цикле, приведены в таблице 1.

В конструкции ТВС используются следующие конструкционные материалы: нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, циркониевые сплавы Э-110 и Э-635, хромоникелевые сплавы XH77TЮР и XH35ВТ. Допускается замена нержавеющей стали 12Х18Н10Т на стали 08Х18Н10Т, 12Х18Н9Т и наоборот.

Элементы, которые пригодные для повышения коррозионной стойкости циркония в реакторных условиях в среде воды и пара при температуре 300-400 °С, оказалось весьма ограничены: это — олово, ниобий, железо, хром.

Фактическими указанными элементами и их сочетаниями определяются и прочностные возможности циркониевых сплавов, используемых для изготовления оболочек твэлов. Основные элементы, упрочняющие цирконий (Al, Mo, Ta), неприемлемы из-за отрицательного воздействия на коррозионные свойства циркония.

В России предпочтение было отдано бинарным сплавам с ниобием и, в частности, с массовым содержанием Nb 1 % для оболочек твэлов (сплав 110). Этот выбор в значительной степени определен тем, что в качестве основы был использован высокочистый иодидный цирконий, примесный состав которого не нуждается в нейтрализации вредного действия, с точки зрения

коррозии, отдельных примесей. Кроме того, ниобий обладает небольшим сечением захвата нейтронов, эффективно снижает поглощение водорода цирконием, образует с цирконием только твердые растворы, что обеспечивает сплавам высокую пластичность. Из всех элементов, улучшающих коррозионную стойкость циркония (Sn, Fe, Сг и Nb), ниобий наиболее заметно упрочняет цирконий.

Для изготовления оболочек твэл и дистанционирующих решеток используется циркониевый сплав Э-110 который в основном состоит из циркония и 1% ниobia (Zr – Nb). Для изготовления каналов направляющих и инструментального канала используется циркониевый сплав Э-635 - сплав циркония с 1% ниobia и легирующими элементами олово и железо (Zr – Nb – Sn – Fe).

Таблица 1- Геометрические и эксплуатационные характеристики ТВС

Максимально допустимая мощность ТВС, МВт	31
Площадь проходного сечения пучка твэл с учетом половины межкассетного зазора в активной зоне, м <sup>2</sup>	0,02546
Гидравлический диаметр пучка твэл в активной зоне, м	0,01051
Форма ТВС	Шестигранная призма
Высота ТВС, мм	4570
Размер под ключ ТВС, мм	235,1
Количество твэлов и твэгов в ТВС, шт.	312
Сетка расположения твэлов (твэгов) Равномерно треугольная	Равномерно треугольная
Шаг между твэлами (твэгами), мм	12,75
Топливо таблетки твэла	Диоксид урана (UO <sub>2</sub> )
Топливо таблетки твэга	Спеченная смесь диоксида урана и оксида гадолиния (UO <sub>2</sub> + Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )

Продолжение таблицы 1

Плотность топлива в твэлах, кг/м <sup>3</sup>	(10,4-10,7)-10 <sup>3</sup>
Массовая доля Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в топливе твэгов, %	5,0; 8,0
Массовая доля смеси изотопов урана в топливе, %, не менее: для твэлов; для твэгов	87,9 80,4
Материал оболочки твэла (твэга)	Сплав Э110
Наружный диаметр оболочки твэла (твэга), мм	9,1
Внутренний диаметр оболочки твэла (твэга), мм	7,73
Наружный диаметр топливной таблетки твэла (твэга), мм	7,60
Диаметр центрального отверстия в топливной таблетке твэла (твэга), мм	1,2
Размер зерна в топливной таблетке UO <sub>2</sub> , мкм, не менее	25
Размер зерна в топливной таблетке UO <sub>2</sub> + GdO, мкм	6 – 25
Высота топливной таблетки, мм	9,0-12,0
Высота столба топлива в холодном/горячем состоянии в твэле (твэге), мм, номинальная	3730/3750
Масса топлива в твэле, кг, номинальная	1,712
Масса топлива в твэге (при содержании GdO 5 %), кг номинальная	1,712
Масса топлива в ТВС, кг	534,1
Температура наружной поверхности оболочки твэла (в стационарном режиме), С, не более	355
Среднее обогащение топлива ТВС по U <sup>235</sup> для первой загрузки, % масс.	1,30; 2,40; 3,27; 3,28; 4,00; 4,37
Среднее обогащение топлива ТВС по U <sup>235</sup> для стационарной топливной загрузки, % масс.	3,98; 4,95; 4,90; 4,93
Количество твэгов в пределах одной ТВС, шт.	0, 6, 9, 12

Продолжение таблицы 1

Обогащение топлива в твэгах по U, % масс.	2,40; 3,30; 3,60
Дистанционирующая решетка;	
- количество, шт.;	13
- материал;	Э110
- высота ячейки, мм, номинальная;	30
- высота обода, мм, номинальная;	40
- толщина стенки ячейки, мм, номинальная;	0,3
- масса, кг, номинальная;	0,9
- размер ДР под ключ при изготовлении, мм	233,7
Шаг размещения ДР по высоте ТВС:	
- от НР до ДР №1;	100
- от ДР №1 до ДР №2;	250
- от ДР №2 до ДР №11;	340
- от ДР №11 до ДР №13	280
Инструментальный канал:	
- количество, шт.;	1
- материал;	Э635
- наружный диаметр, мм;	12,9
- внутренний диаметр, мм;	10,9
- масса, ку, номинальная	0,93
Решетка нижняя:	
- количество, шт.;	1
- материал	Сталь 12Х18Н10Т
Хвостовик:	
- количество, шт.; 1	1
- материал	Сталь 12Х18Н10Т
Головка;	
- количество, шт.; 1	1
- материал	Сталь 12Х18Н10Т

## Продолжение таблицы 1

Пружинный блок:		
- количество пружин, шт., общее;	19	
- количество пружин, участвующих в демпфировании ОР СУЗ, шт.;	16	
- материал пружин;	Сплав ХН77ТЮР	
- диаметр проволоки пружин, мм	5,1	
Масса ТВС, номинальная, кг	750	

Источник [4]

Сплав Э-110 имеет обоснование многолетним опытом эксплуатации на ВВЭР-1000 (опыт эксплуатации в УТВС с 1993 года) и ВВЭР-440 для применения его в качестве конструкционного материала для дистанционирующих решеток.

Сплавы циркония имеют малое сечение поглощения нейтронов и используются традиционно в качестве материалов для активной зоны и прежде всего для оболочек ТВЭЛ.

Направляющие каналы и инструментальный канал выполнены из циркониевого сплава Э-635, обладающего повышенными механическими свойствами и меньшим радиационным ростом по отношению к сплаву Э-110. Применение сплава Э-635 в качестве материала для НК является одним из факторов повышения стойкости ТВС к формоизменениям в процессе эксплуатации.

## ГЛАВА 2. НАЗНАЧЕНИЕ И УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ТВЭЛА(ТВЭГА)

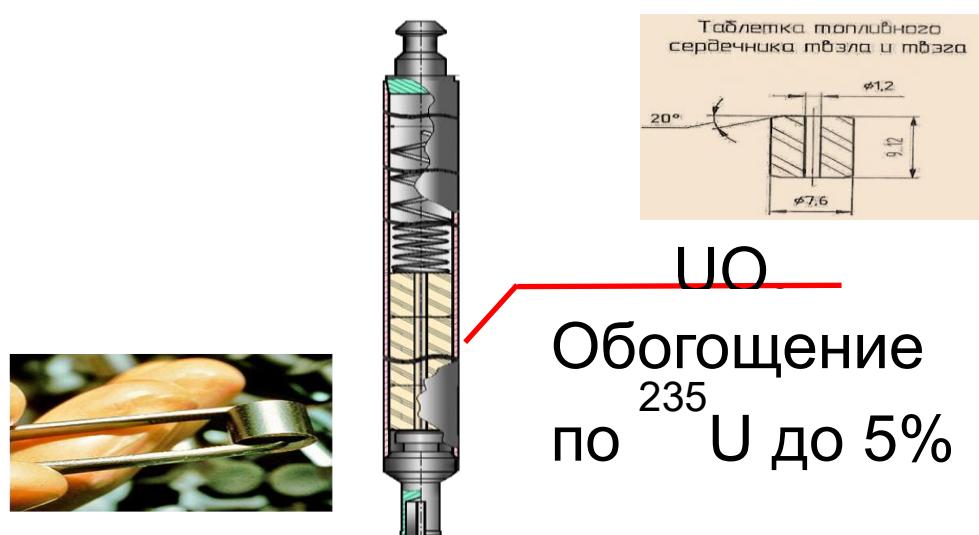
### 2.1 Назначение ТВЭЛа(ТВЭГа)

Тепловыделяющий элемент ТВЭЛ (твэг) предназначен (рисунок-4)(рисунок-5):

- 1) для генерирования тепловой энергии внутри;
- 2) для передачи тепла через оболочку теплоносителю;
- 3) для накопления материалов деления и вторичного ядерного топлива;

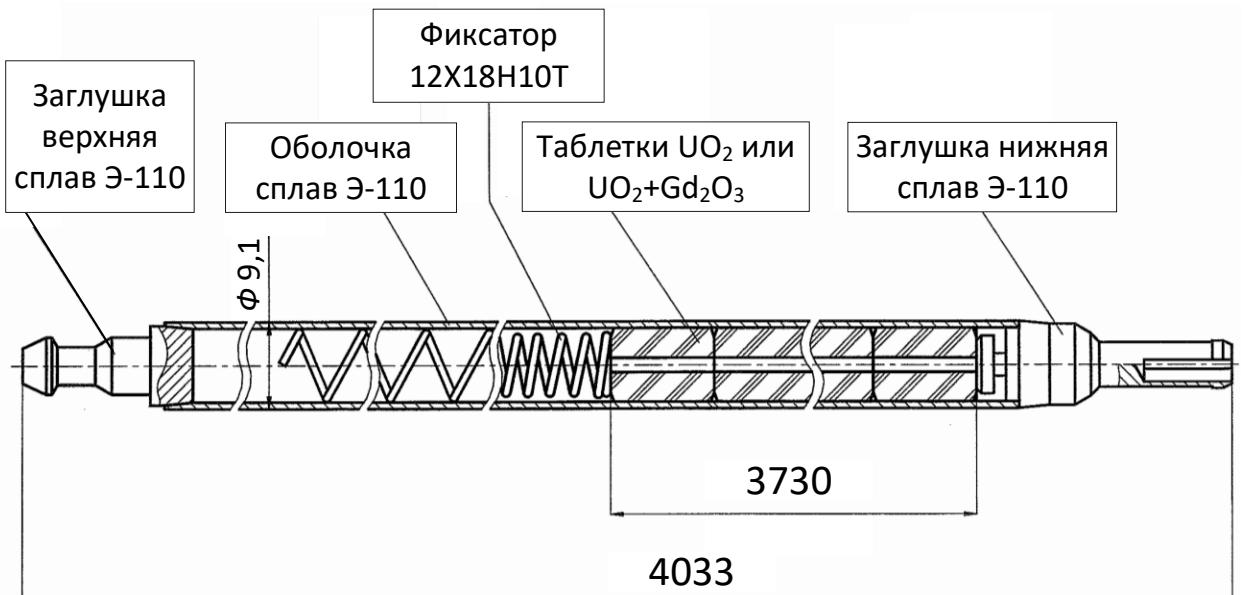
Тепловыделяющий элемент твэг предназначен:

- 1) для выравнивания поля энерговыделения по радиусу активной зоны;
- 2) для уменьшения коэффициента размножения в начале цикла выгорания топлива, что позволяет снизить пусковую концентрацию раствора борной кислоты;
- 3) для обеспечения работы реактора в области отрицательных коэффициентов реактивности по температуре теплоносителя.



Источник [3]

Рисунок 4. Общий вид ТВЭЛа



Источник [2]

Рисунок 5. Конструкция ТВЭЛа

ТВЭЛы омываются теплоносителем, который обеспечивает необходимый теплосъем с поверхности ТВЭЛОв. Тепловая мощность ТВЭЛ = 63 КВт. Для того чтобы собрать газообразных продуктов деления в верхней части ТВЭЛА предусмотрен газосборник. Для предотвращения смятия оболочки в процессе эксплуатации ТВС и улучшения теплопередачи от топлива к оболочке внутренний объем ТВЭЛА заполнен гелием под давлением 2,1 МПа.

Нейтронное поле в реакторе неравномерно. Нейтронный поток в центре активной зоны больше чем на ее периферии. На периферии имеется всплеск нейтронов за счет действия железоводного отражателя. Уменьшение неравномерности энерговыделения за счет применения гадолиния позволяет увеличить номинальную тепловую мощность реактора. Гадолиний является хорошим поглотителем нейтронов поэтому его применение снижает пусковую концентрацию нейтронов и облегчает выполнение требований по обеспечению необходимой подкритичности остановленного реактора. Концентрация выгорающего поглотителя выбирается такой, чтобы

поглотитель практически полностью выгорал в течение одной загрузки реактора.

Тепловыделяющие элементы представляют собой герметичную оболочку с топливным сердечником. Герметизация оболочки осуществляется с обоих концов заглушками посредством контактно стыковой сварки (КСС). Топливный сердечник тепловыделяющего элемента состоит из таблеток. В зависимости от материала таблеток топливного сердечника тепловыделяющие элементы подразделяют на твэлы и твэги.

Для того чтобы собрить газообразные продукты деления, выделяющихся в процессе эксплуатации ТВС, в верхней части твэла (твэга) предусмотрен газосборник. (рисунок-6)

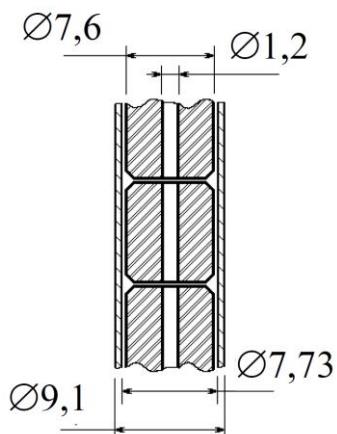
Оболочка предназначена для:

- 1) обеспечения герметичности твэла (твэга);
- 2) передачи тепла теплоносителю;
- 3) защиты топливного сердечника;

Работы в тяжелых условиях (высокая температура, коррозия, эрозия, облучение).

