

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Кафедра ядерные энергетические установки

В.В. Шаповаленко, К.Б. Матузаев

**ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ
РЕАКТОРА PWR**

Учебно-методическое пособие

Севастополь
СевГУ
2017

УДК 621.039.5
Ш 241

Р е ц е н з е н т ы:

Ю.В. Браславский – к.т.н., доцент

И.Ю. Софийский – к.т.н., доцент

Шаповаленко В.В.

Ш241 Тепловой расчет тепловыделяющей сборки реактора PWR: учеб.-метод. пособие для выполнения расчетно-графической работы / В.В. Шаповаленко, К.Б. Матузаев. – Севастополь, СевГУ, 2017. – 37 с.

Приводится методика и даются практические рекомендации по выполнению теплового расчёта тепловыделяющего элемента в ТВС для реактора типа PWR. Особенностью расчёта является анализ надёжности конструкции тепловыделяющего элемента с учетом выбора конструкционных материалов твэла при заданных условиях его эксплуатации в активной зоне ЯР.

Учебно-методическое пособие рассчитано на студентов очной и заочной формы обучения, выполняющих расчетно-графическую работу по дисциплине «Теплогидравлический расчёт ядерных реакторов» по направлению подготовки специалистов 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг».

УДК 621.039.5

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Ядерные энергетические установки», протокол № 3 от 27 сентября 2017 г.

© Шаповаленко В.В., Матузаев К.Б., 2017
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения	4
Введение	5
1. Общая характеристика тепловой схемы АЭС с реактором PWR. Описание конструкции тепловыделяющей сборки реактора PWR	6
2. Расчёт распределения линейной тепловой нагрузки по высоте твэла	15
3. Расчёт температуры теплоносителя по высоте ТВС	16
4. Расчёт коэффициента теплоотдачи	17
5. Расчёт распределения температуры в оболочке твэла	19
6. Расчёт распределения температуры ядерного топлива	21
7. Расчёт запаса до кризиса теплоотдачи	24
Литература.....	26
Приложение 1 Графики	27
Приложение 2 Справочный материал	30
Приложение 3 Варианты задания	33

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

p	абсолютное давление, <i>МПа</i>
t_{mn}	температура теплоносителя, °С
t_s	температура насыщения, °С
ρ	плотность, кг/м ³
v	удельный объём, м ³ /кг
v'	удельный объём воды на линии насыщения, м ³ /кг
v''	удельный объём сухого насыщенного пара, м ³ /кг.
h	удельная энтальпия, кДж/кг
h'	удельная энтальпия воды на линии насыщения, кДж/кг
h''	удельная энтальпия сухого насыщенного пара, кДж/кг
r	скрытая теплота парообразования, кДж/кг
s	удельная энтропия, кДж/(кг·К)
c_p	удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)
λ	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
$\psi_{аз}$	доля тепла, выделяемая в активной зоне ЯР

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой расчет относится к проверочным расчетам. Основными разделами расчета являются: расчет тепловыделений по высоте активной зоны, коэффициента теплоотдачи, расчет температуры топлива и оболочки тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ), а также расчет коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи.

Температура топлива, оболочки ТВЭЛ и коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи входят в перечень основных критериев, по которым оценивается надежность работы конструкции ТВЭЛ. Основным условием является не превышение расчетных максимальных значений температур ядерного топлива, оболочки ТВЭЛ, тепловых потоков выше предельных значений, при которых начинается разрушение конструкции тепловыделяющего элемента. Предельные температуры для разного типа топлива и материала оболочки ТВЭЛ устанавливаются исходя из результатов, полученных при проведении многочисленных экспериментов, а также из опыта эксплуатации ядерной энергетической установки. Максимальные тепловые потоки не должны превышать критических значений, при которых наступает кризис теплоотдачи.

В расчетно-графической работе тепловой расчет выполняется для самого энергонапряженного ТВЭЛ в тепловыделяющей сборке (ТВС) для эскизного проекта легководного реактора типа PWR (Pressurized water reactor). Особенностью конструкции тепловыделяющей сборки для зарубежного легководного ядерного реактора является квадратная форма сечения ТВС.

Анализ надежности конструкции тепловыделяющего элемента в ТВС осуществляется на основе исследования влияния на температурное поле ТВЭЛ совокупности факторов, таких как: изменение расхода теплоносителя через ТВС, температуры и давления теплоносителя, величины тепловыделений с поверхности ТВЭЛ, использование разного вида ядерного топлива, влияние изменения теплопроводности ядерного топлива в зависимости от состава ядерного топлива и глубины выгорания, выбора конструкционных материалов ТВЭЛ, а также конструктивного исполнения самой тепловыделяющей сборки.

Для выполнения расчетно-графической работы «Тепловой расчет тепловыделяющей сборки реактора PWR» исходные данные приведены в индивидуальном задании, указанном в данном учебно-методическом пособии в Приложении 3, которое выбирается в соответствии с номером студента в журнале успеваемости.

В результате выполнения расчетно-графической работы у студента формируются следующие навыки: умение выполнять инженерные расчеты, анализировать полученные результаты и на основе их анализа самостоятельно делать выводы о допустимости эксплуатации ТВС в заданном режиме работы ядерной установки.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ АЭС С РЕАКТОРОМ PWR. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ РЕАКТОРА PWR

В России эксплуатируются водо-водяные реакторы под давлением (ВВЭР), за рубежом такой тип реактора называют Pressurized water reactor (PWR), к этому типу реакторов относится и разрабатываемый компанией Areva NP совместно с немецкой Siemens AG реактор EPR (European Pressurized Reactor). Основным монополистом поставки ядерного топлива для реакторов PWR является компания Westinghouse Electric. Крупнейшим производителем и поставщиком ядерного топлива как в России, так и за рубежом является Российская топливная компания ОАО «ТВЭЛ». Для увеличения объема сбыта своей продукции и создания здоровой конкуренции компании Westinghouse Electric на мировом рынке продаж ядерного топлива ОАО «ТВЭЛ» предложила свою разработку тепловыделяющей сборки (ТВС-КВАДРАТ) для реакторов PWR, созданную ОАО «ОКБМ Африкантов».

Основные проекты легководных реакторов, создаваемых ведущими фирмами атомного машиностроения США, Германии, Франции, Кореи, а также характеристики ТВС российского представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 - Проекты легководных реакторов и характеристики ТВС зарубежного и российского дизайна [1]

Тип	EPR Франция, Германия	PWR Фирмы Sie- mens (серия ЯР «Конвой»)	KNGR Корея	ТВС-квадрат для PWR АЭС "Ринг- хальс-3 (Швеция)
Электрическая мощность, МВт	1750	1371	1300	
Тепловая мощность, МВт	4900	3765	4000	
Давление теплоносителя, МПа	15,5	15,5	15,5	
Давление во 2 контуре, МПа	7,36	6,23	6,2	
Температура воды на входе в а.з., °С	293	291,3	291,1	
Температура воды на выходе из а.з. °С	330	326,1	323,9	
Количество циркуляционных петель	4	4	4	
Длина корпуса реактора, мм	13105		15280	
Внут. диаметр корпуса ЯР, мм	4870	4800	4630	
Эквивалентный диаметр а.з., м	3,8	3,605	3,65	
Скорость движения тн. в а.з., м/с	5,7	5,7	5,7	
Форма поперечного сечения ТВС	квадрат	квадрат	квадрат	квадрат
Размер ТВС «под ключ», мм	230	229	230	230
Высота ТВС, мм	4800		4127,5	
Шаг решетки твэлов, мм	12,6	12,7		
Число ТВС в а.з., шт	241	193	241	
Число ячеек в 1 ТВС, шт	289(17x17)	324(18x18)	256(16x16)	289(17x17)
Число твэлов в ТВС, шт	264	300	243	264
Число ПС в 1 ОРСУЗ, шт	24	23	12	24
Центральный канал, шт	1	1	1	1
Число твэгов в 1 ТВС, шт	6,16	4,8,12		
Число ДР в 1 ТВС, шт	9	10	9	
Высота активной зоны $H_{аз}$, мм	4200	3900	3810	
Наружный диаметр оболочки твэла/толщина оболочки твэла, мм	9,5/0,625	9,5/0,64	9,7/0,635	9,14/0,572
Материал оболочки твэла	(Zr-4)	(Zr-4)	(Zr-4)	цирконий
Максимальная температура оболочки, °С	355	352	352	352
Средняя (максимальная) линейная тепловая нагрузка твэла, кВт/м	17,86 (44,8)	16,0 (44,8)	18,14	
Среднее (максимальное) выгорание в ТВС, МВт·сут/кг	65 (72)	55(62)	60	
Вид топлива	UO ₂	UO ₂	UO ₂	UO ₂
Диаметр топливной таблетки, мм	7,844	7,844	7,844	7,844
Контактный зазор, заполненный гелием мм	0,157	0,157	0,157	0,157
Наружный диаметр направляющего канала, мм	12	12	12	12
Наружный диаметр центрального канала, мм	14	14	14	14

Тепловая схема АЭС с легководным реактором под давлением PWR, представленная на рис. 1, во многом схожа с тепловой схемой АЭС с реактором ВВЭР.

Схожим является использование двухконтурной тепловой схемы АЭС. Реакторная установка состоит из реактора и четырех циркуляционных петель, каждая из которых состоит из парогенератора, главного циркуляционного насоса, трубопровода. В одну из циркуляционных петель включен компенсатор давления.

Корпус для легководного водо-водяного реактора выполняется цилиндрической формы, содержит активную зону, набранную из ТВС, для управления реактивностью используется система управления и защиты, поддержание давления в первом контуре выполняет компенсатор давления.

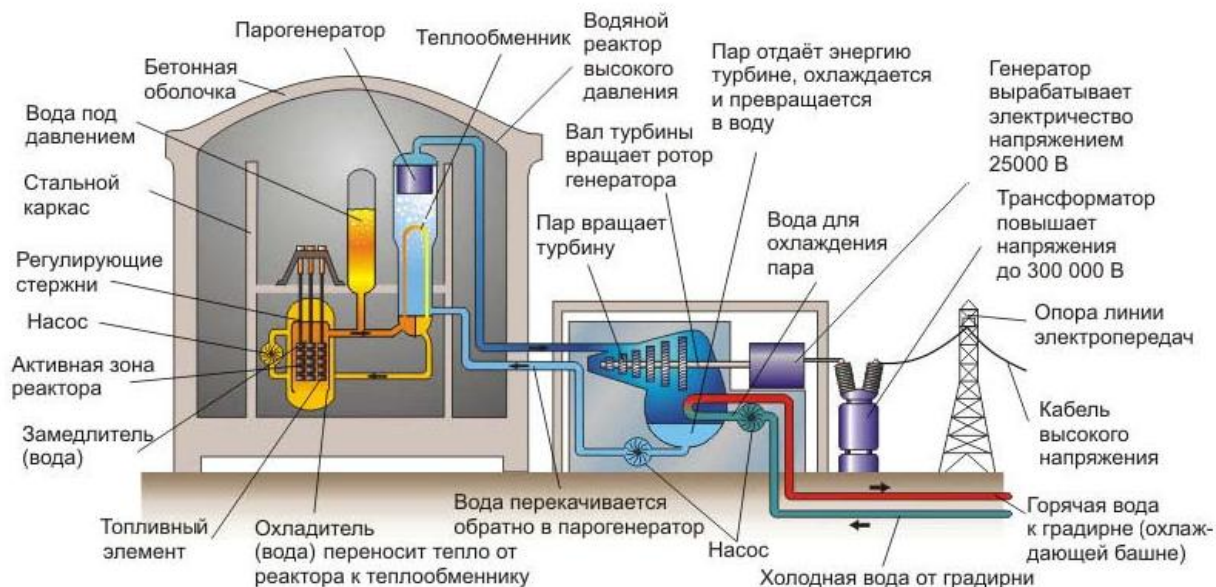


Рис. 1. Тепловая схема АЭС с легководным реактором под давлением PWR

Отличительной особенностью реактора PWR является компоновка активной зоны реактора, конструкторское исполнение тепловыделяющей сборки и тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ). Тепловыделяющие сборки для реакторов PWR выполняют квадратной формы сечения, материал оболочки циркониевый сплав Zircalloy-4 либо М5, ядерное топливо - диоксид урана либо мох-топливо, для реакторов ВВЭР тепловыделяющая сборка выполняется шестигранной формы, материалом для оболочки ТВЭЛ выбран циркониевый сплав Э-110, ядерное топливо - диоксид урана. Схема расположения ТВС в активной зоне реактора PWR представлена на рисунке 2. Кроме того, в реакторах PWR применяются парогенераторы вертикального типа.

Схема движения теплоносителя в 1 контуре следующая. Вода, поступающая в корпус реактора через четыре входных патрубка, движется вниз по кольцевому зазору между кожухом активной зоны и стенкой корпуса. Затем поток воды направляется вверх через активную зону и выходит из корпуса через четыре выходных патрубка, поступая соответственно в четыре парогенератора. Парогенераторы с вертикально расположенным корпусом разделены на две секции. В нижней секции расположена теплопередающая поверхность из U-образных труб выполненных из сплава с большим содержанием никеля: инконеля-600 (хрома-16%Cr, железа-7%Fe; никеля-77%Ni) или инколя-800 (хрома-20%Cr, железа-48%Fe; никеля-32%Ni). Теплообменные трубки заделаны в трубные доски, к которым приваривается сферическое днище, разделенное внутри

перегородкой на две части, образующие раздающую и собирающую камеры теплоносителя. К камерам приварены один входной и два выходных патрубка, а также патрубки люков-лазов. В верхней части парогенератора устанавливаются сепарационные устройства. Первая ступень сепарации образована сепараторами центробежного типа, вторая - жалюзийными сепараторами. Питательная вода подается в коллектор, расположенный над теплообменной поверхностью, из коллектора питательная вода подается в зазор между корпусом парогенератора и кожухом, трубного пучка. Опускаясь в низ, питательная вода, омывая трубный пучок теплообменной поверхности, нагревается до температуры насыщения и частично испаряется. Далее нагретый пароводяной поток проходит последовательно через два уровня сепарации и направляется по паропроводу на турбину.

В одной из петель установлен компенсатор давления, поддерживающий в контуре необходимое давление. Один паровой компенсатор давления обслуживает все четыре петли первого контура. Он служит для поддержания в первом контуре постоянного давления и компенсирует изменение объема теплоносителя при изменении нагрузки. Давление в компенсаторе и, следовательно, в 1-м контуре создается и регулируется паровой подушкой, заполняющей верхнюю часть сосуда. В случае снижения давления в реакторе включаются электронагреватели, которые подогревают воду в компенсаторе давления до температуры насыщения. При увеличении давления в реакторе включается система разбрызгивания воды, питающаяся водой из холодной нитки одной из петель контура. Холодная вода конденсирует пар в паровом компенсаторе давления, предотвращая срабатывание предохранительного клапана.

Активная зона набирается из тепловыделяющих сборок квадратной формы. В самих ТВС имеются ячейки, предназначенные для размещения тепловыделяющих элементов, ячейки под перемещение поглощающих элементов системы управления и защиты и центральный канал, на котором осуществляется крепление дистанционирующих решеток, обеспечивающих равное расположение между собой элементов, к направляющим каналам ТВС крепятся верхняя и нижняя часть конструкции ТВС.

Поглощающие элементы системы управления и защиты заполнены выгорающим поглотителем - карбидом бора.

Тепловыделяющие элементы цилиндрической формы в ТВС располагаются в узлах квадратной решетки упаковкой 14x14, 16x16, 17x17, 18x18 твэлов. Для примера на рисунке 3 представлена схема расположения конструктивных элементов ТВС с компоновкой твэлов 17x17 PWR. Общий вид конструкции ТВС представлен на рисунке 4.

В качестве материала оболочки твэлов применяется циркониевый сплав Zircalloy-4 (Zry-4) или усовершенствованный по своему химическому составу циркониевый сплав zirlo либо M5.

В качестве ядерного топлива используется диоксид урана UO_2 , также имеются в составе ТВС тепловыделяющие элементы, содержащие в ядерном топливе UO_2 поглотитель триоксид гадолиния Gd_2O_3 , такие твэлы сокращенно называют твэгами, используют для выравнивания тепловыделений по радиусу ТВС. Вместо диоксида урана в качестве ядерного топлива в твэлах может использоваться смешанное оксидное уран-плутониевое топливо ($UO_2 + PuO_2$), его еще называют MOX-топливом. Для выравнивания тепловыделений в объеме активной зоны применяются ТВС с разным обогащением топлива по ^{235}U от 2 % до 5 %, а также перемещение ТВС с разной глубиной выгорания топлива.

Использование MOX-топлива в водоохлаждаемых реакторах сопряжено с определенными трудностями. Во-первых, применение MOX-топлива в реакторах на лёгкой воде снижает эффективность материалов, предназначенных для поглощения нейтронов

в активной зоне, таких как стержни регулирования системы управления и защиты ядерного реактора и бора, растворённого в теплоносителе. Это затрудняет управление ядерной реакцией в активной зоне и снижает резерв, необходимый для безопасной остановки реактора в случае возникновения проблем. В то же время, "фракция запаздывающих нейтронов" - параметр, определяющий скорость, при которой уровень мощности реактора реагирует на изменение условий - снижается при использовании МОХ-топлива. Это означает не только снижение управляемости переходными процессами, но и сокращение времени, за которое оператор должен отреагировать на них.

Во-вторых, в присутствии МОХ-топлива в активной зоне повышается риск теплового удара высокого давления, поскольку увеличивается скорость снижения температуры. Это вызвано тем, что сразу после быстрого останова реактора теплота радиоактивного распада МОХ-топлива ниже, чем у низкообогащенного уранового топлива (диоксида урана с обогащением до 5 %). Анализ аварии с разрывом магистрального паропровода, проведенный фирмой Westinghouse, показывает, что температура снижается до диапазона, в котором тепловой удар высокого давления в случае активной зоны с частичным присутствием МОХ-топлива может произойти через шесть минут, в то время как с низкообогащенным урановым топливом температура до опасного диапазона не доходит.

МОХ-топливо также может стать причиной возрастания риска теплового удара высокого давления МОХ из-за ускоренного нейтронного охрупчивания корпуса высокого давления реактора, поскольку распад плутония-239 порождает большее количество "быстрых" нейтронов, обладающих более высокой вероятностью выхода из активной зоны, чем при распаде урана-235. Попытка операторов решить проблему, переставляя ТВС с МОХ-топливом подальше от корпуса реактора (т.е. ближе к центру активной зоны), создает значительную неравномерность тепловыделений и всплеск нейтронного потока, поскольку у центра активной зоны плотность потока нейтронов выше.

Кроме того, температура МОХ-топлива в центре топливных таблеток при одинаковых условиях эксплуатации примерно на 50 °С выше, чем у низкообогащенного уранового топлива. В результате скорость коррозии оболочки на начальных этапах аварий с потерей теплоносителя для МОХ-топлива выше и для предотвращения разрушения топлива и плавления активной зоны может потребоваться система безопасности с более высоким быстрым действием.

Диоксид урана UO_2 в настоящее время является самым распространенным и хорошо освоенным в промышленном производстве видом керамического ядерного топлива, используемого на АЭС. Это топливо применяется почти во всех современных водоохлаждаемых реакторах, включая кипящие и тяжеловодные, а также реакторы, работающие на быстром спектре нейтронов.

Его достоинством является: высокая температура плавления (около 2850 °С); не имеет фазовых переходов в интервале рабочих температур ядерной установки; менее подвержен газовому набуханию, чем металлический уран и его сплавы; химическая устойчивость в широком диапазоне температур по отношению к веществам, которые применяются в качестве замедлителей и теплоносителей (вода, водяной пар, углекислый газ, жидкий натрий); не взаимодействует с большинством конструкционных материалов (нержавеющей сталью, цирконием, ниобием, алюминием, медью, молибденом и др.) при высоких температурах, возможность получения высокой плотности таблеток (выше 95 % теоретической), что позволяет обеспечить хорошее удержание газообразных продуктов деления в топливной таблетке; высокая радиационная стойкость.

Недостатками использования диоксида урана являются: низкая теплопроводность, которая резко снижается с увеличением температуры топлива, что приводит к

значительным перепадам температур между центром и поверхностью топливной таблетки и может привести к растрескиванию и деформациям топливной таблетки и твэла.

Для сравнения теоретическая плотность ядерного топлива для диоксида урана $\text{UO}_2 = 10,97 \text{ г/см}^3$, содержание атомов в единице объема топлива $2,44 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3$, теоретическая плотность ядерного топлива для оксида плутония $\text{PuO}_2 = 11,46 \text{ г/см}^3$, содержание атомов в единице объема топлива $2,54 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3$.

Ядерное топливо ($\text{UO}_2 + \text{Gd}_2\text{O}_3$). Введение выгорающего поглотителя в виде окиси гадолиния (Gd_2O_3) непосредственно в топливные таблетки избавляет от ограничений, связанных с размещением органов регулирования, не уменьшает количество твэлов в активной зоне, следовательно, не увеличивает линейное энерговыделение твэлов и тем самым экономится полезное место в тепловыделяющих сборках, уменьшается паразитное поглощение тепловых нейтронов, отпадает необходимость извлечения твэгов из облученных ТВС. Гадолиний имеет высокое поперечное сечение захвата нейтронов и не вызывает образования нежелательных дочерних продуктов, обладает хорошей совместимостью с UO_2 . Добавка сильного выгорающего поглотителя Gd_2O_3 обеспечивает компенсацию начального избытка реактивности, уменьшение концентрации борной кислоты и позволяет осуществить прогнозируемое улучшение потенциальных характеристик энерговыделения в течение всей кампании. Однако наличие выгорающего поглотителя в топливной матрице приводит к снижению её теплопроводности, может привести к значительным деформациям топливной таблетки – всё это накладывает ограничения на предельные тепловые потоки.

В качестве материалов конструкции твэлов в реакторах на тепловых нейтронах используются сплавы циркония. Их применение обусловлено, прежде всего, низким сечением поглощения нейтронов. Исторически сложилось так, что базовым материалом для изготовления оболочек твэлов в водо-водяных реакторах под давлением отечественного реакторостроения стал циркониевый сплав с добавкой ниобия Zr-Nb (сплавы Э110, Э125), в то время как за рубежом получили распространение сплавы, основанные на легировании циркония оловом - циркалой (Zry-2 и Zry-4).

Работоспособность конструктивных элементов активных зон легководных реакторов ограничивается коррозией сплавов, их радиационным ростом и ползучестью. Коррозия циркониевых сплавов в воде, паре или пароводяной смеси заключается в окислении оболочки твэла и наводороживанию, что, в конечном счёте, приводит к охрупчиванию и разрушению оболочки твэла. Предельная эксплуатационная температура оболочки твэла, выполненная из циркониевого сплава, при которой сохраняются её прочностные характеристики составляет 355°C .