Осьное отверстие в центре сердечника предназначено:

- 1) для снижения температуры в центре таблетки и исключения возможности ее расплавления;
- 2) для компенсации температурных изменений объема топлива;
- 3) для создания дополнительного компенсационного объема для сбора газообразных продуктов деления.



Источник [7]

Рисунок 6. Отверстие в центре сердечника

Между сердечником и оболочкой предусмотрен зазор.

Этот зазор предназначен:

1) для компенсации распухания и температурной деформации сердечника;

2) для создания дополнительного компенсационного объема для сбора газообразных продуктов деления.

При эксплуатации в номинальном режиме Т оболочки ТВЭЛ не превышает 355 °C

Максимальная линейная мощность ТВЭЛ (ТВЭГ) в нижней части 420 (360) Вт/см. Линейная мощность ТВЭГ меньше линейной мощности ТВЭЛ т.к. добавка гадолиния уменьшает температуру плавления топлива.

Максимальное удлинение твэлов - 47,7 мм, твэгов 36,5 мм (при зазоре между твэл (твэг) и головкой ТВС 50мм). Показано на таблице 2

В Топливных таблетках в твэлах (твэгах) есть центральное отверстие для того чтобы снизить максимальную температуру топлива и увеличить объем газосборника. Компенсационный объем (~30 см<sup>3</sup>) для сбора газообразных продуктов деления состоит из:

- 1) свободного объема в верхней части твэла (твэга);
- 2) объема, создаваемого за счет осевого отверстия внутри топливных таблеток;

3) объема между топливным сердечником и оболочкой.

В целях улучшения теплопередачи между топливным сердечником и оболочкой, а также для предотвращения смятия оболочки, компенсационный объем заполняется гелием под давлением 2,1 МПа. Выбор гелия обусловлен тем, что его теплопроводность в четыре раза выше чем у воздуха.

Таблица 2- Параметры ТВЭЛа

Наименование параметра	Значение
ТВЭЛ:	
-шаг между ТВЭЛами, мм	12,75
-наружный диаметр ТВЭЛА, мм номинальный	9,1
-Внутренний диаметр оболочки ТВЭЛА, мм номинальный	7,73
-Материал оболочки и заглушек ТВЭЛА	Сплав Э-110
-Высота столба топлива в холодном состоянии, мм номинальный	3730
Таблетка:	
-Наружный диаметр таблетки топлива, мм номинальный	7,6
-Диаметр центрального отверстия таблетки топлива, мм номинальный	1,2
-высота таблетки топлива, мм номинальный	9-12
Среднее обогащение топлива ТВС по U235 для первой загрузки, %масс	1,30; 2,40; 3,27; 4,00; 4,37
Среднее обогащение топлива ТВС по U235 для стационарной топливной загрузки, %масс	3,97; 4,95; 4,90; 4,92

Источник [6]

Так же заполнение внутренних полостей гелием позволяет организовать на стадии изготовления твэлов (твэгов) простой контроль герметичности оболочек с помощью гелиевых течеискателей.

Размеры компенсационного объема выбираются таким образом, чтобы к моменту достижения проектной глубины выгорания давление под

оболочкой не превышало установленного давления теплоносителя. В противном случае происходит увеличение диаметра оболочки и сужение канала прохода теплоносителя. При этом реализуется положительная обратная связь. Увеличение радиального зазора между топливом и оболочкой приводит к росту температуры топлива, а это еще больше увеличивает выход газообразных продуктов деления под оболочку.

Твэлы и твэги устанавливаются в соответствующие ячейки ДР (решетки дистанционирующей) и нижней заглушкой закрепляются в НР (решетке нижней) посредством цанг. Съемная головка ТВС и крепление твэлов (твэгов) в нижней решетке, позволяющее извлекать негерметичные твэлы (твэги) обеспечивают ремонтопригодность ТВС в условиях АЭС с использованием стенда инспекции и ремонта.

## 2.2 Пределы повреждения твэл и твэг

Пределы повреждения топлива, эксплуатационный предел, предел безопасной эксплуатации и максимальный проектный предел повреждения твэлов АС с РУ типа ВВЭР устанавливаются по правилам ядерной безопасности ПБЯ.

Эксплуатационный предел повреждения твэлов (и твэгов):

- 1) дефекты типа газовой неплотности - не более 0,2% от числа твэлов в активной зоне;
- 2) прямой контакт ядерного топлива с теплоносителем - не более 0,02% от

числа твэлов в активной зоне.

На работающем реакторе должен осуществляться контроль герметичности оболочек твэлов посредством периодического контроля активности теплоносителя. По результатам контроля герметичности

оболочек твэлов определяется объем КГО во время перегрузки активной зоны реактора.

Пределу по типу и количеству дефектов соответствует эксплуатационный предел - допустимый уровень суммарной удельной активности радионуклидов йода 131-135 в теплоносителе первого контура, Бк/кг, не более  $3,7 \cdot 10^7$  контролируемый при эксплуатации энергоблока на мощности.

При достижении предельного уровня суммарной удельной активности радионуклидов йода 131-135 в теплоносителе первого контура оперативным персоналом АЭС должны быть выполнены действия, направленные на приведение РУ к нормальной эксплуатации (в том числе стабилизация мощности и параметров РУ). При дальнейшем росте активности до  $1,85 \cdot 10^8$  Бк/кг реактор должен быть планово остановлен.

Предел безопасной эксплуатации повреждения твэлов:

- 1) дефекты типа газовой неплотности - не более 1% от числа твэлов в активной зоне;
- 2) прямой контакт ядерного топлива с теплоносителем - не более 0,1% от числа твэлов в активной зоне.

Пределу безопасной эксплуатации по типу и количеству дефектов соответствует предельный уровень суммарной удельной активности радионуклидов йода 131-135 в теплоносителе первого контура при стационарных условиях работы энергоблока на мощности, приведенной к моменту отбора проб и проектным условиям работы системы водоочистки теплоносителя на фильтрах системы низкотемпературной очистки теплоносителя ( $30 \text{ т/ч}$ )  $1,85 \cdot 10^8$  Бк/кг.

При достижении предельного уровня суммарной удельной активности радионуклидов йода 131 - 135 в теплоносителе первого контура при стационарных условиях работы энергоблока на мощности реакторная

установка должна быть остановлена и проведен КГО твэлов всех ТВС топливной загрузки.

Объем и порядок КГО во время ППР на остановленной реакторной установке определяется по данным КГО на работающем реакторе.

Негерметичные ТВС, с целью возврата их в топливный цикл для снижения эксплуатационных издержек АЭС, при необходимости, могут быть отремонтированы путем извлечения негерметичных твэлов.

Максимальный проектный предел повреждения ТВЭЛОв соответствует непревышению следующих предельных параметров:

- 1)температура оболочек твэлов должна быть не более 1200 °C;
- 2)эквивалентная степень окисления оболочек твэлов должна быть не более предельного значения, устанавливаемого в проекте на основе экспериментальных данных - не более 18% от общей первоначальной толщины стенки до окисления ;
- 3)доля прореагированного циркония в активной зоне должна быть не более 1% его массы в оболочках твэлов;
- 4)максимальная температура топлива должна быть не выше температуры плавления.

Температура плавления для диоксида урана:  $T_{пл}=2840-0,56 \cdot B, ^\circ C$ , где B - выгорание, МВт.сут/кгU.

Добавка Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> снижает температуру плавления. При содержании Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 5 % она составляет ~ 2405 °C.

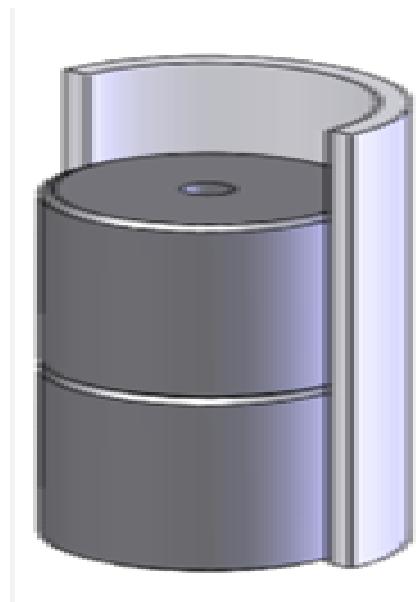
Не превышение предельной энталпии топлива, которая является критерием для аварий, связанных с возрастанием реактивности. Не превышение данного критерия гарантирует отсутствие фрагментации (разрушения) твэла в реактивностных авариях. В качестве критериальной величины используется усредненная по сечению топлива в твэле энталпия, которая учитывает запасаемое топливом тепло при быстром нестационарном тепловом процессе.

Экспериментально обоснованная предельная величина энталпии топлива:

- 1) для выгораний до 50 МВт·сут/кгU – 963 Дж/кг;
- 2) для выгораний выше 50 МВт·сут/кгU – 691 Дж/кг.

### 2.3 Топливная таблетка

Топливные таблетки (рисунок-7) изготавливаются из прессованного порошка двуокиси урана UO<sub>2</sub> методом спекания. Под оболочкой ТВЭлов находится керамическое ядерное топливо – в каждом ТВЭЛе более 200 таблеток диоксида урана. Стандартные обогащения по изотопу урана-235: 1,6 - 2,0 - 2,4 - 3,0 - 3,6 - 4,0 - 4,4 - 4,95%. Наружный диаметр топливной таблетки составляет 7,6 миллиметра, а диаметр осевого отверстия 1,2 миллиметра. Массовая доля урана-235 в смеси изотопов урана, а также массовая доля оксида гадолиния в таблетках топливного сердечника твэлов и твэгов , входящих в состав ТВС, выбираются в зависимости от исполнения ТВС.



Источник [15]

Рисунок 7. Топливная таблетка

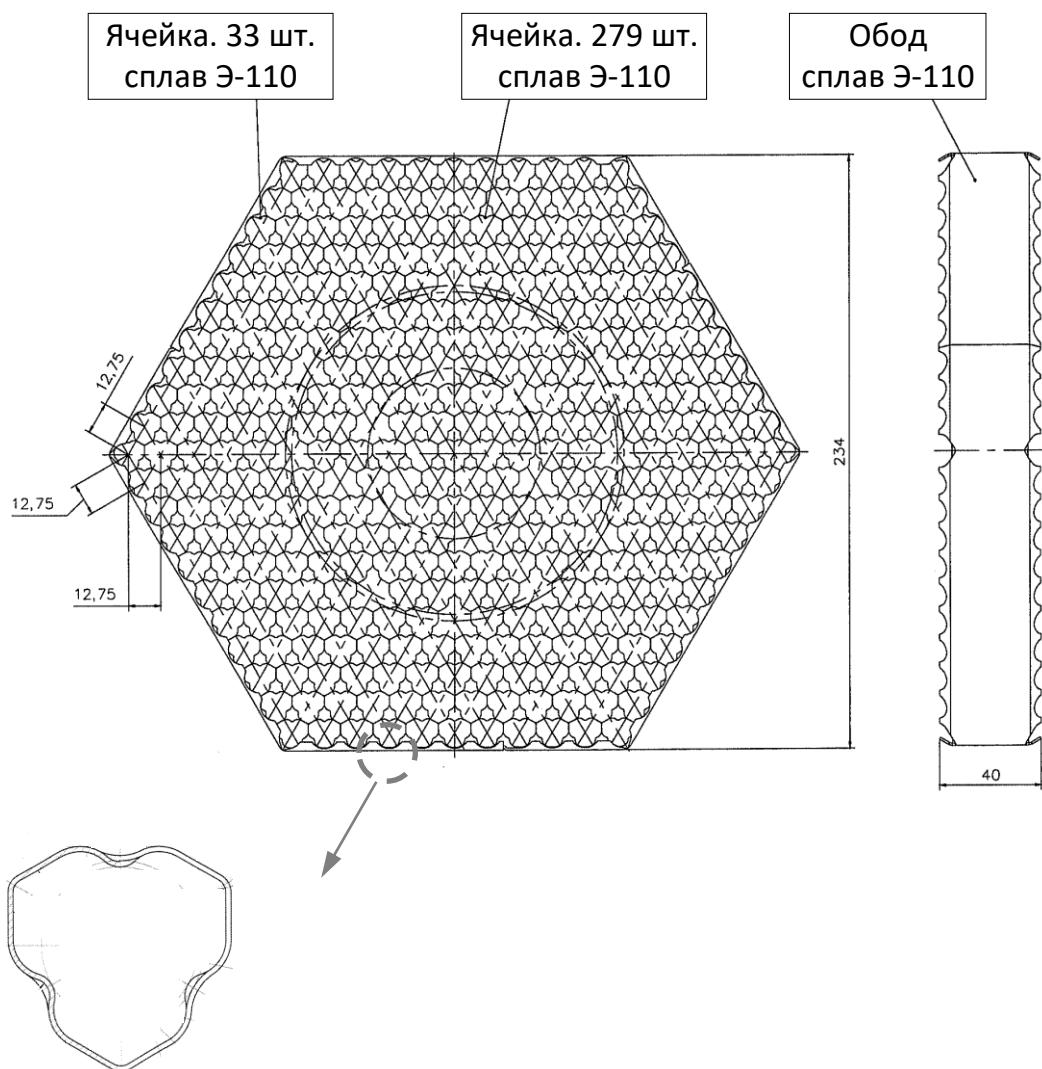
Осьное отверстие в центре сердечника предназначено для снижения температуры в центре таблетки и исключения возможности ее расплавления, для компенсации температурных изменений объема топлива, для создания дополнительного компенсационного объема для сбора газообразных продуктов деления.

Между сердечником и оболочкой есть зазор. Который предназначен для того чтобы компенсировать распускание и температурную деформацию сердечника, для создания дополнительного компенсационного объема для сбора газообразных продуктов деления. температура оболочки ТВЭЛ не более 355оС. Максимальная температура топлива в твэле (твэге) - 1587 (1491)oC. Низкая теплопроводность таблеток приводит к большому перепаду температур по сечению сердечника .Максимальное удлинение твэлов - 47,7 мм, твэгов 36,5 мм.

## ГЛАВА 3. КОНСТРУКЦИИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК

### 3.1 Жесткий каркас

Отличительной особенностью ТВС является наличие жесткого каркаса(рисунок-9), образованного приваркой дистанционирующих решеток (рисунок-8) к направляющим каналам.