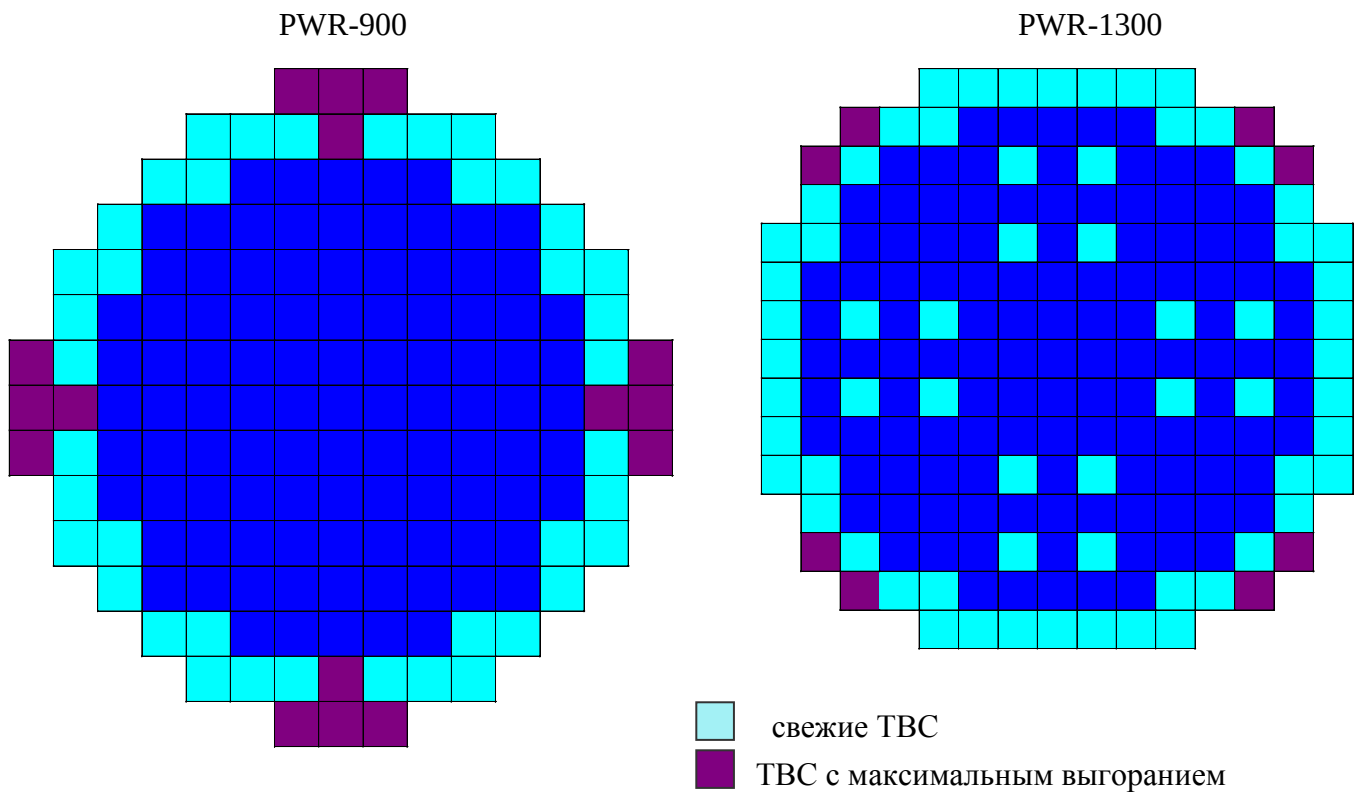


Рис. 2. Схема расположения ТВС в активной зоне реактора PWR электрической мощностью 900 МВт и 1300 МВт

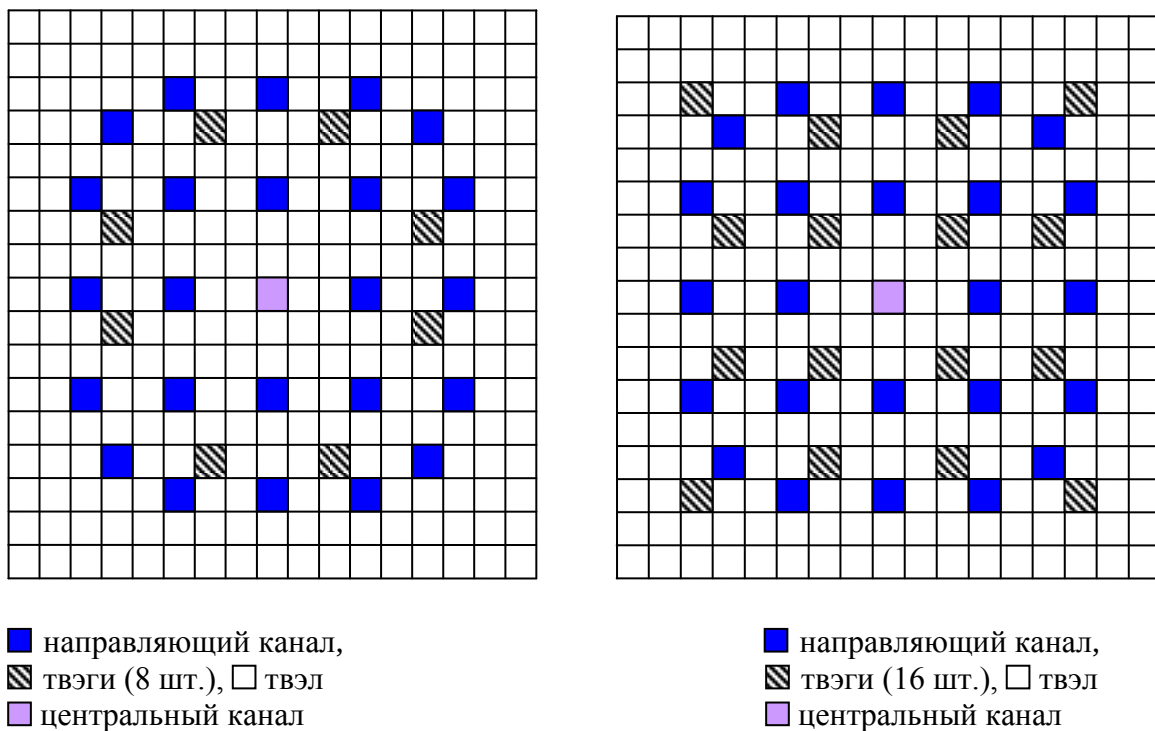


Рис. 3. Схема расположения конструктивных элементов ТВС с компоновкой твэлов 17x17 PWR

В тепловыделяющей сборке возможно размещение перемешивающих решеток, обеспечивающих дополнительный отвод тепла с поверхности твэл за счет создания турбулизации водного пограничного слоя. Недостатком решеток является значительные гидравлические сопротивления, обусловленные сложной конструкцией самой решетки и возникновением дополнительных местных сопротивлений за счет создаваемых вихреобразований в местах преодоления препятствий потоком теплоносителя. Существует огромное количество модификаций перемешивающих решеток, на рис. 5 представлены всего два вида из множества существующих перемешивающих решеток зарубежного исполнения, на рисунке 6 представлены перемешивающие решетки, созданные для тепловыделяющей сборки ТВС-КВАДРАТ российского производства.

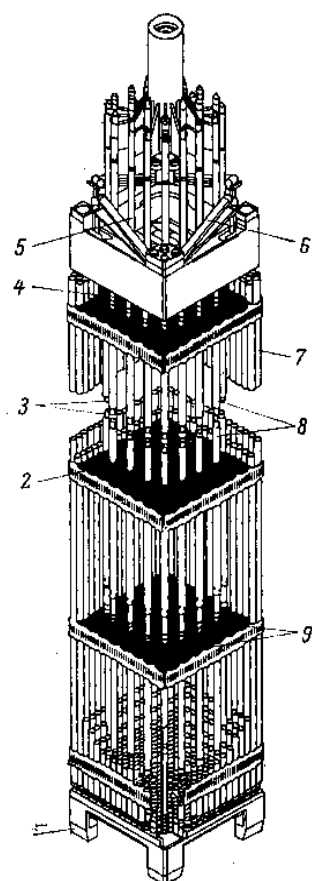
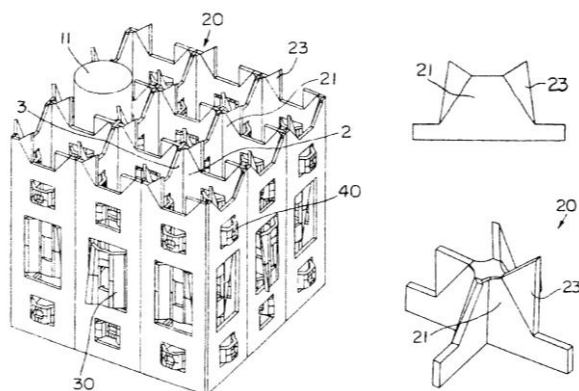
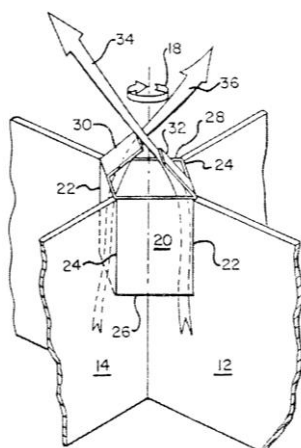


Рис. 4. Топливная сборка PWR
с пучком регулирующих стержней:

- 1 — нижний концевик;
- 2 — дистанционирующая решетка;
- 3 — регулирующий стержень;
- 4 — верхний концевик;
- 5 — пучок регулирующих стержней;
- 6 — прижимная пружина;
- 7 — твэл;
- 8 — направляющая труба регулирующего стержня;
- 9 — интенсификатор теплообмена.



б)



а)

Рис. 5. Модификации перемешивающей решетки
зарубежного исполнения:

- а) вид сбоку и слева - элемент перемешивающей решетки с дефлектором коробчатого типа с взаимнопересекающимися полосами, создающими вихреобразное движение потока теплоносителя
- б) вид сверху - часть дистанционирующей решетки с диффлекторами; справа - заготовка дефлектора с двумя лопатками и дефлектор с четырьмя отогнутыми лопатками в верхней и нижней частях соответственно

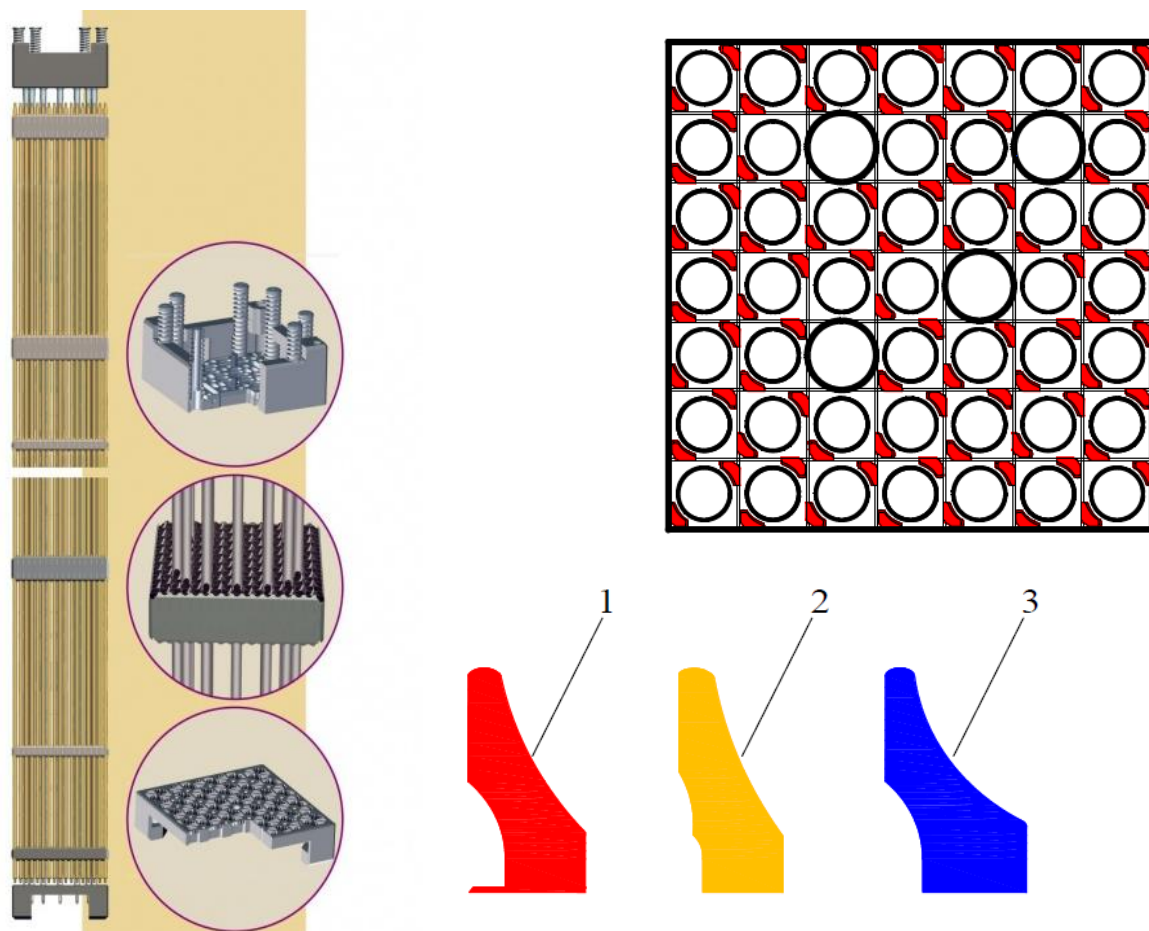


Рис. 6. Конструкция ТВС-КВАДРАТ (слева) российского производства, конструкция перемешивающей дистанционирующей решетки (справа сверху), тип диффлектора перемешивающей решетки (справа внизу):
1 – прямой гиб; 2 – косой гиб; 3 – обратный гиб

ТВС-КВАДРАТ – это тепловыделяющая сборка российского производства, созданная ОАО «ОКБМ Африкантов» квадратного сечения 17х17 рядов твэлов длиной 12 футов (фут-30,48см) для реакторов PWR, разработанная для использования в 3-х и 4-х петлевых реакторах дизайна Westinghouse. Тепловая мощность одной ТВС-КВАДРАТ составляет 20,1 МВт, масса ядерного топлива 527,5 кг, срок службы 6 лет. В основе конструкции ТВС-КВАДРАТ заложен многолетний опыт разработки, изготовления и эксплуатации ядерного топлива в реакторах ВВЭР-1000.

В качестве ядерного топлива рассматривается использование диоксида урана (на сегодняшний день используется топливо из диоксида урана с обогащением по U-235 до 5 % с добавкой выгорающего поглотителя гадолиния), а в дальнейшем смешанного топлива – смесь уранового и плутониевого топлива. В качестве материала для оболочки твэла выбран циркониевый сплав, несколько отличающийся по химическому составу от циркониевого сплава (циркалоя), который используется в оригинальных конструкциях ТВС PWR зарубежного исполнения.

В ТВС-КВАДРАТ используются более простые по конфигурации перемешивающие решетки, что выгодно отличает их от конструкции перемешивающих решеток

зарубежного дизайна. Их простота даёт выигрыш в меньших значениях гидравлических сопротивлений, а конфигурация и расположение турбулизирующих элементов решетки позволяет более эффективно создавать закрутку потока теплоносителя вокруг твэла и тем самым обеспечить эффективный отвод тепла с теплоотдающей поверхности

На рис. 6 показана одна из модификаций перемешивающей решетки, разработанной ОАО «ОКБМ Африкантов» специально для ТВС-КВАДРАТ.

В основе конструкции ТВС-КВАДРАТ специалистами АО «ОКБМ Африкантов» были использованы апробированные решения по каркасу и дистанционирующим решеткам, получившие распространение для ТВС реакторов ВВЭР. Так же в конструкции ТВС-КВАДРАТ предусмотрено наличие перемешивающих дистанционирующих решеток и дополнительно устанавливаемых перемешивающих решеток, которые имеют дефлекторы, выступающие в роли турбулизаторов потока теплоносителя и интенсификаторов теплообмена. Использование подобных элементов направлено на решение ряда вопросов, а именно: снизить неравномерности теплогидравлических характеристик теплоносителя; выравнять температуру (энтальпию) теплоносителя по поперечному сечению сборки; повысить запас до кризиса теплоотдачи. Благодаря этому становится возможным повышение критического теплового потока в активной зоне и, следовательно, увеличение удельной тепловой мощности реактора.

В ТВС-КВАДРАТ реакторов PWR применяются пластинчатые решетки, снабженные дефлекторами типа split vane, позволяющими одновременно создать круговые поперечные течения теплоносителя вокруг твэлов и закрутку потока в межтвэльном пространстве. Пояс перемешивающей дистанционирующей решетки представляет собой пластинчатые решетки, состоящие из взаимно перпендикулярных рядов пластин и восьмигранных ячеек, выполняющих функцию дистанционирования твэлов. К верхним кромкам пластин в местах их пересечения приварены дефлекторы различного конструктивного исполнения по типу split vane. Особое значение имеет форма дефлектора и выбор угла его отгиба относительно осевого направления движения теплоносителя, так как эти факторы в значительной степени влияют на гидравлическое сопротивление сборки.

Таким образом, варианты исполнения перемешивающих решеток для ТВС-КВАДРАТ требуют поиска оптимального конструктивного решения, которое благоприятнейшим образом сказывалось на сочетании таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

2. РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ ПО ВЫСОТЕ ТВЭЛ

Изменения плотности потока тепловых нейтронов по радиусу активной зоны в реакторе описываются функцией Бесселя первого рода нулевого порядка, по высоте активной зоны - по косинусоидальному закону. В связи с тем, что размеры активной зоны конечны, отмечается значительная неравномерность нейтронного поля, обусловленная утечкой нейтронов, при этом максимальная плотность нейтронов достигается в центре активной зоны и постепенно снижается к периферии. Максимальная плотность потока нейтронов в активной зоне реактора ограничивается возможностями теплоотвода, а также обеспечением требований прочности материалов тепловыделяющего элемента.

Поскольку распределение тепловыделений пропорционально изменению плотности тепловых нейтронов в активной зоне как по радиусу, так и по высоте активной зоны, то и распределение тепловыделений по высоте активной зоны реактора будет изменяться по закону косинуса.

Изменение расчётной линейной тепловой нагрузки по высоте активной зоны

Удельное тепловыделение, приходящееся на единицу длины твэла, меняется по высоте активной зоны реактора и равно для средненагруженного твэла:

$$q_l \text{ [Вт/м]} = \frac{Q_p \cdot K_H}{n_{\text{мгз}} \cdot n_{\text{мвс}} \cdot H_{\text{аз}}} \cdot \cos \frac{\pi \cdot (z)}{H_{\text{з}}}, \text{ кВт/м} \quad (2.1)$$

где $K_H = 1,3 \dots 1,38$ - коэффициент неравномерности тепловыделений по высоте активной зоны.

$H_z = H_{\text{аз}} + 2 \cdot 0,1$ - экстраполированная высота активной зоны, м.

Расчет температурного поля твэла ведется по соответствующим координатам (z): $-H_{\text{аз}}/2$; $-H_{\text{аз}}/3$; $-H_{\text{аз}}/6$; $-H_{\text{аз}}/8$; $-H_{\text{аз}}/10$; 0; $H_{\text{аз}}/10$; $H_{\text{аз}}/8$; $H_{\text{аз}}/6$; $H_{\text{аз}}/3$; $H_{\text{аз}}/2$.

Изменение максимальной линейной тепловой нагрузки по высоте активной зоны:

$$q_l^{\text{м}} \text{ [Вт/м]} = q_l(z) \cdot K_R \cdot K_r \cdot K_q \cdot K_c, \text{ кВт/м} \quad (2.2)$$

$K_R = 1,1 \dots 1,17$ - коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны;

$K_r = 1,05 \dots 1,1$ - коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу ТВС;

$K_q = 1,1$ - коэффициент случайных отклонений теплотехнических параметров от их номинальных значений;

$K_c = 1,05$ - коэффициент, учитывающий случайные отклонения параметров, влияющих на термическое сопротивление теплоотдачи и теплопроводности.

Результаты вычислений сводятся в табл. 2.1. По рассчитанным значениям строятся графики изменения расчётной линейной $q_l(z)$ и максимальной $q_l^{\text{м}}(z)$ тепловой нагрузки по высоте активной зоны. Пример построения представлен на рис. 1 (прил. 1).

Таблица 2.1 - Результаты расчёта расчётной и максимальной линейной тепловой нагрузки

z, м	$q_l(z)$, кВт/м	$q_l^{\text{м}}(z)$, кВт/м

Обеспечение целостности конструкции твэла определяется условием соблюдения требования - максимальная линейная тепловая нагрузка не должна превышать предельно допустимых значений. Именно величина тепловыделений и условия теплоотвода определяют температуру топлива и оболочки твэла.

3. РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПО ВЫСОТЕ ТВС

Распределение температуры теплоносителя по высоте активной зоны реактора рассматривается для случая установившегося теплового режима работы наиболее теплонапряжённой (центральной) ТВС.

Расчёт изменения температуры теплоносителя по высоте активной зоны:

$$t_{mn}(z) = t_{ax} + \frac{\Delta t_{mn}}{2} \cdot \left(1 + \frac{\sin \frac{\pi \cdot z}{H_{\text{з}}}}{\sin \frac{\pi \cdot H_{\text{аз}}}{2 \cdot H_{\text{з}}}} \right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.1)$$

Расчёт максимальной температуры теплоносителя по высоте активной зоны:

$$t_{mn}^M(z) = t_{ax} + \frac{\Delta t_{mn} \cdot K_R \cdot K_{\Delta t}}{2} \cdot \left(1 + \frac{\sin \frac{\pi \cdot (z)}{H_{\text{з}}}}{\sin \frac{\pi \cdot H_{\text{аз}}}{2 \cdot H_{\text{з}}}} \right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

где $K_{\Delta t} = 1,04$ - коэффициент, учитывающий влияние условий охлаждения ТВЭЛОВ, допуски при изготовлении, неточности расчета и другие отклонения; $K_R = 1,1 \dots 1,17$ - коэффициент неравномерности тепловыделений по радиусу активной зоны;

$\Delta t_{mn} = t_{\text{вых}} - t_{\text{ax}}$ - нагрев теплоносителя в активной зоне, $^\circ\text{C}$.

Задаваясь значениями z , рассчитываются температуры теплоносителя по высоте активной зоны, $t_{\text{тн}}(z)$ и $t_{\text{тн}}^{\text{max}}(z)$, результаты вычислений сводятся в табл.3.1. По рассчитанным значениям строятся графики изменения температуры теплоносителя по высоте ТВС. Пример построения представлен на рис. 2 (прил. 1).

Таблица 3.1 – Результаты расчёта температуры теплоносителя по высоте ТВС

$z, \text{ м}$	$t_{mn}(z), \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_{mn}^M(z), \text{ } ^\circ\text{C}$

По высоте активной зоны температура теплоносителя растёт, но с разным темпом. Темп изменения температуры теплоносителя зависит от характера изменения тепловыделений по высоте активной зоны. Максимальная температура теплоносителя в водоохлаждаемых реакторах под давлением должна быть меньше температуры насыщения, при этом должен обеспечиваться запас до кипения.

4. РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ

Передача тепла от тепловыделяющего элемента к ядру потока осуществляется через пограничный слой за счёт конвективного теплообмена. Существенное влияние на интенсивность конвективного теплообмена в пограничном слое оказывают режим течения теплоносителя и его агрегатное состояние. В пограничном слое наблюдается ламинарный режим течения теплоносителя, а в ядре потока – турбулентный.

Для оценки интенсивности теплообмена вводится коэффициент теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене зависит от теплофизических свойств теплоносителя, режима течения теплоносителя, геометрии канала.