Источник [4]

Рисунок 8. Дистанционирующая решетка

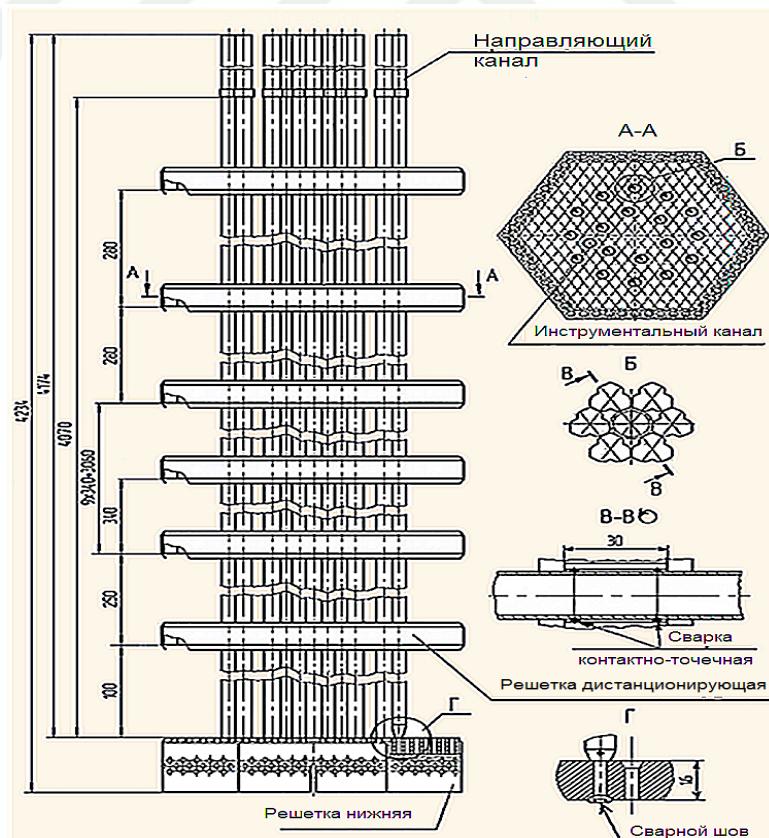
Жесткий каркас(рисунок-10) состоит из 18 каналов (направляющих) , инструментального канала , 13 приварных решеток дистанционирующих. В

жесткий каркас устанавливается 312 тепловыделяющих элементов (твэлов и твэгов).



Источник [2]

Рисунок 9. Жесткий каркас



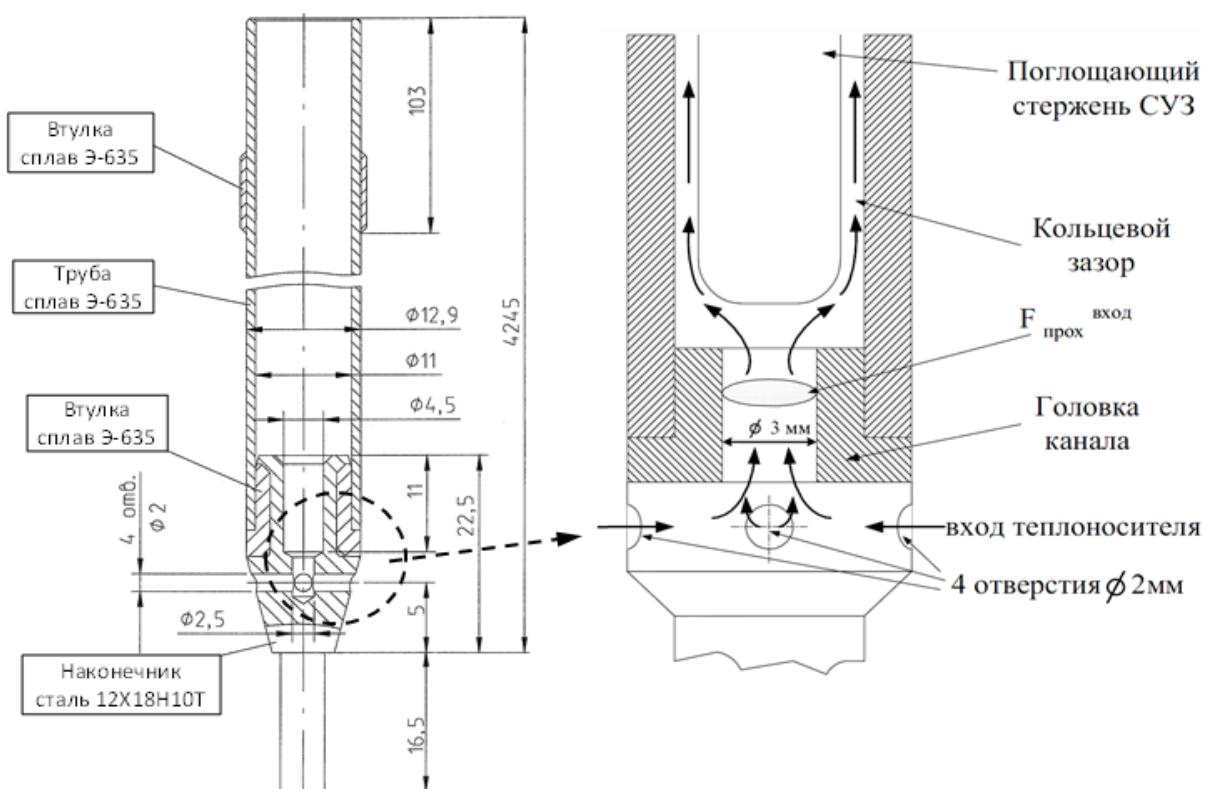
Источник [2]

Рисунок 10. Конструкция Жесткого каркаса

Каналы(рисунок-11) предназначены для размещения в ТВС ПС СУЗ (в зависимости от места ее расположения в активной зоне). В составе жесткого каркаса каналы являются несущими элементами ТВС.

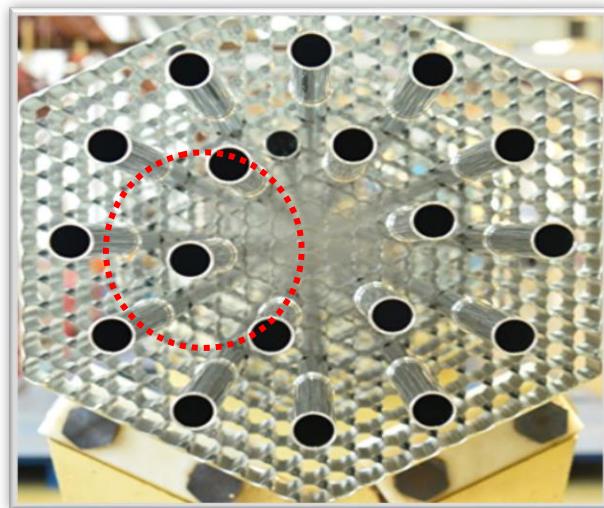
Каждый канал(рисунок-12) представляет собой трубу с наконечником в нижней части, который фиксируется посредством сварки в нижней решетке НР. В верхней части канала имеется втулка посредством этих втулок осуществляется разъемное соединение жесткого каркаса с головкой ТВС.





Источник [8]

Рисунок 11. Канал направляющий



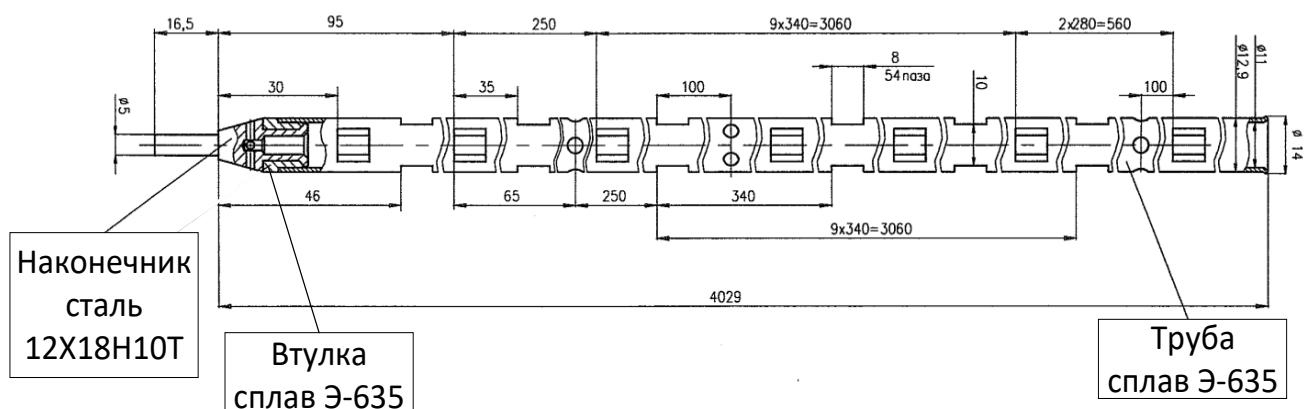
Источник [8]

Рисунок 12. Вид каналов сверху

Особенностью жесткого каркаса ТВС-1200 является крепление инструментальных каналов, каналов направляющих и твэл (твэг) непосредственно в решетке нижней. Ранее применявшиеся конструкции предусматривали закрепления НК в специальной опорной решётке хвостовика. В нижней решётке крепились твэл и твэг и инструментальный канал.

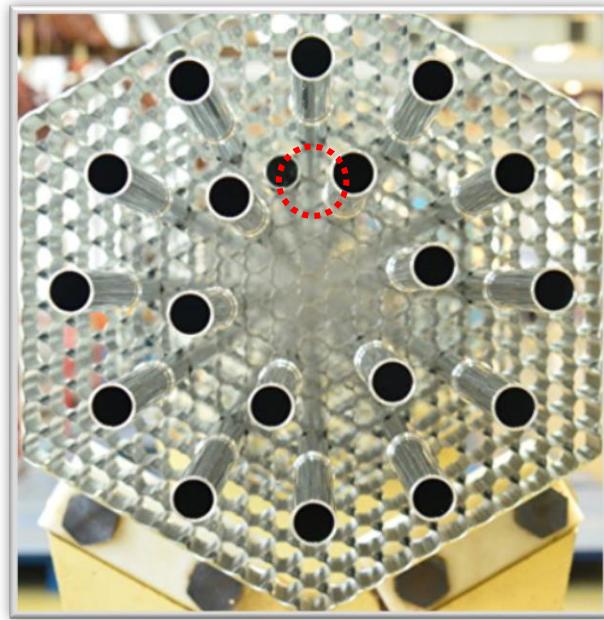
В наконечнике канала (направляющего) выполнены отверстия с целью обеспечения прохода теплоносителя для охлаждения ПЭЛ и обеспечения проектного времени падения ПЭЛ. В режиме стоянки привода через отверстия внизу НК имеется небольшой восходящий проток теплоносителя, который охлаждает ПЭЛ. При срабатывании АЗ ПЭЛ движется вниз и вытесняет теплоноситель через четыре нижние отверстия диаметром 2 мм.

Инструментальный канал (рисунок-13) используется для размещения в активной зоне реактора датчиков внутриреакторного контроля (КНИ или КНИТ и др.). По своей конструкции инструментальный канал(рисунок-14) аналогичен направляющему каналу, но в отличие от него не имеет втулки для соединения с головкой ТВС.



Источник [10]

Рисунок 13. Инструментальный канал



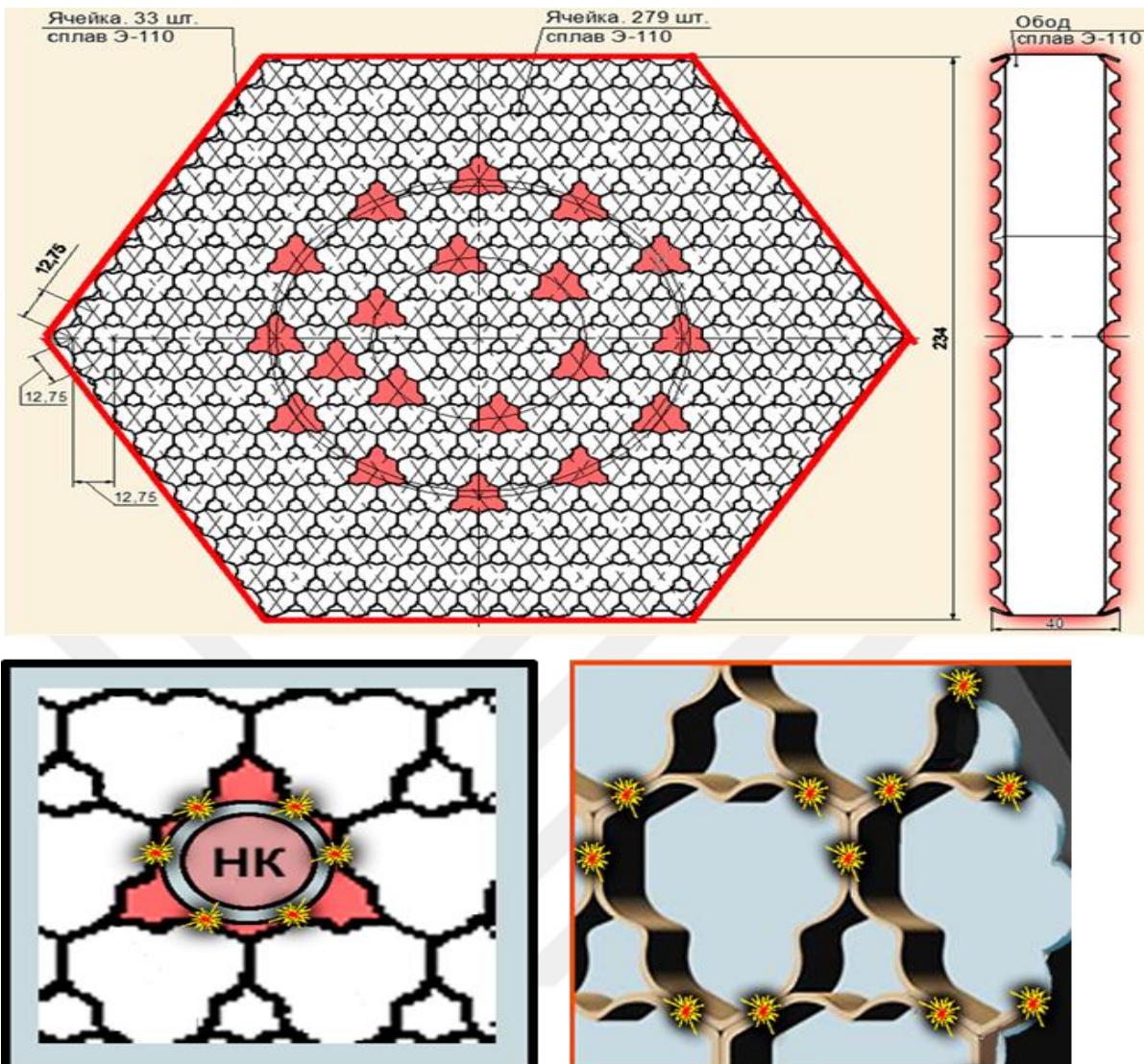
Источник [10]

Рисунок 14. Вид инструментального канала сверху

Кроме этого, инструментальный канал снабжен системой пазов для протока теплоносителя из ТВС во внутреннюю полость инструментального канала. Так же инструментальный канал снабжен пуклевками, которые служат для дистанционирования СВРД (КНИ или КНИТ и др.) по оси инструментального канала.

### 3.2 Дистанционирующая решетка

Дистанционирующие решетки(рисунок-15) ДР служат для обеспечения заданного расположения в ТВС твэлов и твэгов, направляющих и инструментального каналов относительно друг друга.



Источник [9]

Рисунок 15. Дистанционирующие решетки

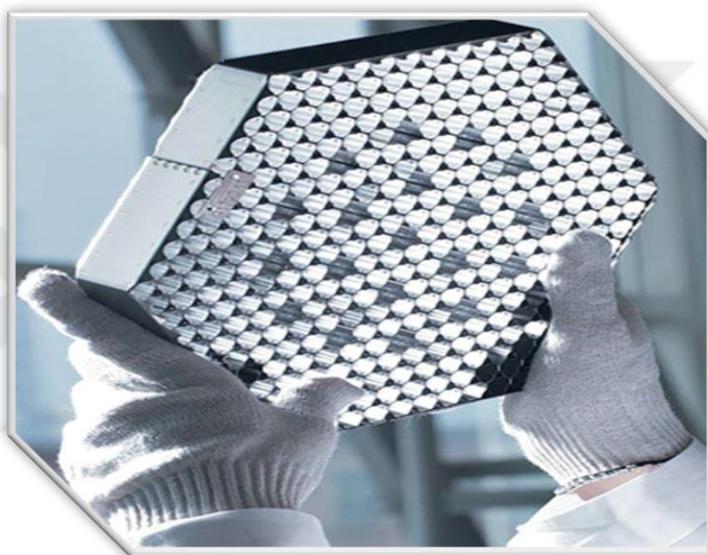
Каждая ДР(рисунок-16) представляет собой набор ячеек двух типов, заключенный в обод. Ячейки между собой и ободом соединены посредством контактной точечной сварки. Ячейки снабжены выступами (пуклевками), расположенными через  $120^{\circ}$ , для дистанционирования твэлов и твэгов. Длина контакта пуклевки с твэлом ячейки 6 мм. Профиль этих выступов и их упругопластические свойства обеспечивают:

- 1) установку твэлов и твэгов в ДР без люфтов;
- 2) возможность проскальзывания в ячейках ДР твэлов и твэгов при их радиационном и температурном удлинениях в процессе эксплуатации ТВС.

ДР соединены с каналами направляющими посредством контактной-точечной сварки образуя жесткий несущий каркас.

Обод состоит из трех частей. Соединение частей обода между собой выполнено внахлест контактно-точечной сваркой.

За счет скосов (отбортовки) под углом 30° по всему периметру ДР (включаястыки) обеспечивается отсутствие зацепления ТВС дистанционирующими решетками с транспортно-технологическим оборудованием и с соседними ТВС при загрузке - выгрузке активной зоны.

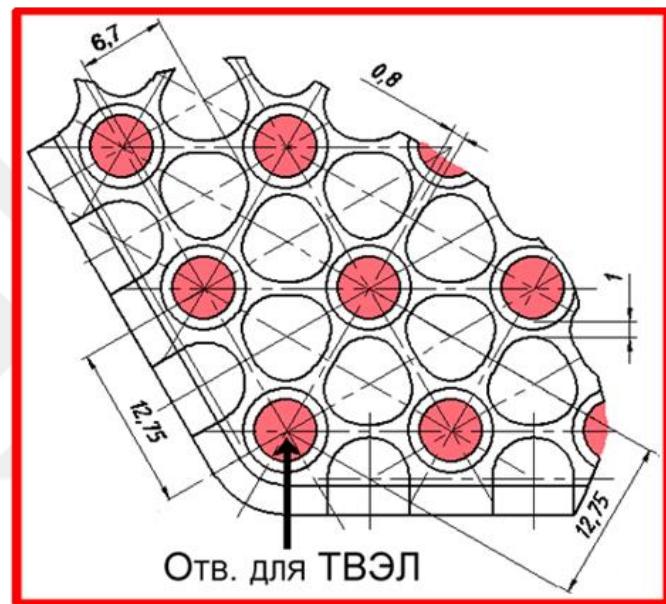
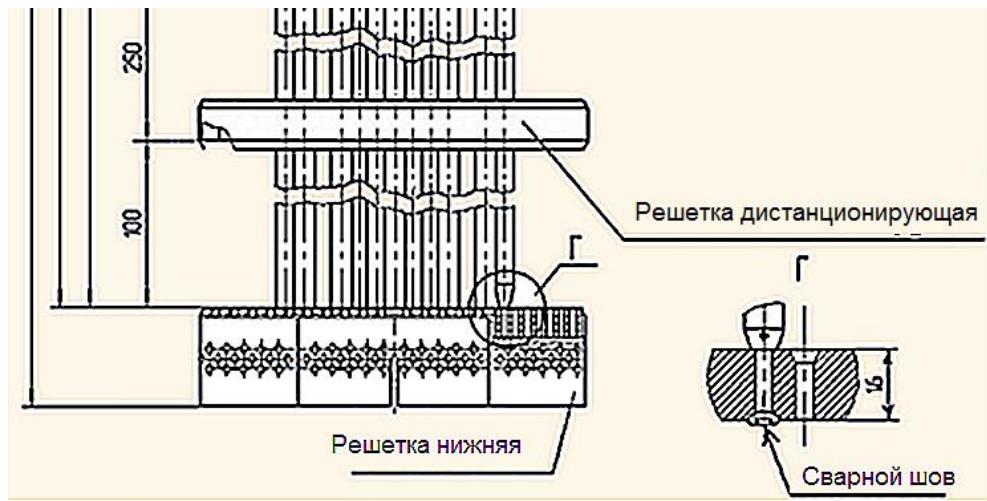


Источник [14]

Рисунок 16. Вид ДР

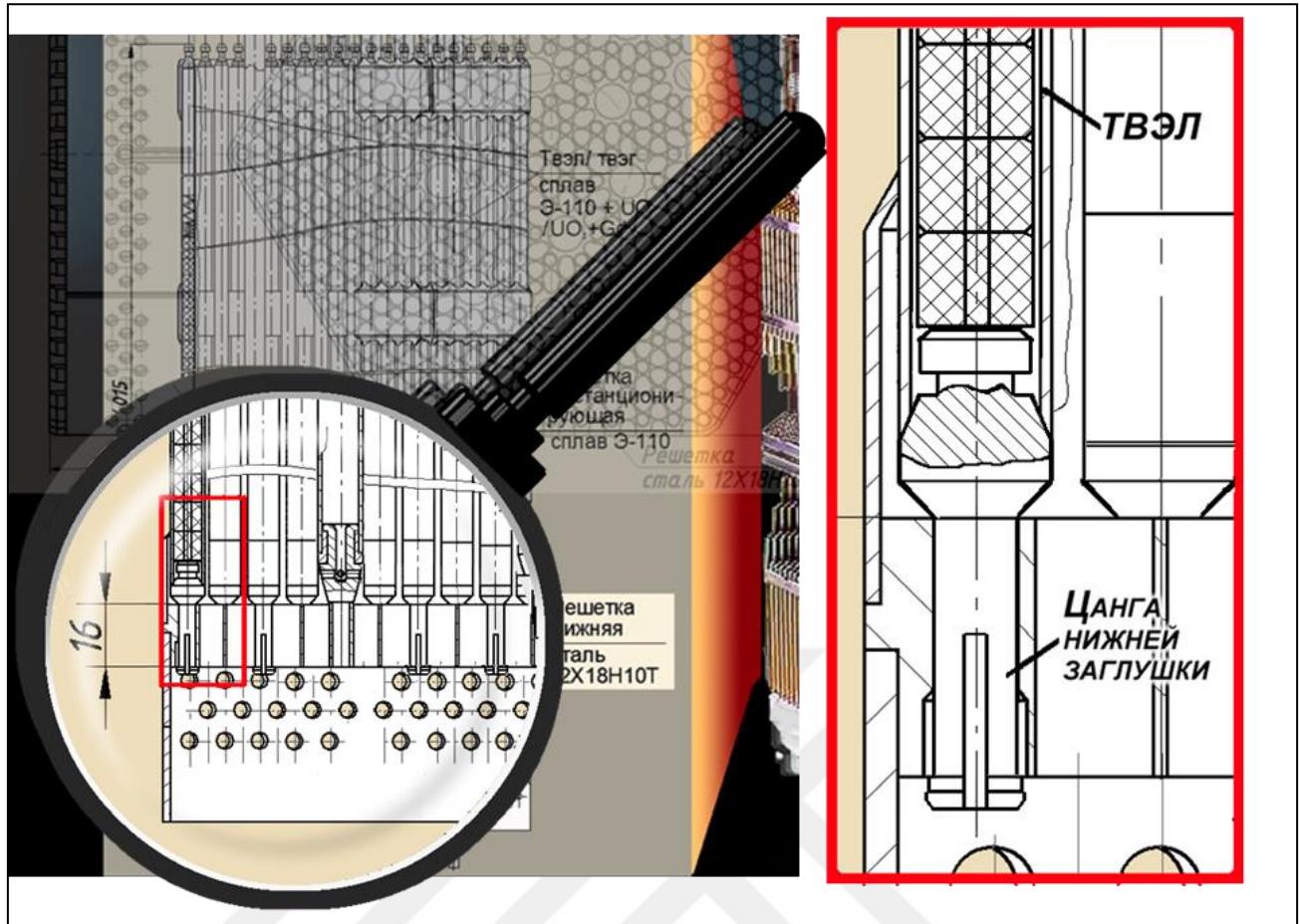
Решетка нижняя(рисунок-17) представляет собой перфорированную плиту с отверстиями для установки и крепления твэлов, твэгов, направляющих и инструментальных каналов, а также пазами для протока теплоносителя в ТВС.

Пазы для протока теплоносителя нижней решетки выполнены треугольной формы со скругленными концами и расположены центрально – симметрично относительно отверстий для закреплений нижних хвостовиков твэлов. (рисунок-18)



Источник [14]

Рисунок 17. Нижняя решетка



Источник [14]

Рисунок 18. Крепление ТВЭЛов в решетке нижней с помощью цанг

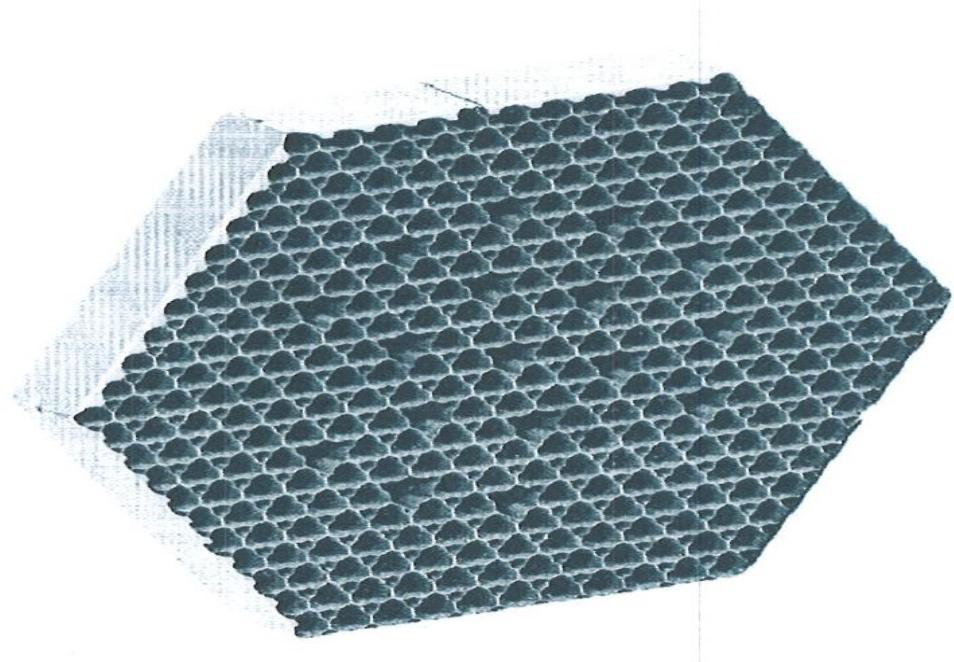
Использование средств интенсификации теплосъема называется одним из основных путей развития и повышения энергонапряженности реакторов и любого энергетического оборудования на АЭС. Средства интенсификации для развития критической мощности зависят от геометрии теплообменного канала и от режима течения теплоносителя.

Закрутка и турбулизация потока теплоносителя в межстержневых ячейках сборок называются распространенными способами развития критической мощности ТВС в документах зарубежных фирм которые получены в результате экспериментов.