Коэффициент теплоотдачи при охлаждении ТВЭЛ однофазным потоком при конвективном теплообмене определяется:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_g} \cdot Nu, \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{°C)} \quad (4.1)$$

где d_g - эквивалентный диаметр, м; $\lambda(z)$ - теплопроводность теплоносителя, кВт/(м · °C); $Nu(z)$ - число Нуссельта.

С учетом знаний количества и диаметра каждого конструкционного элемента конструкции ТВС, эквивалентный диаметр может быть рассчитан по формуле:

$$d_g = \frac{4 \cdot S_{mn}}{\Pi_{cm}}, \text{ м} \quad (4.2)$$

где Π_{cm} - смоченный периметр, м; S_{mn} - площадь проходного сечения теплоносителя в ТВС, м².

Площадь поперечного сечения для прохода теплоносителя при течении потока в ТВС с квадратной решеткой:

$$S_{mn} = a^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d_{твэ}^2 \cdot n_{твэ} + d_p^2 \cdot n_p + d_{ц}^2, \text{ м}^2 \quad (4.3)$$

a - внутренняя сторона обечайки ТВС, м; $d_{твэ}$, $n_{твэ}$ - наружный диаметр (м) и количество ТВЭЛов (шт.) в ТВС; d_p , n_p - наружный диаметр (м) и количество ячеек под поглощающие элементы системы управления и защиты ядерного реактора (шт.), $d_{ц}$ - наружный диаметр центрального канала (м).

Смоченный периметр для бесчехловой четырёхгранной ТВС

Смоченный периметр Π_{cm} - это сумма периметров всех конструктивных элементов, входящих в конструкцию ТВС омываемых теплоносителем.

$$\Pi_{cm} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{твэ} \cdot n_{твэ} + d_p \cdot n_p + d_{ц}, \quad (4.4)$$

где $d_{твэ}$, $n_{твэ}$ - наружный диаметр (м) и количество ТВЭЛов (шт.) в ТВС; d_p , n_p - наружный диаметр (м) и количество ячеек под поглощающие элементы системы управления и защиты ядерного реактора (шт.), $d_{ц}$ - наружный диаметр центрального канала (м).

Нахождение числа Нуссельта

Число Нуссельта Nu зависит от свойств и условий движения потока теплоносителя, определяется по формуле:

$$Nu(z) = C \cdot Re^{0,8}(z) \cdot Pr^{0,4}(z), \quad (4.5)$$

где $C = 0,0165 + 0,02[1 - 0,91/(s/d)^2 \cdot (s/d)^{0,15}]$, $s/d_{твэ} = 1,1 \div 1,8$ - относительный шаг расположения стержней; $Pr = 0,7 \div 20$; $Re = 10^3 \div 5 \cdot 10^5$, где s - шаг расположения ТВЭЛов в решетке, мм, $d_{твэ}$ - наружный диаметр ТВЭЛ, мм.

Расчёт числа Рейнольдса выполняется по формуле

$$\text{Re}(z) = \frac{\omega(z) \cdot d_z}{\nu(z)} = \frac{\omega(z) \cdot \rho(z) \cdot d_z}{\mu(z)} = \frac{4G_{\text{ТВС}}}{\mu(z) \cdot \Pi_{\text{см}}}, \quad (4.6)$$

где $\omega(z) = \frac{G_{\text{ТВС}}}{\rho(z) \cdot S_{\text{мн}}}$ - скорость движения теплоносителя через ТВС, м/с;

где $G_{\text{ТВС}} = \frac{Q_p \cdot \psi_{\text{аз}}}{h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}} \cdot n_{\text{твс}}}$ - расход теплоносителя через одну ТВС, кг/с; Q_p - тепловая

мощность реактора, кВт; $\psi_{\text{аз}} = 0,97 \dots 0,99$ - доля тепла, выделяемая в активной зоне ЯР; $h_{\text{вх}}, h_{\text{вых}}$ - энтальпии теплоносителя на входе и выходе из активной зоны ядерного реактора; определяются по заданным давлению и температуре теплоносителя, $h_{\text{вых}} = f(p; t_{\text{вых}})$; $h_{\text{вх}} = f(p; t_{\text{вх}})$, кДж/кг; $n_{\text{твс}}$ - количество ТВС в активной зоне, шт; $\mu(z) = \nu(z) \cdot \rho(z)$ - коэффициент динамической вязкости, (Н·с/м²), (Па·с), где $\nu(z)$ - коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, м²/с; $\rho(z)$ - плотность теплоносителя, определяемая по формуле $\rho(z) = 1/\nu(z)$, кг/м³, где $\nu(z)$ - удельный объём теплоносителя, м³/кг.

Определение числа Прандтля

Число Прандтля определяется с помощью программы WaterSteamPro по давлению и температуре теплоносителя, либо рассчитывается по формуле:

$$\text{Pr}(z) = \frac{\mu(z) \cdot C_p(z)}{\lambda(z)}. \quad (4.7)$$

Все теплофизические характеристики воды: удельный объём ν , динамическая вязкость μ , удельная изобарная теплоемкость C_p , теплопроводность λ , определяются в рассматриваемом сечении z по давлению и температуре воды из соответствующих таблиц [1], [2], [3], [4] (прил. 2) или с помощью программы WaterSteamPro.

Таблица 4.1 - Численные значения теплофизических свойств теплоносителя

z, м	$t_{\text{мн}}(z)$, °C	$t_{\text{мн}}^{\text{м}}(z)$, °C	$\mu(z)$, Па·с	$\mu^{\text{м}}(z)$, Па·с	$\lambda(z)$, кВт/(м·°C)	$\lambda^{\text{м}}(z)$, кВт/(м·°C)	$C_p(z)$, кДж/(кг·°C)	$C_p^{\text{м}}(z)$, кДж/(кг·°C)

Таблица 4.2 - Значения числа Прандтля $\text{Pr}(z)$, Рейнольдса $\text{Re}(z)$, Нуссельта $\text{Nu}(z)$

для расчета коэффициента теплоотдачи $\alpha(z)$, кВт/м²·°C

z, м	$\text{Re}(z)$	$\text{Re}^{\text{м}}(z)$	$\text{Pr}(z)$	$\text{Pr}^{\text{м}}(z)$	$\text{Nu}(z)$	$\text{Nu}^{\text{м}}(z)$	$\alpha(z)$	$\alpha^{\text{м}}(z)$

Расчёт коэффициента теплоотдачи $\alpha(z)$ ведётся при температурах воды, рассчитанных по формуле (3.1), расчёт коэффициента теплоотдачи $\alpha^{\text{м}}(z)$ - при температурах воды, рассчитанных по формуле (3.2) для каждого сечения в отдельности.

5. РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБОЛОЧКЕ ТВЭЛА

Для оценки температурного поля твэла необходимо знать: мощность одного твэла, удельные линейные тепловыделения в его сечениях по высоте, расход теплоносителя, приходящийся на один твэл, геометрические размеры твэла и теплофизические свойства материалов твэла и теплоносителя в сечениях по высоте.

Расчёт температур наружной поверхности оболочки твэла по высоте

$$t_{об}^n(z) = t_{mn}(z) + R_{\alpha}(z) \cdot q_l(z), \quad ^\circ\text{C}, \quad (5.1)$$

где $t_{mn}(z)$ - температуры теплоносителя, $^\circ\text{C}$;

$R_{\alpha}(z)$ - термическое сопротивление теплоотдачи, $(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт}$;

$q_l(z)$ - линейная тепловая нагрузка в сечении z , кВт/м .

Термическое сопротивление теплоотдачи

$$R_{\alpha}(z) = \frac{1}{\alpha(z) \cdot \Pi_{об}}, \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт}, \quad (5.2)$$

где $\Pi_{об} = d_{мвэ} \cdot \pi$ - обогреваемый периметр одного твэла, м.

$d_{мвэ}$ - наружный диаметр твэла, м;

$\alpha(z)$ - коэффициент теплоотдачи от оболочки твэла к теплоносителю, $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Расчёт температуры внутренней поверхности оболочки твэла

$$t_{об}^в(z) = t_{mn}(z) + R_{\alpha}(z) + R_{\lambda об}(z) \cdot q_l(z), \quad ^\circ\text{C}, \quad (5.3)$$

где $R_{\lambda об}(z)$ - термическое сопротивление теплопроводности оболочки твэла, $(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт}$.

Величина термического сопротивления теплопроводности оболочки твэла

$$R_{\lambda об} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{об}(z)} \cdot \ln \frac{d_n}{d_{вн}} \quad (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})/\text{кВт}, \quad (5.4)$$

где $\lambda_{об}(z)$ - коэффициент теплопроводности материала оболочки в сечении z , $\text{кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

$d_n = d_{мвэ}$ - наружный диаметр оболочки твэла, м;

$d_{вн} = (d_{мвэ} - 2\delta_{об})$ - внутренний диаметр оболочки твэла, м;

$\delta_{об}$ - толщина оболочки твэла, м.

Нахождение коэффициента теплопроводности для материала оболочки твэла российского производства, изготовленной из циркониевого сплава Э-110 [2]

$$\lambda \approx 23,5 - 0,0192 \cdot T(z) + 1,68 \cdot 10^{-5} \cdot T(z)^2, \quad \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) \quad (5.5)$$

где $T = t_{об}^n(z) + 273,15$ - температура наружной оболочки твэла, К.

Нахождение коэффициента теплопроводности для материала оболочки твэла зарубежного производства, изготовленной из циркалоя-4 для реактора PWR
Теплопроводность циркалоя-4 MATPRO при температурах в диапазоне от комнатной до температуры плавления:

$$\lambda_{\text{циркалой-4}} = 7,51 + 2,09 \cdot 10^{-2} T - 1,45 \cdot 10^{-5} T^2 + 7,67 \cdot 10^{-9} T^3, \quad \text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К} \quad (5.6)$$

где $T = t_{об}^n(z) + 273,15$ - температура наружной оболочки твэла, К.

Для определения максимальной температуры оболочки на наружной и внутренней поверхности твэла в наиболее нагруженной ТВС в формулы (5.1 - 5.6) подставляются значения температуры теплоносителя, термические сопротивления теплоотдачи, термические сопротивления оболочки твэла, линейная тепловая нагрузка, рассчитанные с учётом всех неблагоприятных условий эксплуатации ТВС. Эти условия учитываются коэффициентами неравномерности тепловыделений, коэффициентами случайных отклонений конструкционных и эксплуатационных параметров от их номинальных значений, а так же погрешность самих расчётных формул.

Числовые значения температуры внутренней и наружной поверхности оболочки твэла при расчётной линейной тепловой нагрузке сводятся в табл. 5.1, рассчитанные при максимальной линейной тепловой нагрузке в табл. 5.2. По рассчитанным значениям строятся графики изменения температуры наружной и внутренней поверхности оболочки твэла, которые представлены на рис. 3 (прил. 1).

Таблица 5.1 - Числовые значения температуры внутренней и наружной поверхности оболочек твэла при расчётных значениях линейной тепловой нагрузки

$z, \text{ м}$	$q_l \text{ (} \text{ } \text{)} \text{,}$ кВт/м	$t_{mn}(z),$ °C	$\alpha \text{ (} \text{ } \text{)} \text{,}$ кВт/(м ² ·°C)	$R\alpha(z),$ (м·°C)/кВт	$t_{об}^n \text{ (} \text{ } \text{)} \text{,}$ °C	$\lambda_{об}(z),$ кВт/(м·K)	$R_{\lambda_{об}}(z),$ (м·°C)/кВт	$t_{об}^{en} \text{ (} \text{ } \text{)} \text{,}$ °C

Таблица 5.2 - Числовые значения температуры внутренней и наружной оболочек твэла при максимальных значениях линейной тепловой нагрузки

$z, \text{ м}$	$q_l^m \text{ (} \text{ } \text{)} \text{,}$ кВт/м	$t_{mn}^m(z),$ °C	$\alpha^m \text{ (} \text{ } \text{)} \text{,}$ кВт/(м ² ·°C)	$R\alpha^m(z),$ (м·°C)/кВт	$t_{об}^{n,m} \text{ (} \text{ } \text{)} \text{,}$ °C	$\lambda_{об}(z),$ кВт/(м·K)	$R_{\lambda_{об}}^m(z),$ (м·°C)/кВт	$t_{об}^{en,m} \text{ (} \text{ } \text{)} \text{,}$ °C

Характер изменения температуры наружной и внутренней поверхности оболочки твэла следует закону распределения тепловыделения и зависит от условий охлаждения твэла. Сначала температура наружной и внутренней поверхности оболочки твэла увеличивается, достигая максимальных значений, а затем уменьшается. Максимум температур оболочки твэла лежит выше центра активной зоны, это объясняется взаимным влиянием изменения удельных тепловыделений и температуры теплоносителя по высоте активной зоны, величины термических сопротивлений коэффициента теплоотдачи и самого материала оболочки твэла.