Разработка конструкции дистанционирующих решеток для ТВС осуществляется на разных странах. Например, в Австрии, в Австралии, в Бельгии, в Канаде, в США, в России, в Франции, в Германии, в Швеции и в

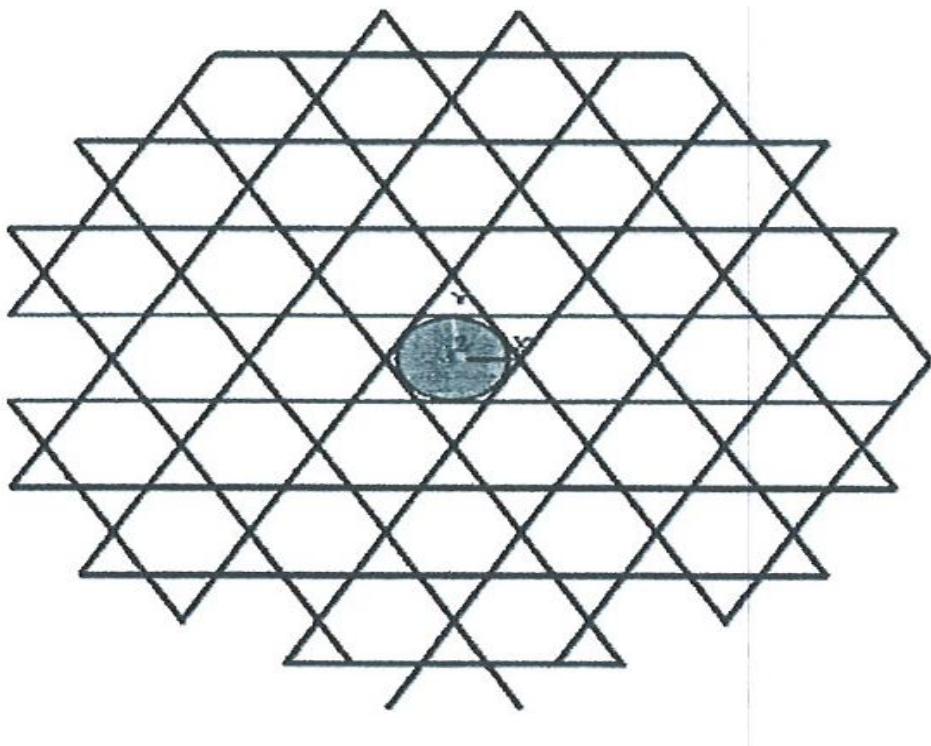
Японии.на показании анализов патентной документации видно что есть около пятисот технических решений в виде патентов .из них можно получить две основные конструкционные группы дистанционирующих решеток.один из них -в виде сборки из отдельных трубчатых ячеек цилиндрической или иной формы .пример на рисунке 19. другой из них -в виде совокупность пересекающихся полос различной конфигурации ,образующих ячейки решетки, на рисунке 1.2.через метод использования плоских пластинок с вырезанными в них отверстиями ячейками для ТВЭЛ и для прохода теплоносителя тоже можно получить дистанционирование ТВЭЛ в сборках .может быть также использована конструкция в виде пересекающихся тяг ,в местах пересечения ,которых находятся центрирующие втулки.

Конструкция дистанционирующей решетки ,выполненную из взаимопересекающихся (рисунок-20) прямых или изогнутых по заданному профилю металлических полос (лент,листов).образующих ячейки различной формы для ТВЭЛОв описывается клоичеством технических решений.



Источник [8]

Рисунок 19. дистанционирующая решетка для компоновки пучка по треугольной сетке



Источник [10]

Рисунок 20. дистанционирующая решетка из пересекающихся пластин

Использование металлических полос имеют некоторые положительные точки. одна из них меньше стоимости по сравнению с другими видами конструкционного материала и другая - возможность использования более экономичной технологии сварки. за счет свойств упругих элементов или комбинации упругих и неупругих элементов ,сформированных непосредственно в стенках ячеек или специально прикрепленных к ним обеспечивается центровка ТВЭЛов в ячейках решетки .фирмы <<General Elektric Comp>>,<<Westinghous Electric Corp.>> которые занимаются изготовлением дистанционирующих решеток из металлических полос ,получают заметные успехи .но в россии в энергетических реакторах используются решетки,сформированные из сотовых элементов .

## ГЛАВА 4. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОГО КОДА ANSYS-CFX.ОБРАБОТКА РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ

### 4.1 Описание программного комплекса ANSYS-CFX

Интегрированный пакет ANSYS-CFX состоит 5 приложений, между которыми происходит обмен информационными потоками, возникающими в процессе постановки и решения задач гидродинамики :

- 1) ANSYS Design modeler ;
- 2) ANSYS CFX-Mesh ;
- 3) ANSYS CFX-Pre ;
- 4) ANSYS CFX-Solver :
- 5) ANSYS-Post

Через первую программу ANSYS Design modeler можно импортировать геометрические трехмерные модели ,которые создаются в других системах автоматизированного проектирования ,и можно адаптировать расчетную модель для того чтобы генерировать расчетную сетку. Адаптация трехмерной модели заключается в заполнении ячеек ТВС жидкой фазой и определении поверхности контакта теплоносителя с оболочкой ТВЭЛа.

Вторая программа ANSYS CFX-Mesh является первым шагом постановки задачи.на данном этапе происходит следующее:

- 1) определение геометрии области исследования;
- 2) создание областей потоков жидкостей или газов, твердых областей и задание имен граничных областей;
- 3) установка параметров сетки.

ANSYS CFX-Pre реализует процесс определения физики задачи.Физический препроцессор импортирует сетку ,созданную на первом шаге.Это второй шаг постановки задачи, на котором определяются физические модели ,на основе которых будет происходить симуляция процесса ,а также их основные параметры и характеристики. ANSYS CFX-

Pre позволяет определить граничные условия процесса (входные ,выходные параметры ),модели теплообмена

ANSYS CFX-Solver - это программа ,реализующая процесс решения задачи вычислительной гидродинамики ,импортируется задача ,поставленная посредством ANSYS CFX-Solver , и производится поиск решения всех требуемых переменных:

- 1) уравнения в частных производных интегрируются по всему объему задачи в области исследования, соответствует применению закона сохранения (масс или момента) к каждой исследуемой области;
- 2) полученные интегральные уравнения преобразуются в систему алгебраических уравнений путем аппроксимирования членов в интегральных уравнениях;
- 3) алгебраические уравнения решаются численным методом.

Последняя программа ANSYS-Post- это программа ,предназначенная для анализа, визуализации и представления результатов,полученных в ходе решения задачи посредством ANSYS-Post.для этого используются следующие средства:

- 1) визуализация геометрии и исследуемых областей;
- 2) векторные графики для визуализации направления и величины потоков;
- 3) визуализация изменения скалярных величин (такие как температура,давление) внутри исследуемой области.

Математическое моделирование осуществляется с помощью метода контрольного объема.сущность метода контрольного объема заключается в следующем ;вся область решения разбивается на большое число многогранных контрольных объемов или ячеек.Ячейки взаимно стыкуются своими гранями.Структура, образованная ячейками ,называется расчетной сеткой.

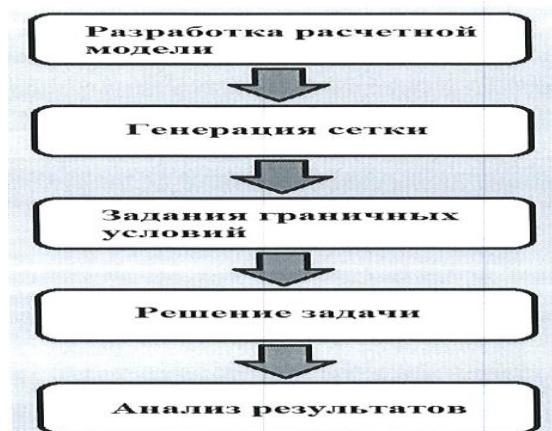
Существует множество различных типов сеток ,для их описания используются специальные термины.например, структурированные сетки ,многоблочные сетки ,неструктурированные сетки и сетки с произвольным сопряжением.

Формы ячеек также могут быть различными.Наиболее часто используются шестиугранники (гексаэдры) и четырехугранники призмы ,шестиугранники (гексаэдры) , а также ячейки с 7 и 8 внешними гранями (так называемые усеченные или SAMM ячейки).

#### 4.2 Методика проведения численных экспериментов

Исследование температурного режима ячейки тепловыделяющей сборки ВВЭР-1200 проводится с помощью расчетного кода <<ANSYS-CFX>>.

Алгоритм, по которому будет проводится тепло гидравлический расчет , представлен на рис 21.



Источник [12]

Рисунок 21. Алгоритм расчетов

Этот алгоритм, как видно из рисунка, состоит из пяти основных этапов.

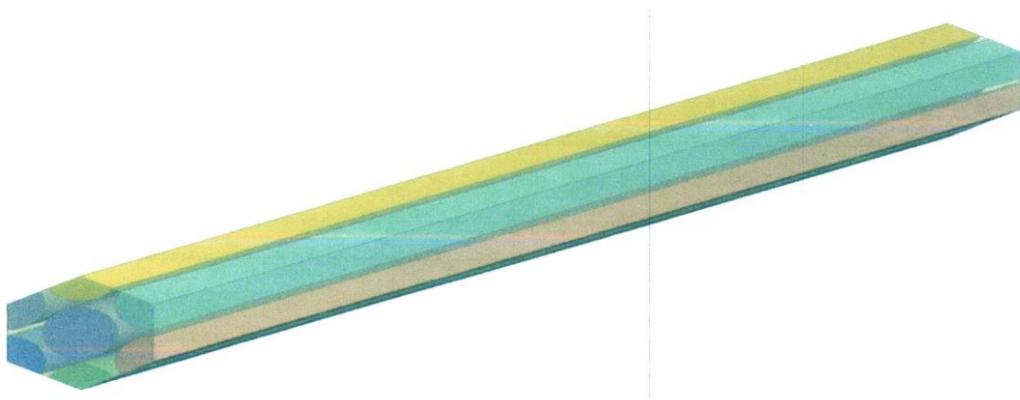
#### 4.3 Построение расчетных моделей

Задачей дипломного проекта рассмотреть и произвести теплообмен в пучке стержня реактора ВВЭР-1200 .Активная зона сформирована из 163 ТВС.тепловыделяющая сборка –шестигранная.количество ТВЭЛОв в ТВС-312,закрепленных в каркасе из 18 направляющих каналов.Диаметр ВВЭР-1200 имеет гексагональное (шестигранное) сечение ,гексагональная форма ТВС обеспечивает более высокую однородность поля расположения ТВЭЛОв и гарантирует сохранность ТВС во время транспортного-технологических операции при ее изготовлении и при эксплуатации на АЭС.

Для численного моделирования теплообмена ТВС реактора ВВЭР-1200 была выбрана расчетная область тепловыделяющей сборки ,состоящая из 6 регулярных элементарных ячеек,образованных шестью ТВЭЛами.

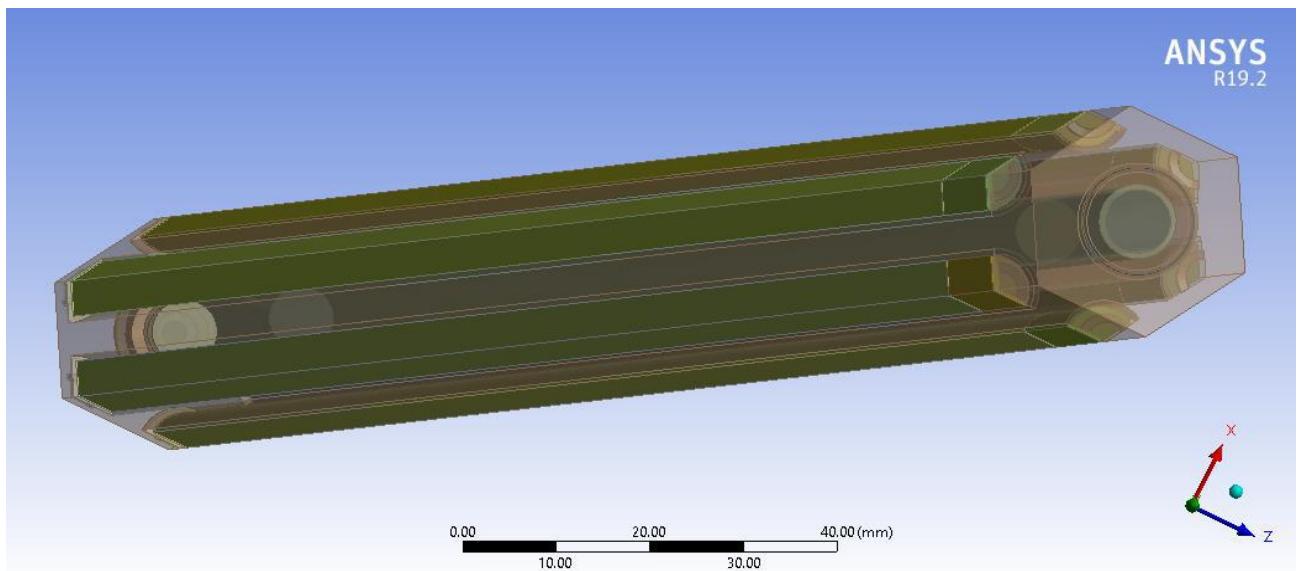
Первоначально необходимо построить элементы моделей: ТВЭЛы (6 штук). Построения 3D моделей производилось в отечественной программе КОМПАС 3D.Затем была собрана, состоящая из семи таких оболочек ТВЭЛОв.Данная геометрия была импортирована в среду ANSYS-CFX.

Расчетная модель показана на рисунках 22, 23, 24.



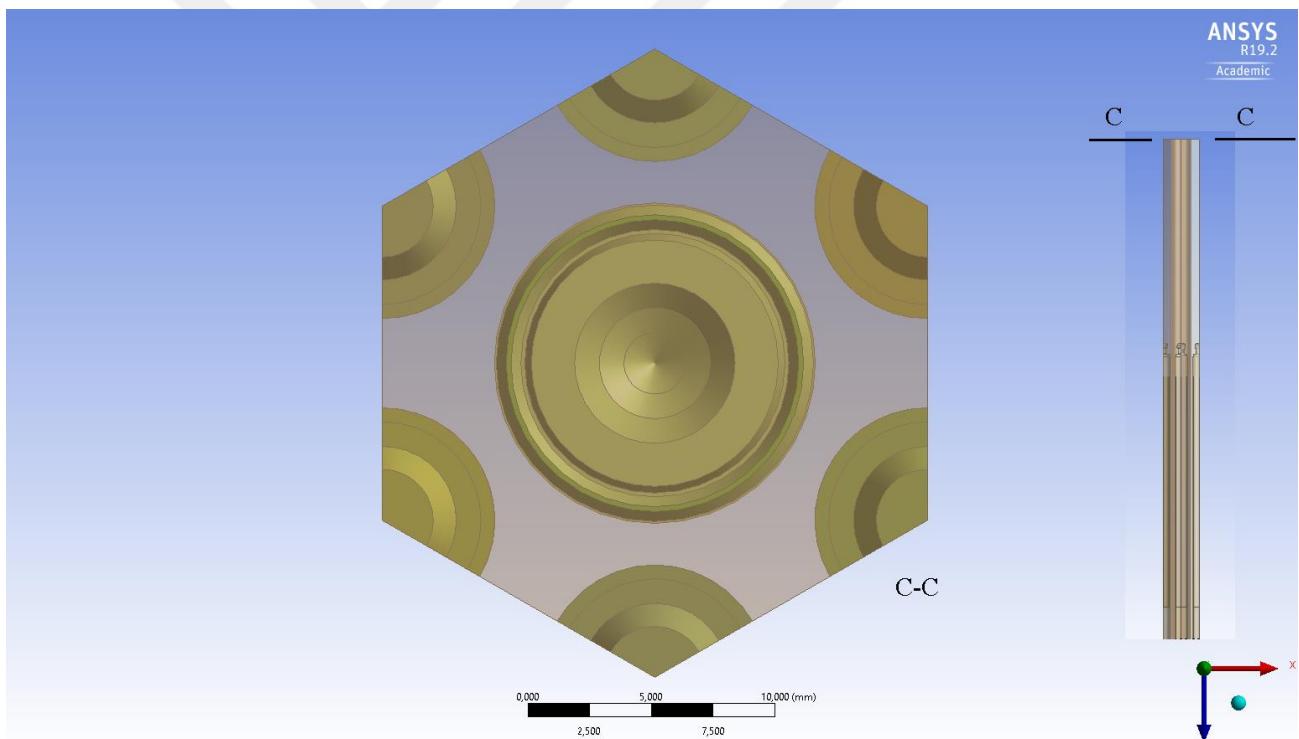
Источник: собственная разработка

Рисунок 22. Расчетная модель в ANSYS



Источник: собственная разработка

Рисунок 23. модель части ТВС с направляющим каналом



Источник: собственная разработка

Рисунок 24. Модель вида сверху

Далее данная сборка была импортирована в <<ANSYS Designmodeler>>, где прошла ее адаптация. МежТВЭльное пространство было заполнено жидкой фазой-теплоносителем. После многочисленных

операции и изменений, была получена конечная расчетная модель, которая состоит элементарных ячеек, образованных шестью ТВЭЛами.

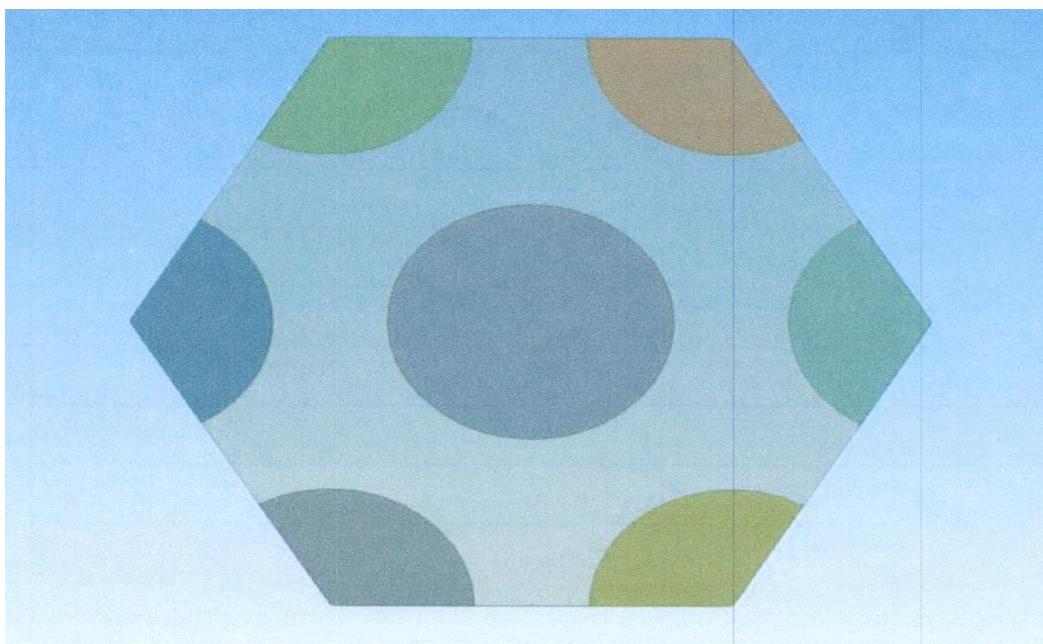
#### 4.4 Импортирование модели в ANSYS, построение сетки моделей

Твердотельная модель расчетной области ТВС реактора ВВЭР-1200 разрабатывалась в системе CAD проектирования КОМПАС 3D. модель состоит из пучка семи ТВЭЛОв.

Твердотельная 3D модель , разработанная в программе доработана в комплексе ANSYS Workbench. В генераторе сеток CFX-MESH была разработана сетка для каждой модели.

CFX-MESH – Это первый шаг постановки задачи.на данном этапе происходит следующее

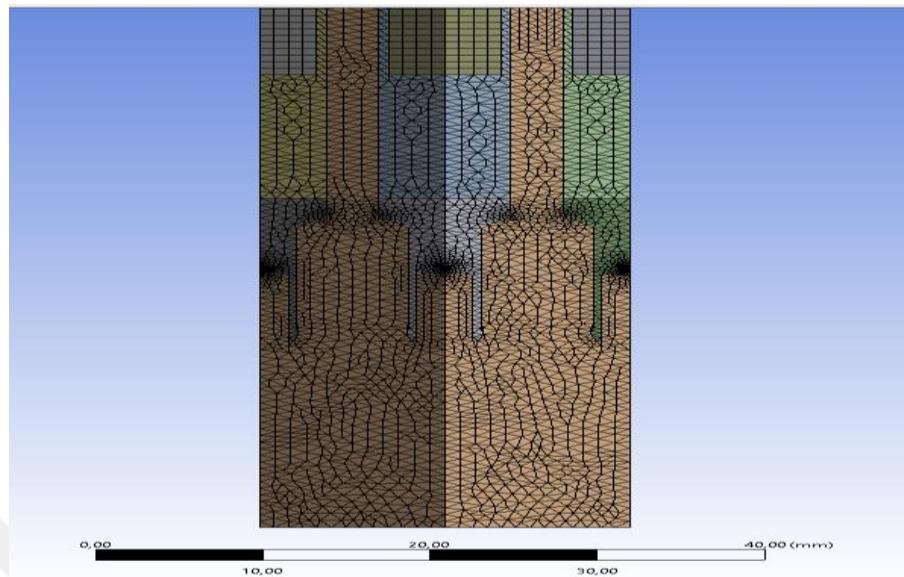
- 1) определение геометрии области исследования (рисунок-25) ;
- 2) создание областей потоков жидкостей или газов ,твердых областей и задание имен граничных областей ,
- 3) установка параметров сетки



Источник: собственная разработка

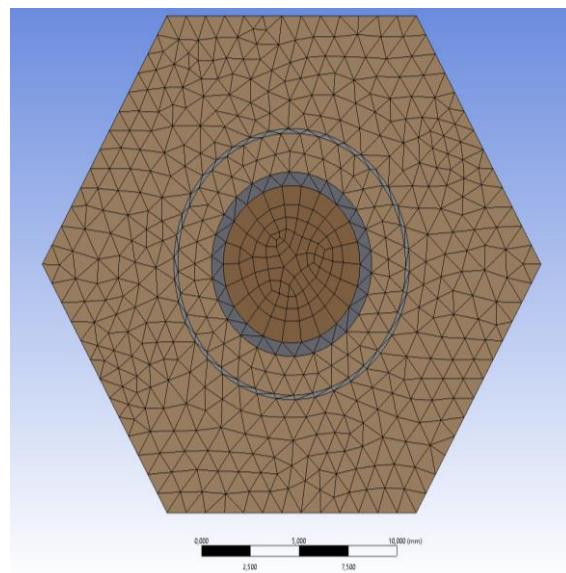
Рисунок 25. Расчетная область

Для моделей обоих вариантов головки количество фрагментов в сетках составляет более 3 млн. На рисунке 26 и 27.



Источник: собственная разработка

Рисунок 26. Расчетная модель с наложенной сеткой в боковом разрезе



Источник: собственная разработка

Рисунок 27. Расчетная сетка в поперечном разрезе

Сетка является частично структурированной. Детализация путем сгущения сетки проводилась для областей течений теплоносителя га границе с поверхностью ТВЭЛА также.

#### 4.5 Постановка граничных условий

После генерации сетки расчетная модель импортируется через программу и реализуется процесс определения физики задачи.Физический процессор импортирует сетку ,которая уже создана.в данном случае были заданы входные поверхности Inlet, выходная поверхность Outlet и боковые грани Wall с параметром Symmetry.

На каждой расчетной модели определена температура 298,2 С на входную поверхности и были заданы скорости -0,8 кг/с на каждой.Пользуясь стандартным приемом постановки граничных условий, на выходе подавалось давление ровное 0 атм

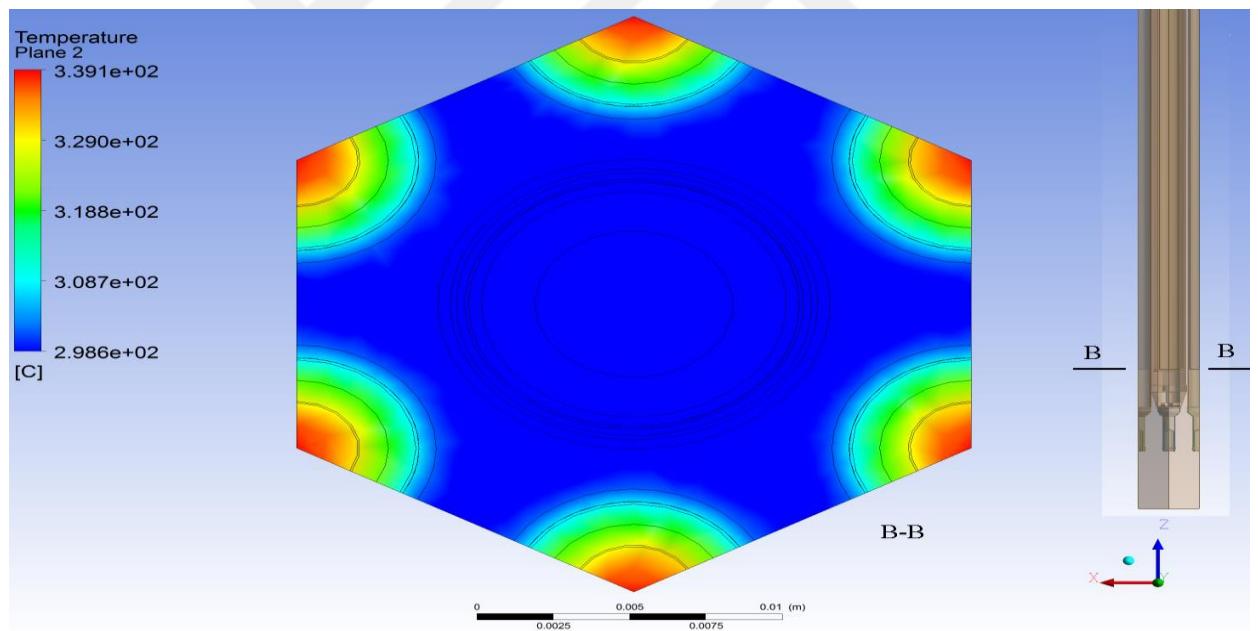
Помимо задания условий для поверхностей на данном этапе необходимо определить материал для расчетной области.В реакторах ВВЭР для области теплоносителя принята вода.Диапазон давлений по воде составляет 0-100 бар.в данном случае необходимо было расширить это диапазон до 200 бар.в результате расширения диапазона давления применялась экстраполяция.

## ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА, ИХ АНАЛИЗ

### 5.1 Результаты распределения температур в поперечном сечении модели по высоте активной зоны

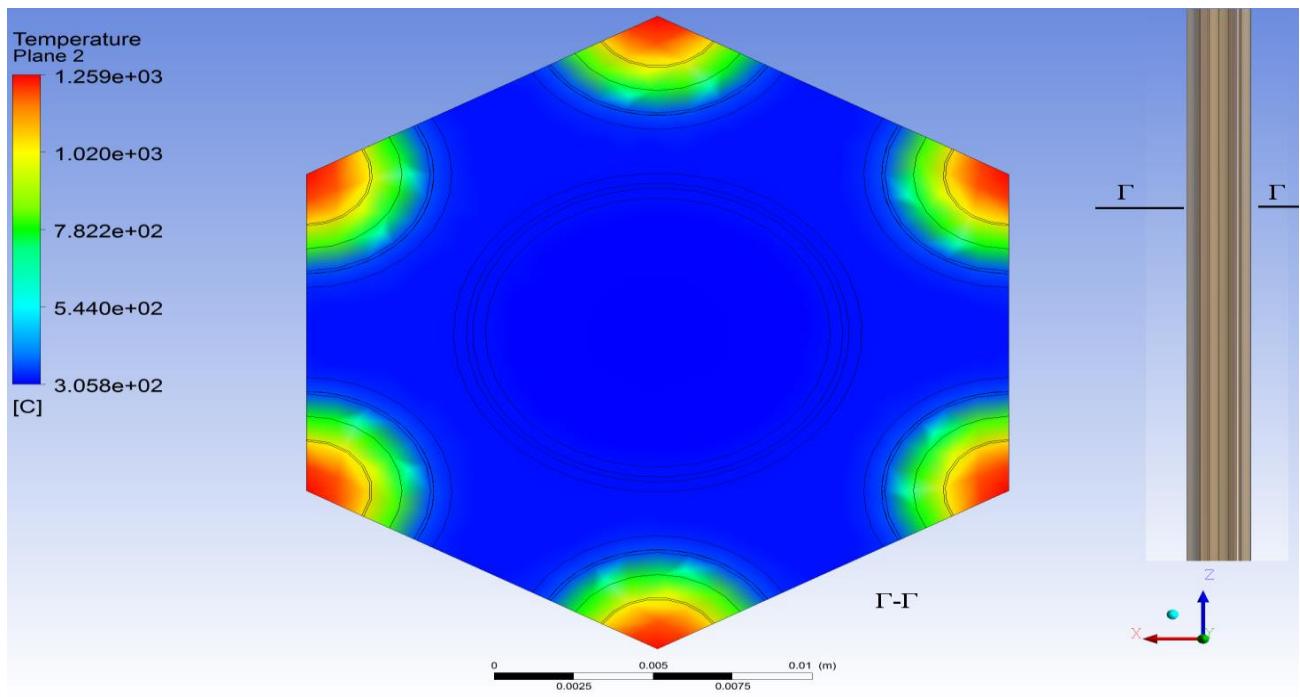
Исходя из поставленной операции необходимо требуется анализировать распределения температур .По расчётному пути был получен поле температур

Для расчётной модели представлено распределение температур в поперечном сечении ТВЭлов. Максимальная температура находится в центре ТВЭла (на рисунках 28, 29, 30, 31 и 32).