По условию теплотехнической надёжности активной зоны максимальная температура наружной оболочки твэла должна быть меньше предельно допустимой температуры для данного материала оболочки твэла. Температура внутренней поверхности оболочки твэла должна быть меньше температуры взаимодействия материала оболочки с топливом.

6. РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Определение температуры наружной поверхности топливной таблетки

$$t_{мон}^H(z) = t_{об}^{вн}(z) + R_{\lambda_3}(z) \cdot q_l(z) \text{ или} \\ t_{мон}^H(z) = t_{ин}(z) + R_{\alpha}(z) + R_{\lambda_{об}}(z) + R_{\lambda_3}(z) \cdot q_l(z), \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (6.1)$$

Определение термического сопротивления газового зазора

$$R_{\lambda_3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_{вн}}{d_{мон}} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_3} \cdot \frac{\delta_3}{r_3}, \text{ (м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C) / кВт}, \quad (6.2)$$

где λ_3 - теплопроводность газового зазора, Вт/(м · °C) ;

$d_{мон} = d_{твэ} - 2(\delta_{об} + \delta_3)$ - диаметр таблетки ядерного топлива, м;

$d_{твэ}$ - наружный диаметр твэла, м;

$\delta_{об}$, δ_3 - толщина оболочки твэла и газового зазора, м;

$r_3 = (d_{вн} - \delta_3) / 2$ - средний радиус зазора, м;

$d_{вн}$ - внутренний диаметр оболочки твэла, м.

Толщина зазора между топливом и оболочкой твэла принимается с учётом температурных расширений топлива в твэле в процессе эксплуатации ядерного реактора. Зазор заполняют гелием, обладающим по сравнению с другими газами наибольшей теплопроводностью, данное свойство используется для передачи тепла от топливной таблетки к оболочке.

Значения коэффициента теплопроводности гелия при давлении 2 МПа в зависимости от изменения температуры можно определить по формуле

$$\lambda_{He} \approx 0,146 + 3,339 \cdot 10^{-4} \cdot t_{вн.об}(z) - 4,219 \cdot 10^{-8} \cdot t_{вн.об}(z)^2, \text{ Вт/(м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)}, \quad (6.3)$$

где $t_{вн.об}$ - температура оболочки на внутренней поверхности твэла, °C.

Определение температуры в центре топливной таблетки

$$t_{мон}^{вн}(z) = t_{мон}^H(z) + R_{\lambda_{мон}}(z) \cdot q_l(z) \text{ или} \\ t_{мон}^{вн}(z) = t_{ин}(z) + R_{\alpha}(z) + R_{\lambda_{об}}(z) + R_{\lambda_3}(z) + R_{\lambda_{мон}}(z) \cdot q_l(z), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.4)$$

Термическое сопротивление теплопроводности топлива без отверстия

$$R_{\lambda_{мон}}(z) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{мон}(z)}, \text{ (м} \cdot \text{ } ^\circ\text{C) / кВт} \quad (6.5)$$

где $\lambda_{мон}$ - теплопроводность ядерного топлива, кВт / (м · °C), которая зависит от теплопроводности ядерного топлива с учетом изменения его температуры, плотности, стехиометрического состава топлива, технологии изготовления и глубины выгорания.

Определение теплопроводности топлива из диоксида урана с учетом его выгорания [2]

$$\lambda_{UO_2} = [0,1148 + 0,0035 \cdot B + 2,475 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 0,00333 \cdot B) \cdot t]^{-1} + 0,0132 \cdot \exp(0,00188 \cdot t) \quad (6.6)$$

где $t = t_{н.топ}$ - локальная температура топлива на поверхности топливной таблетки, °C; B - глубина выгорания топлива в (МВт·сут)/кг до 75 (МВт·сут)/кг, λ - теплопроводность топлива, Вт/(м · °C).

Определение коэффициента теплопроводности топлива для (UO₂+Gd₂O₃)

$$\lambda_{(UO_2+Gd_2O_3)} = \frac{1}{a \cdot t + b}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}, \quad (6.7)$$

где $\lambda_{(UO_2+Gd_2O_3)}$ - коэффициент теплопроводности диоксида урана с выгорающим поглотителем триоксидом гадолиния, Вт/(м·°C), $t = t_{н.топ.}$ – локальная температура топлива на поверхности топливной таблетки, °C; a, b - функции от процентного содержания Gd₂O₃ в составе ядерного топлива UO₂+Gd₂O₃, значения которых указаны в табл. 6.1.

Таблица 6.1 - Величины коэффициентов формулы (6.7)

C _{Gd} - процентное содержания Gd ₂ O ₃ в составе ядерного топлива (UO ₂ +Gd ₂ O ₃), %	a	b
0%	$2,327330 \cdot 10^{-4}$	$1,180229 \cdot 10^{-1}$
3%	$2,131412 \cdot 10^{-4}$	$1,732423 \cdot 10^{-1}$
5%	$1,996481 \cdot 10^{-4}$	$2,069985 \cdot 10^{-1}$
8%	$1,961735 \cdot 10^{-4}$	$2,342200 \cdot 10^{-1}$

По значениям температуры теплоносителя, линейной тепловой нагрузки и величинам термических сопротивлений, рассчитываются температуры топлива на оси и поверхности при расчетных и максимальных значениях линейной тепловой нагрузки.

Определение коэффициента теплопроводности МОХ-топлива, изготовленного из оксидов урана и плутония (UO₂ + PuO₂), Вт/(м²·K) [2]:

$$\lambda_{\text{мох}}(z) = 1.528 \cdot \sqrt{10^{-4} + 0.00931} - 0.1055 + 2.885 \cdot 10^{-4} T^{-1} + 76.38 \cdot 10^{-12} T^3, \quad (6.8)$$

$T = t_{\text{мон}}^n(z) + 273.15$ - температура топлива на поверхности, К.

Определение изменения температуры плавления ядерного топлива от уровня его выгорания

Международный банк данных MATPRO рекомендует для определения температуры плавления формулы расчета:

Температуры плавления ядерного топлива UO₂, UO₂+Gd₂O₃ [3]

$$T_{\text{пл}}(UO_2), (UO_2 + Gd_2O_3) = \frac{2865}{1 + 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot b_B + 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot b_B^2}, \text{ °C} \quad (6.9)$$

где b_B – сотая часть от абсолютной величины глубины выгорания топлива $B, (MBt \cdot \text{см})/\text{кг}$.

Температуры плавления МОХ-топлива [3]

$$T_{\text{пл}}(MOX) = \frac{1 - 0,2388(2 - O/M)}{1 + 0,1811 \cdot Y - 0,01100 \cdot Y^2} T_{\text{пл}}(UO_2), \text{ °C} \quad (6.10)$$

где $T_{\text{пл}}(MOX)$ - температура плавления облученного смешанного оксидного топлива, °C; $T_{\text{пл}}(UO_2)$ – температура плавления диоксида урана (2865 °C); $O/M = 1,95 \div 2,0$ – кислородный коэффициент, который характеризуется отношением количества атомов кислорода к количеству атомов металла в оксиде, O/M принимается равным 1,95; концентрация диоксида плутония в относительных единицах $Y = C + 1,16 \cdot b_B$, где b_B - сотая часть от абсолютной величины глубины выгорания топлива $B, (MBt \cdot \text{см})/\text{кг}$, C – массовое содержание оксида плутония в облученном топливе варьируется от 4 до 8%, подставляется в формулу 0,04÷0,08.

Анализ большого числа измерений в экспериментальных исследованиях характеристик ядерного топлива показал, что температура плавления стехиометрического диоксида урана равна 2865 ± 15 °С; для диоксида плутония температура плавления 2428 ± 25 °С.

Расчётные значения температур топлива на поверхности и в центре топливной таблетки сводятся в табл. 6.2 и 6.3. Изменение температуры ядерного топлива в центре и на поверхности показано на рис. 4 (прил. 1).

Таблица 6.2 - Расчётные значения температуры топлива на поверхности и в центре топливной таблетки при расчётных значениях линейной тепловой нагрузки

$z, \text{ м}$	q_l , кВт/м	$\lambda_3(z)$, кВт/(м·К)	$R_{\lambda_3}(z)$, (м·°С)/кВт	t_{mon}^n , °С	$\lambda_{mon}(z)$, кВт/(м·К)	$R_{\lambda_{mon}}(z)$, (м·°С)/кВт	t_{mon}^s , °С

Таблица 6.3 - Расчётные значения температуры топлива на поверхности и в центре топливной таблетки при максимальных значениях линейной тепловой нагрузки

$z, \text{ м}$	q_l^M , кВт/м	$\lambda_3^M(z)$, кВт/(м·К)	$R_{\lambda_3}(z)$, (м·°С)/кВт	t_{mon}^{nM} , °С	$\lambda_{mon}^M(z)$, кВт/(м·К)	$R_{\lambda_{mon}}^M(z)$, (м·°С)/кВт	t_{mon}^{sM} , °С

Характер изменения температуры ядерного топлива по высоте активной зоны для средне и максимально нагруженного твэла соответствует характеру изменения тепловыделений в активной зоне реактора. Значительное влияние на температуру топлива оказывают: изменения линейного энерговыделения твэла, химический состав топлива, обогащение, технология изготовления топливной таблетки, изменение теплофизических характеристик топлива в зависимости от изменения температуры, глубина выгорания топлива, условия охлаждения твэла. Изменения линейного энерговыделения обусловлены подъемом и сбросом мощности, перестановками ТВС при перегрузках, перемещениями поглощающих стержней органов регулирования.

По выгоранию топлива устанавливаются пределы на достижение максимальной глубины выгорания топлива. С увеличением глубины выгорания топлива теплопроводность топлива снижается, что приводит к значительным перепадам температур между центром и поверхностью топлива и появлению радиальных трещин в топливной таблетке. Неравномерность распределения тепловыделений по высоте активной зоны определяет неравномерность выгорания топлива, что приводит к снижению прочностных характеристик конструкции твэла.

В случае превышения температуры топлива над предельно допустимыми значениями наблюдается интенсивный выход газообразных продуктов деления из топливной таблетки, что ведет к увеличению внутреннего давления под оболочкой твэла, появлению трещин в топливной таблетке, термическому расширению топливной таблетки и взаимодействию топлива с оболочкой твэла. В дальнейшем это может привести к её расплавлению и выходу радиоактивных продуктов деления в контур циркуляции теплоносителя.

Поэтому величина максимальной температуры в центре ядерного топлива не должна превышать предельно допустимой температуры для данного вида топлива.