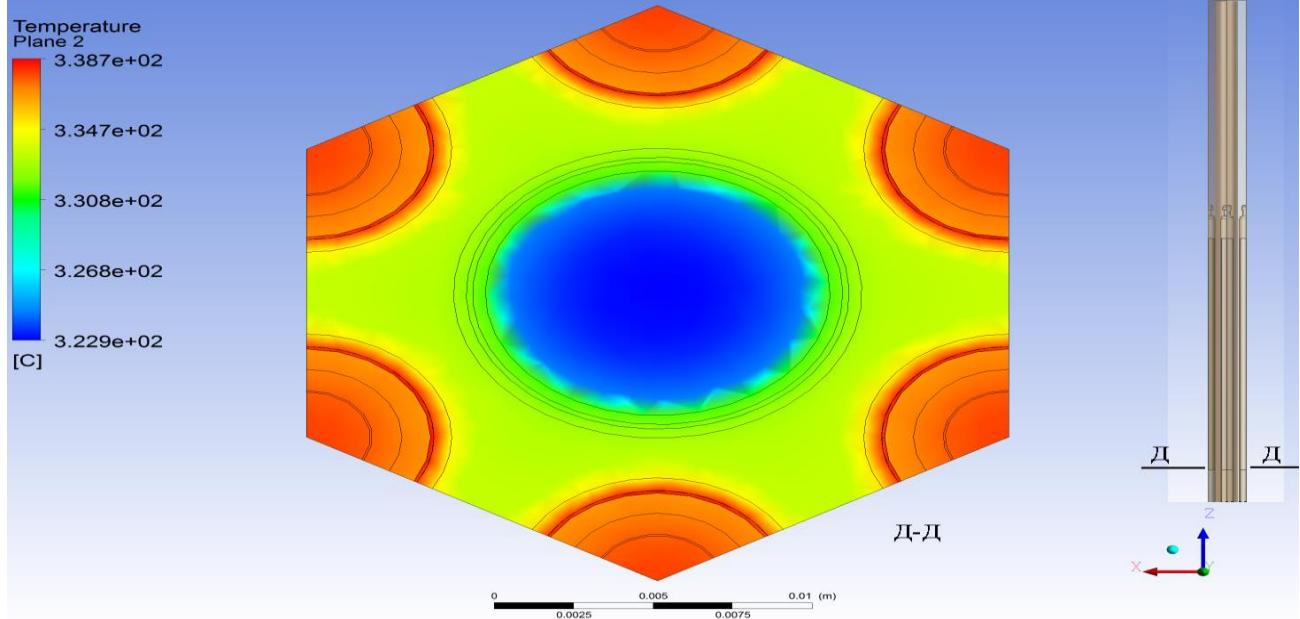
Источник: собственная разработка

Рисунок 28. Распределение температур в поперечном участке нижней части ТВЭлов



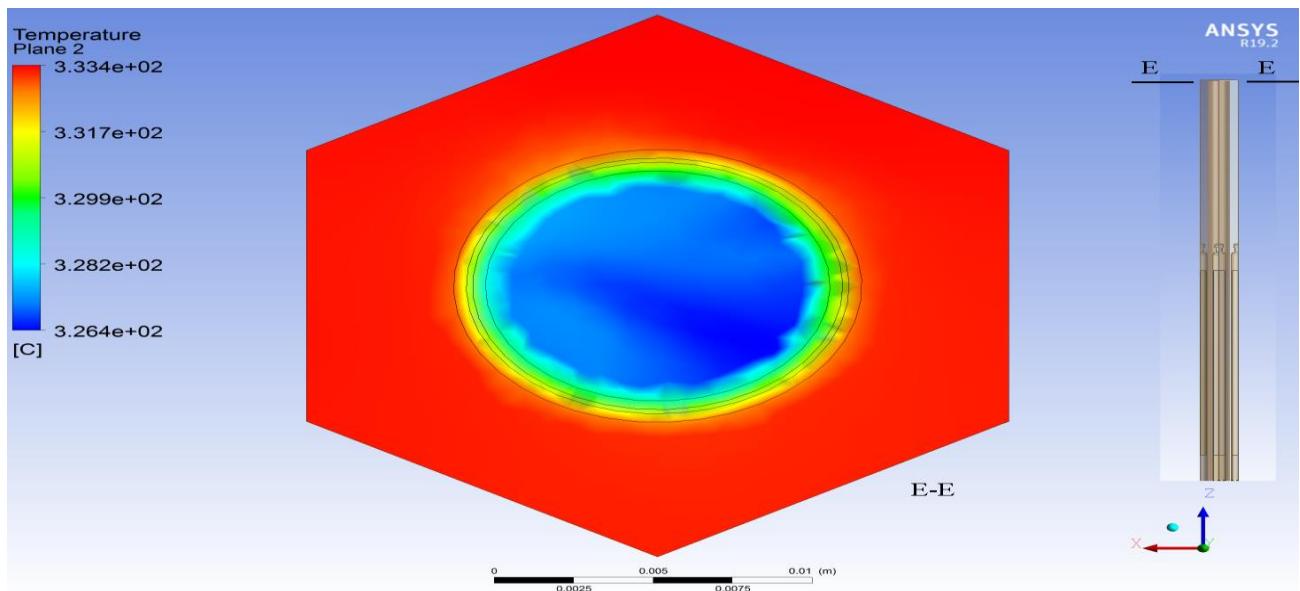
Источник: собственная разработка

Рисунок 29. Распределение температур в поперечном участке в средине активной зоны



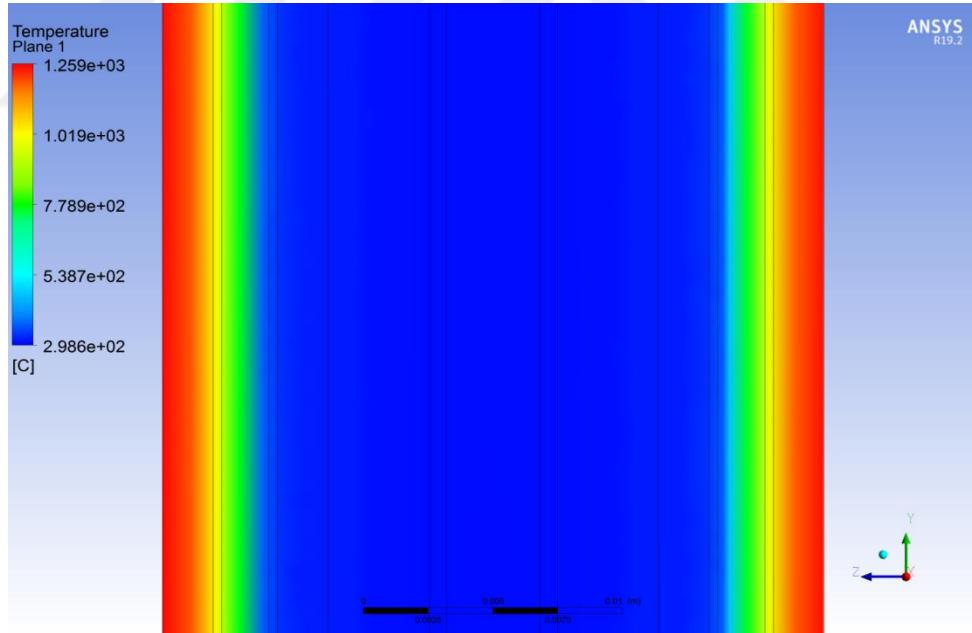
Источник: собственная разработка

Рисунок 30 .Распределение температур в поперечном участке в прижуне



Источник: собственная разработка

Рисунок 31. Распределение температур в поперечном участке на выходе активной зоны



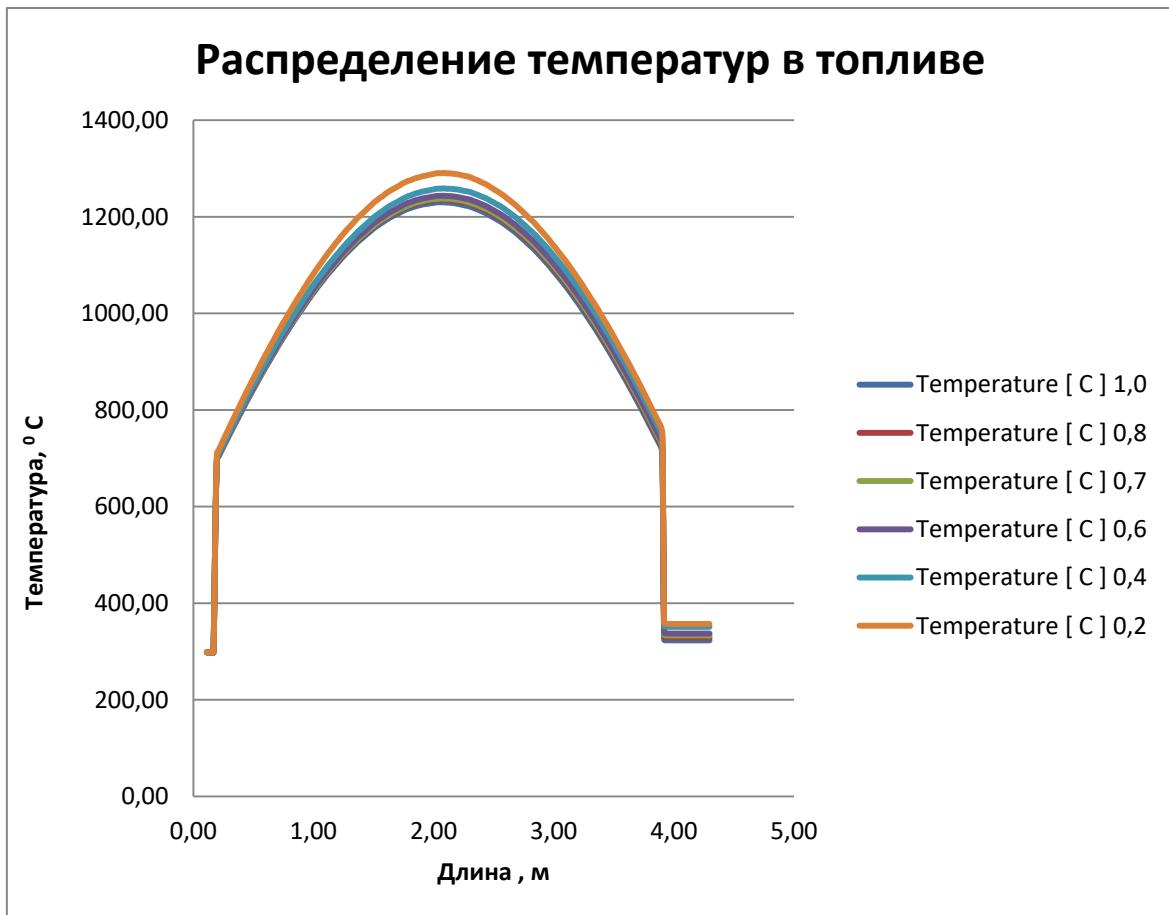
Источник: собственная разработка

Рисунок 32. Распределение температур по радиусу ТВЭЛам

Отмеченный на рисунке уровень является плоскостью отсчета координат по высоте. Сечения В–В, Г–Г и Д–Д, Е–Е имеют координаты по высоте 1,805 м, 2,0455 м, 3,9105 м и 4,295 м соответственно.

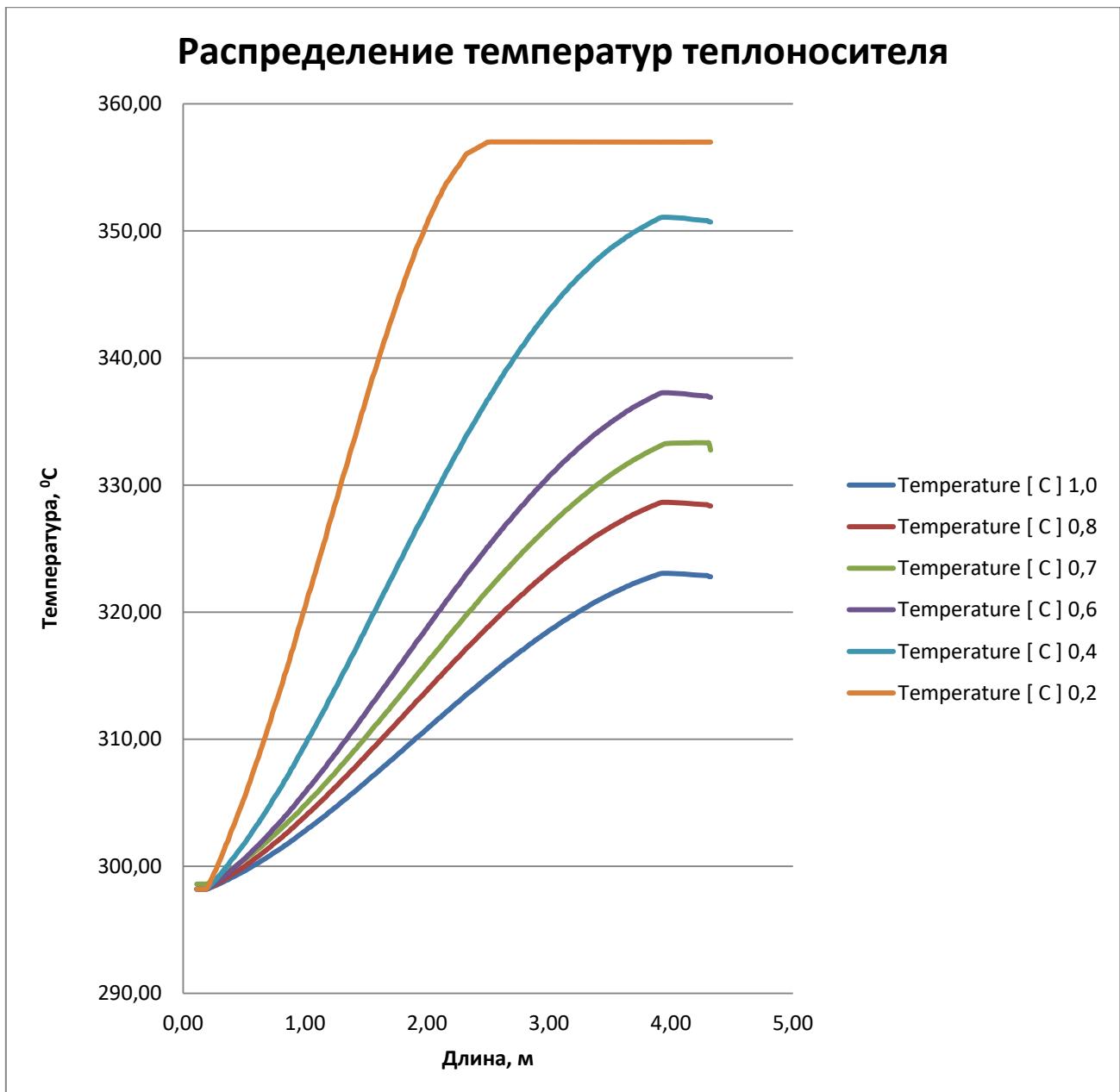
5.2 Полученные графики зависимости температур от высоты активной зоны при разных значениях расхода для топлива; теплоносителя и направляющего канала

На рисунках 33, 34 и 35 показываются распределения температур в топливе, температур теплоносителя и температур в направляющем канале.