7. РАСЧЁТ ЗАПАСА ДО КРИЗИСА ТЕПЛООТДАЧИ

Расчёт коэффициента запаса по критической тепловой нагрузке

В реакторе с водой под давлением в качестве показателя теплотехнической надёжности используется коэффициент запаса по критической тепловой нагрузке:

$$K_{зан}^q = \frac{q_{кр}(z)}{q_{уст}(z)} \quad (7.1)$$

Необходимым условием безопасной эксплуатации ЯЭУ является выполнение условия - коэффициент запаса по критической тепловой нагрузке должен быть больше единицы. Для определения $K_{зан}^q$ необходимо знать распределение по высоте в наиболее теплонапряжённой ТВС критической и истинной (фактической) тепловых нагрузок рассчитанных при средних и максимальных значениях тепловых нагрузок.

Определение истинной тепловой нагрузки

Истинная (фактическая) тепловая нагрузка в любом сечении по высоте твэла определяется через линейную тепловую нагрузку и наружный периметр твэла:

$$q_{уст}(z) = \frac{q_l(z)}{\pi \cdot d_{твэ}} , \text{ кВт/м}^2 \quad (7.2)$$

Определение критической тепловой нагрузки

Для определения критических тепловых нагрузок при вынужденном движении воды, недогретой до кипения, существует несколько полуэмпирических формул, полученных, исходя из условий теплообмена.

Для реакторов в PWR критическая тепловая нагрузка может быть рассчитана по формуле Зенкевича-Субботина [3]:

$$q_{кр}(z) = 35,4 \cdot \left(\frac{G_{1ТВС}}{S_{тн}} \right)^{0,5} \cdot \Delta t_s(z)^{0,33} \cdot \left(1 - \frac{v'}{v''} \right)^{1,8} , \text{ кВт/м}^2 \quad (7.3)$$

где $G_{1ТВС}$ - массовый расход теплоносителя через ТВС, кг/с;

$S_{тн}$ - проходное сечение теплоносителя в ТВС, м²;

$\Delta t_s = t_s - t_{тн}(z)$, - недогрев теплоносителя до температуры насыщения в сечении z ;

v', v'' - удельный объём воды и пара на линии насыщения при давлении в активной зоне.

Диапазон применимости: давление $p = 12 \dots 21$ МПа; массовая скорость $\rho w = 830 \dots 5000$ кг/(м²с), недогрев теплоносителя до насыщения $\Delta t_s = 10 \dots 100$ °С.

Расчетные значения истинной и критической тепловой нагрузки, а также значения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи сводятся в табл. 7.1. После этого строятся графики зависимостей $q = f(z)$ и $q_{кр} = f(z)$ и определяется искомый коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи как для средней, так и максимальной тепловой нагрузки, $K_{зан}^q(z)$ и $K_{зан}^{qm}(z)$, что показано на рис.5 (прил. 1).

Таблица 7.1 - Изменение фактической и критической тепловой нагрузки по высоте активной зоны

$z, \text{ м}$	$q_{кр}(z) ,$ кВт/м ²	$q_{кр}^m(z) ,$ кВт/м ²	$q_{уст}(z)$ кВт/м ²	$q_{уст}^m(z)$ кВт/м ²	$K_{зан}^q(z)$	$K_{зан}^{qm}(z)$

Оценка надежности активной зоны производится по минимальному значению коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, рассчитанному при максимальных значениях тепловой нагрузки с учетом всех неблагоприятных условий эксплуатации ТВЭЛ.

Минимальное значение коэффициента запаса, рассчитанное для наиболее нагруженной ТВС должно быть больше единицы $K_{зап}^{qm}(z) > 1$. Если коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи меньше или равен единице, то это обстоятельство говорит о наличии кризиса теплоотдачи в активной зоне.

Для водо-водяных реакторов с водой под давлением характерен кризис теплоотдачи первого рода, характеризуемый переходом поверхностного пузырькового кипения в плёночное, он наступает, когда тепловая нагрузка превышает значение критической тепловой нагрузки, при этом в ядре потока теплоноситель недогрет до температуры насыщения. В этом случае происходит локальный пережог оболочки ТВЭЛА.

Важно понимать, что формула расчета критической тепловой нагрузки (7.3) учитывает только изменение расхода, давления и недогрева теплоносителя до кипения, и не учитывает особенностей поверхности теплоотвода, геометрии канала, выбора конструкционных материалов ТВЭЛА и многих других факторов, оказывающих влияние на условия возникновения и протекания кризиса теплоотдачи, отсюда следует, что значения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи (7.1), рассчитанные с учетом формулы (7.3), будут иметь завышенные значения.

Поэтому о бескризисной и надежной работе ТВЭЛА без повреждения его конструкции можно судить только при выполнении всех условий теплотехнической надежности активной зоны, а именно: минимальный коэффициент запаса, рассчитанный для наиболее теплонпряженного элемента при самых неблагоприятных условиях эксплуатации должен быть больше единицы, максимальные температуры по оболочке ТВЭЛА, изготовленной из циркониевых сплавов меньше предельно установленных АЭС эксплуатационных значений, максимальная температура ядерного топлива в центре топливной таблетке - меньше температуры плавления, максимальная тепловая нагрузка не превышает критической тепловой нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике / П.Л. Кириллов, В.П. Бобков, А.В. Жуков, Ю.С. Юрьев; под ред. П.Л. Кириллова. - М.: ИздАТ, 2010. – Т. 2.
2. Кириллов П.Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / П.Л. Кириллов, М.И. Терентьева, Н.Б. Денискина; под ред. П.Л. Кириллова. - М.: ИздАТ, 2007
3. Малыгин В.Б. Эксплуатационные свойства материалов для обоснования проектов твэлов энергетических реакторов. - М.: МИФИ, 2007.
4. Шаповаленко В.В. Теплогидравлический расчёт ЯР (конспект лекций по дисциплине). - Севастополь: СНУЯЭиП, 2011.
5. Перепелица Н.И. Дистанционирующие решётки с локальными завихрителями для тепловыделяющих сборок PWR // Атомная техника за рубежом. - 2006 - № 1. - С. 3-7.
6. Перепелица Н.И. Дистанционирующие решётки со смесительными лопатками для тепловыделяющих сборок PWR // Атомная техника за рубежом. - 2006. - № 2. - С. 3-9.
7. Перепелица Н.И. Смесительные дистанционирующие решётки без локальных завихрителей и направляющих лопаток для тепловыделяющих сборок PWR // Атомная техника за рубежом. - 2006. - № 3 - С. 3-7.
8. Дмитриев С.М. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. - 2014. - № 8. - С. 20-27.
9. Варенцов А.В. Особенности течения теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов / Д.В. Доронков, Е.М. Илютина, И.В. Каратушина, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов // Ядерная энергетика и техническая физика, 2015. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. - № 3(110).
10. Правила ядерной безопасности реакторных установок АС. ПБЯ РУ АС-89.
11. Программа Water Steam Pro Calculator. (составная часть набора программ для вычисления свойств воды и водяного пара. Версия 5.2.001. Copyright МЭИ, 2000 г).