Источник: собственная разработка

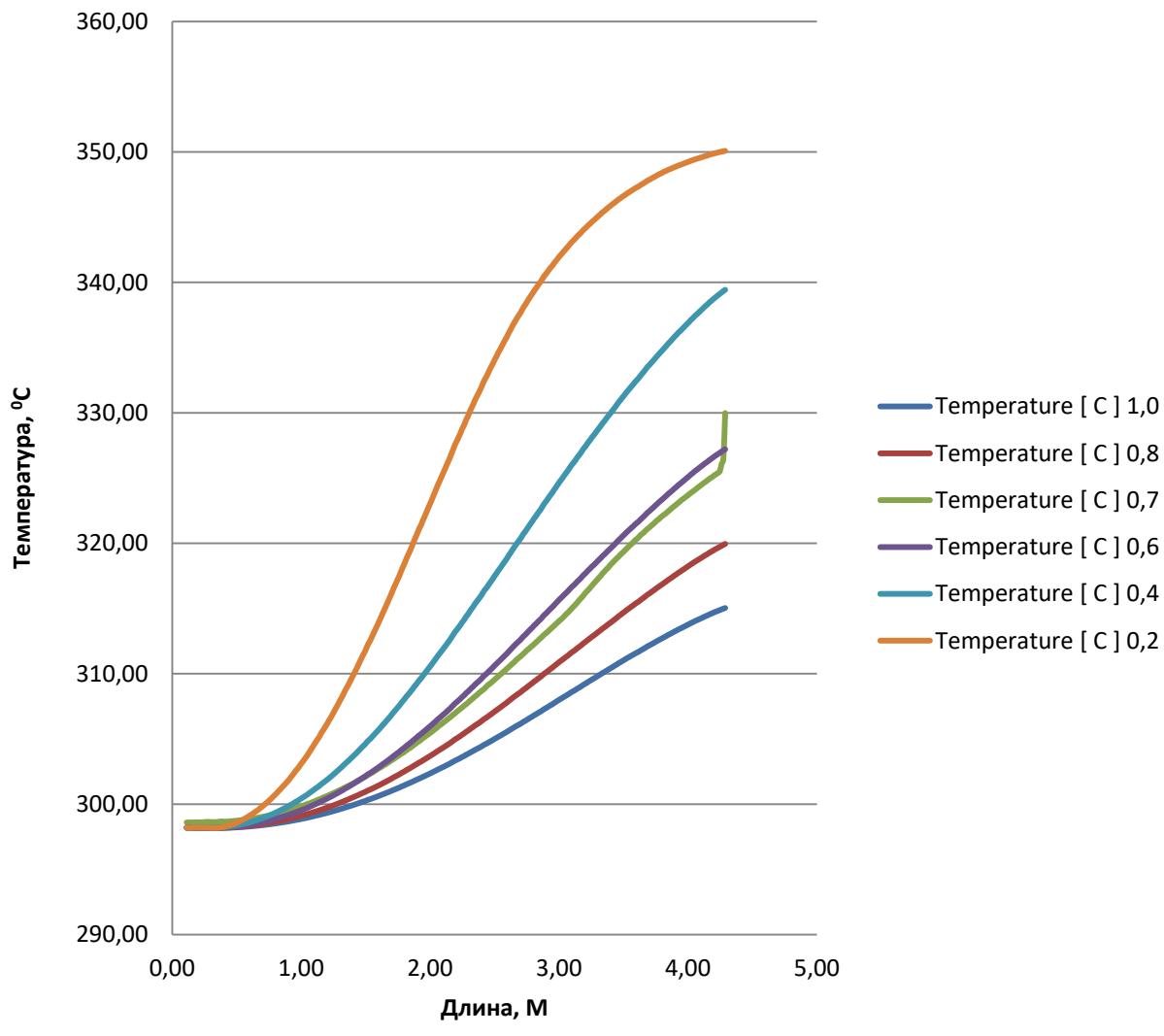
Рисунок 33. Распределение температур в топливе по высоте активной зоны при разных значениях расхода



Источник: собственная разработка

Рисунок 34. Распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны при разных значениях расхода

## Распределение температур в направляющем канале



Источник: собственная разработка

Рисунок 35. Распределение температуры по направляющему каналу по высоте активной зоны при разных значениях расхода

При снижении расхода еще температура в топливе увеличивается. по расчетах видно, что при изменении расхода от 1 кг/с до 0,6 кг/с температура теплоносителя не превышает рабочей температуры оболочек ТВЭЛОв и необходимо обеспечивается запас до кризиса теплообмена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была поставлена задача ,расчетных исследований распределения температур в пучке ТВЭЛ в реакторе ВВЭР-1200.

Геометрия пучок ТВЭЛ была смоделирована в программе Компас и импортирована в программный комплекс ANSYS. На ее основе была получена расчетная модель. Перед проведением расчета были заданы свойства и условия модели. По окончанию расчета полученные результаты подверглись анализу и сравнению с результатами для схожей задачи

В результате расчета были получены распределения температур по высоте активной зоны для топлива, теплоносителя и направляющего канала при различных значениях расхода . Из проведенных результатов расчета следует:

- при номинальном расходе теплоносителя температура в центре топливном таблетке 1259 °C,
- при расходе теплоносителя 0,6 кг/с, температура оболочки ТВЭЛ не превышает предельно допустимый
- при расходе теплоносителя 0,2 кг/с, температура оболочки равна 355 °C и происходит кипение теплоносителя

Таким образом, были достигнуты все цели, поставленные до выполнения данной выпускной квалификационной работы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лупишко А.Н., доклад «Опыт эксплуатации ТВС альтернативной конструкции на Калининской АЭС» ЗГИБиН, Российско-украинский научно-технический семинар по опыту эксплуатации и внедрения топлива ВВЭР нового поколения, 2003 – 212 с.
2. Макаров С.В., отчет о применении различных модификаций ТВСА и улучшении топливоиспользования на блоках Калининской АЭС, г. Удомля, Россия, филиал концерна «Росэнергоатом» «Калининская АЭС», 2014 – 135 с.
3. Молчанов В.Л. Ядерное топливо для АЭС: современное состояние и перспективы [Электронный ресурс] // Восьмая международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» Россия, Москва, 23-25 мая 2012 года: URL: <http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/Doklady/Molchanov.pdf> (дата обращения 03.02.2018)
4. Отчет «Анализ конструктивных отличий ТВСА-PLUS и ТВСА с восемью ДР», ОКБМ им. И.И.Африканова, 2010 – 259 с.
5. Реакторная установка В-320. Техническое описание и информация по безопасности. 320.00.00.00.000.Д61, Глава 31 «Обоснование безопасной эксплуатации реакторной установки В-320 с активной зоной с тепловыделяющими сборками альтернативными на энергоблоках АЭС Украины и Болгарии» ОКБ "Гидропресс", 2003 – С.120-128.
6. Самойлов О.Б., Кайдалов В.Б., Романов А.И., Фальков А.А., Молчанов В.Л., Ионов В.Б., Аксенов В.И., Канышев М.Ю., Лупишко А.Н. Технические характеристики и результаты эксплуатации ТВСА ВВЭР-1000.

Сб. трудов 5-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 2007 – 224 с.

7. Теплинский К.Ю., Макаров С.В., отчет по результатам внедрения и опыту эксплуатации ТВСА, г. Удомля, Россия, филиал «концерна Росэнергоатом» «Калининская АЭС», 2002 – 157 с.

8. Абдуллаев А.М., Кулиш Г.В., Слепцов С.Н., Жуков А.И. Расчетный анализ ПЭЛ - эффекта в смешанной активной зоне ввэр-1000. ЦПАЗ НТК «Ядерный Топливный Цикл», ХФТИ, Харьков, Украина.2004 – 119 с.

9. Андрушечко С.А., Афров А.М., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф., АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. Москва, Логос, 2010 – 603с.

10. Афров А.М., Андрушечко С.А., Украинцев В.Ф., Васильев Б.Ю., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Кокосадзе Э.Л., Иванов Е.А., ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность Москва, Логос, 2006. – 487с.

11. Багаев Д.В., Ваченко А.С., Шалумов А.С., Фадеев О.А., Введение в ANSYS: прочностной и тепловой анализ. 2002 – С.234-235.

12. Басов К.А., ANSYS в примерах и задачах. М.: Компьютер пресс, 2002. – 224 с.

13. Белозеров В.И., Варсанев Е.В., Колесов В.В., Моделирование влияния недогрева теплоносителя в органах регулирования на измерение температуры на выходе из ТВС реактора ВВЭР-1000. Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ» Обнинск. 2013 – 152 с.

14. Долгов А.Б., Лавренюк П.И. Разработка и усовершенствование ядерного топлива для активных зон энергетических установок. 9-я МНТК

«Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»Москва, 2014. – 18 с.

15. Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000. Учебное пособие. М.:НИЯУ МИФИ, 2011. – 116 с.

16. Учебные материалы для персонала Нововоронежской АЭС.

17. С.А. Логвинов, Ю.А. Безруков, Ю.Г. Драгунов. «Экспериментальное Обоснование Теплогидравлической Надежности Реакторов ВВЭР», ИКЦ «Академкнига», 2004, С. 120

18. А.В. Морозов, О.В. Ремизов, Д.С. Калякин. «Итоги научно-технической деятельности института ядерных реакторов и теплофизики за 2013 год. Научно-технический сборник», Обнинск 2014, С. 180

19. В.И. Слободчук, А.С. Шелегов, С.Т. Лескин. «Основные системы энергоблоков АЭС», Учебное пособие по курсу АЭС, Обнинск, 2010

20. Долгов А.Б., Лавренюк П.И. Разработка и усовершенствование ядерного топлива для активных зон энергетических установок. 9-я МНТК «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики»Москва, 2014. – 57 с.

21. С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов и др. «АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта», Москва, «Логос», 2010. С. 536-546

22. С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов и др. «АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта», Москва, «Логос», 2010. С. 558-571

23. Багаев Д.В., Ваченко А.С., Шалумов А.С., Фадеев О.А., Введение в ANSYS: прочностной и тепловой анализ. 2002 – С.202-218

24. Отчет «Анализ конструктивных отличий ТВСА-PLUS и ТВСА с восемью ДР», ОКБМ им. И.И.Африкантова, 2010- 244 с.

25. 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 ВВЭР1000 От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М :Логос, 2010. - 604 с. + цв. Вклейки.

26. Ермолин, В.С, Окунев В.С. О размещении гадолиния в центральном отверстии твэлов водо-водяных реакторов // Физико-технические проблемы ядерной энергетики. – Научная сессия МИФИ-2008. – стр. 101-102

27. Федоров Ю.С., Бибичев Б.А., Зильберман Б Я., Кудрявцев Е.Г. Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах. / Атомная энергия, 2005, т. 99, вып. 2. С. 136141.

28. Тепловыделяющая сборка ТВСА ВВЭР-1000: направления развития и результаты эксплуатации / В.Б. Кайдалов [и др.] // Атомная энергия. – 2007. Т. – 102.– С. 43 – 48.

29. Разработка и внедрение ТВС-2М для перспективных топливных циклов / Ю.Г. Драгунов [и др.] // Атомная энергия. – 2005. Т. – 99.– С. 432 – 437

30. Клемин А.И., Полянин Л.Н., Стригулин М.М. Теплогидравлический расчет и теплотехническая надежность ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1980.

31. Безруков Ю. А. и др. Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР-1000// Теплоэнергетика, 1976, №2, с.80-82

32. Левин Е.И. Предложения по методологии определения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи по тепловому потоку. Семинар

секции динамики "Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации", Сосновый Бор, НИТИ, 18-22.09.2000.

33. О.Б. Самойлов, В.В. Вахрушев, А.В. Куприянов, В.С. Кууль, В.Е. Лукьянов В.И. Пахолков, А.А. Фальков. Экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик на моделях ТВСА ВВЭР-1000. Четвертая Международная научно-технической конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", 23-27 мая 2005 г., г. Подольск

34. Новицкий П.В. Об особых свойствах 95% квантили большого класса распределений и предпочтительных значениях доверительной вероятности при указании погрешностей приборов и измерений. – Метрология, 1979, №2, с.18-24.

35. Ю.Г.Драгунов, С.Б.Рыжов, И.Н.Васильченко, С.Н.Кобелев, В.В.Вьялицын "Проект активной зоны для РУ АЭС-2006", V международная научно-техническая конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", Подольск, 29.05-01.6.2007

36. П.И.Лавренюк, В.Л.Молчанов, В.М.Троянов, В.Б.Ионов "Ядерное топливо для реакторов ВВЭР. Современное состояние и перспективы", V международная научно-техническая конференция "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", Подольск, 29.05-01.6.2007