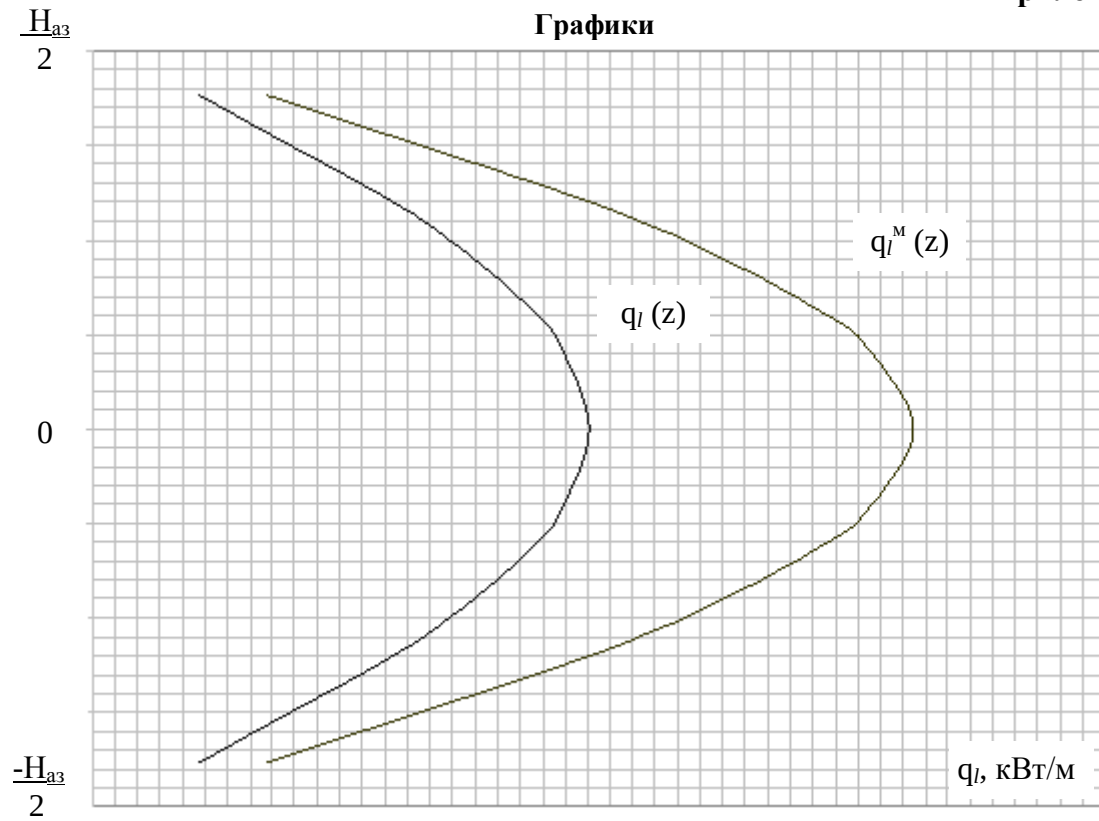


Рис.1. Изменение линейной тепловой нагрузки по высоте активной зоны

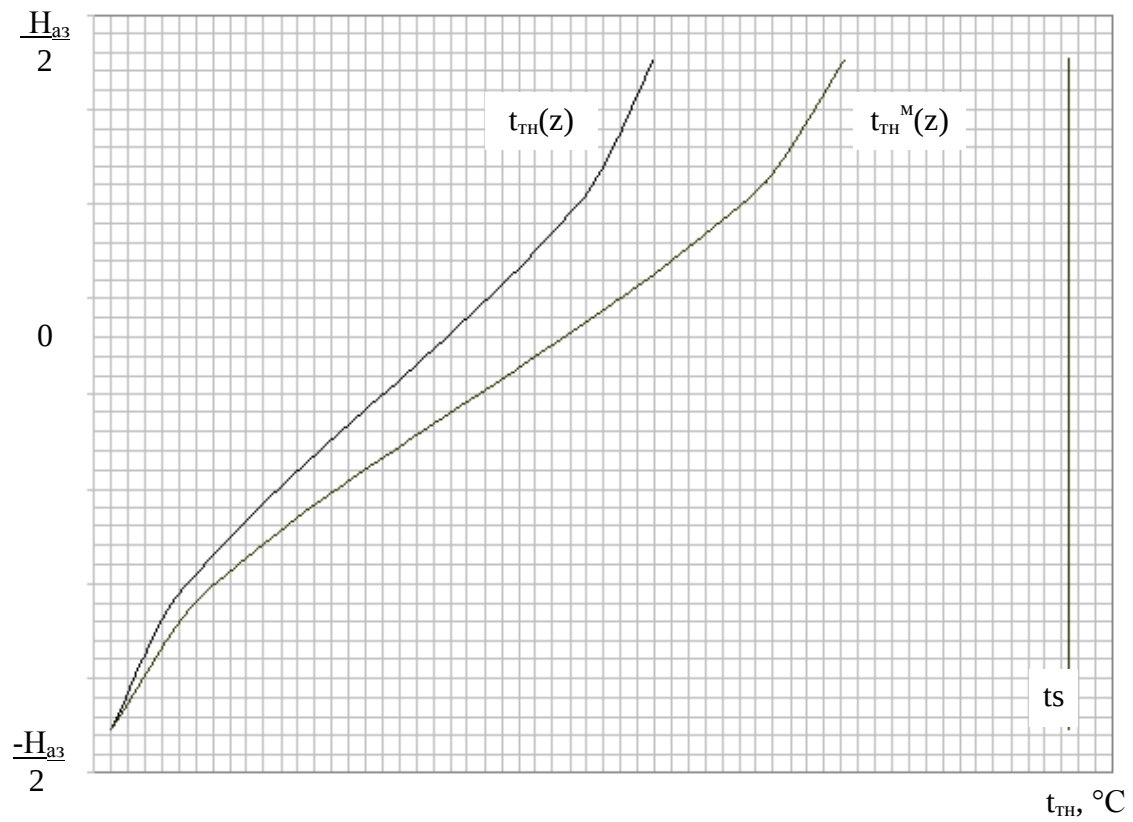


Рис. 2. Изменения температуры теплоносителя по высоте ТВС

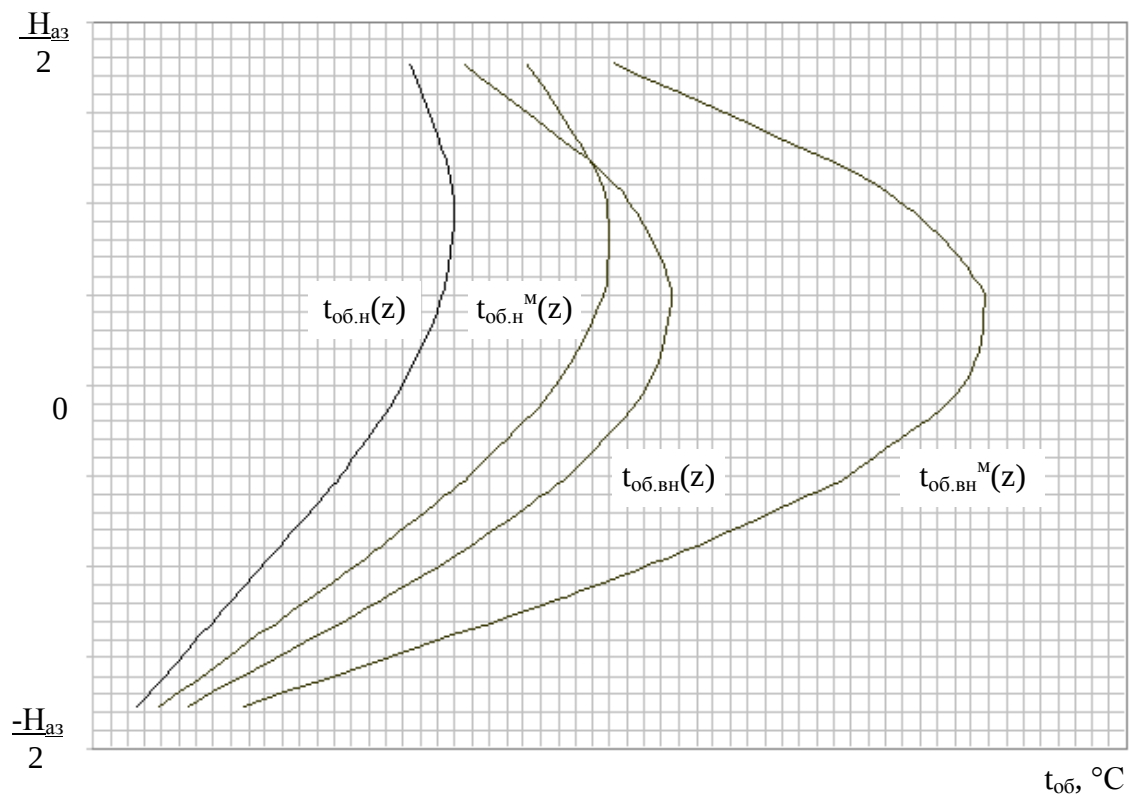


Рис. 3. Изменения температуры на наружной и внутренней поверхности оболочки ТВЭЛ по высоте

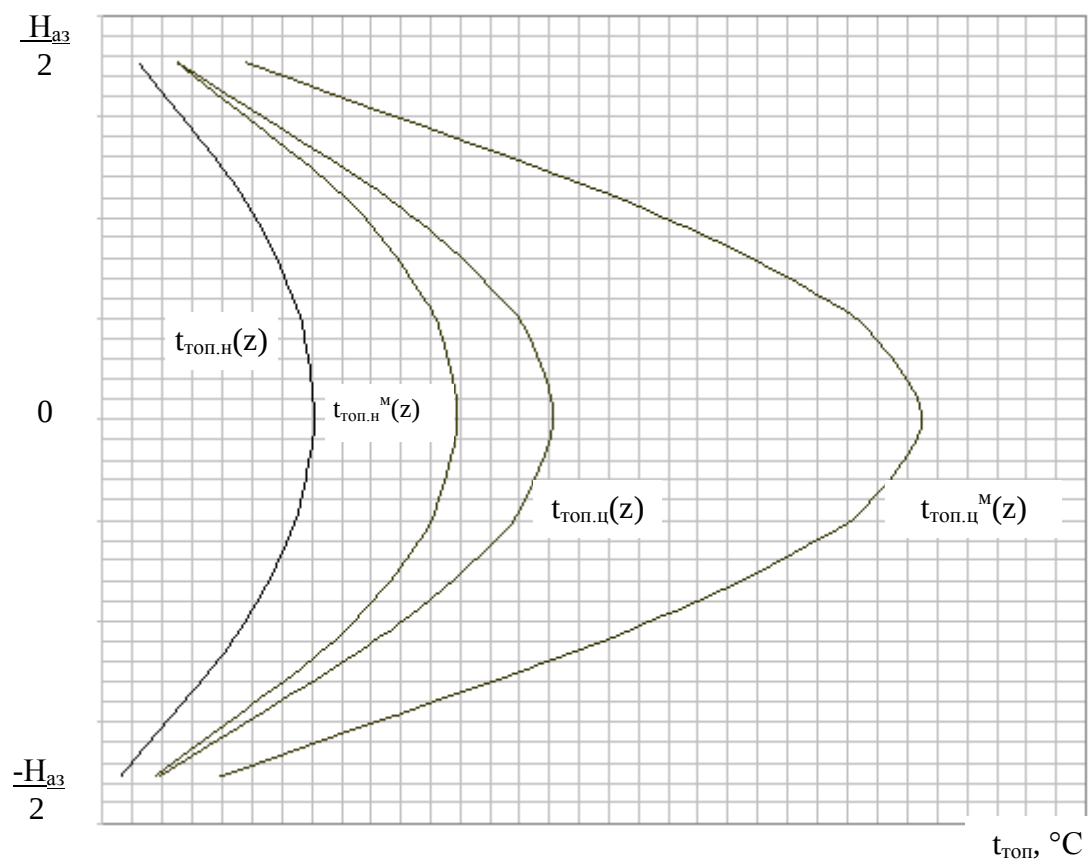


Рис. 4. Изменение температуры топлива в центре и на поверхности по высоте активной зоны

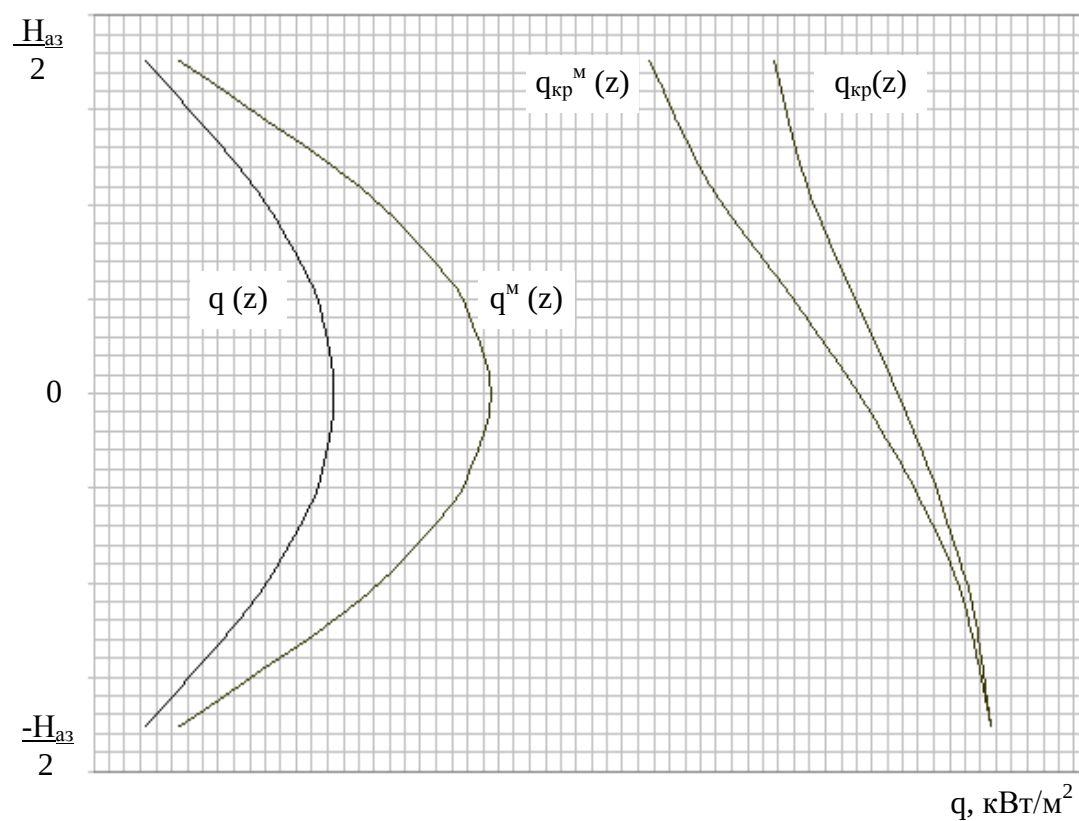


Рис. 5. Изменение фактической и критической тепловой нагрузки по высоте активной зоны

Приложение 2

Таблица 1 - Термодинамические свойства воды и водяного пара [11]

Термодинамические свойства воды указаны в таблице обычным шрифтом, для водяного пара выделены.

t , °C	Параметры воды и пара при давлении								
	14 МПа			15 МПа			16 МПа		
	$t_s=336.63$			$t_s=342.12$			$t_s=347.32$		
	$v'=0.0016104 \quad v''=0.01149$			$v'=0.0016580 \quad v''=0.01035$			$v'=0.0017101 \quad v''=0.009330$		
	$h'=1572.8 \quad h''=2638.3$			$h'=1612.2 \quad h''=2611.6$			$h'=1651.5 \quad h''=2582.7$		
	$r=1065.5$			$r=999.4$			$r=931.2$		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
250	0.0012340	1086.1	2.7704	0.0012324	1086.2	2.7682	0.0012308	1086.3	2.7660
260	0.0012572	1134.1	2.8612	0.0012553	1134.0	2.8587	0.0012535	1134.0	2.8563
270	0.0012828	1183.1	2.9523	0.0012807	1182.9	2.9496	0.0012786	1182.8	2.9469
280	0.0013115	1233.5	3.0441	0.0013090	1233.1	3.0411	0.0013065	1232.8	3.0381
290	0.0013441	1285.5	3.1373	0.0013410	1284.9	3.1338	0.0013381	1284.3	3.1304
300	0.0013816	1339.5	3.2324	0.0013779	1338.6	3.2284	0.0013742	1337.7	3.2245
310	0.0014260	1396.4	3.3307	0.0014212	1395.0	3.3259	0.0014165	1393.7	3.3213
320	0.0014801	1457.0	3.4338	0.0014736	1455.0	3.4279	0.0014674	1453.0	3.4222
330	0.0015497	1523.5	3.5449	0.0015402	1520.3	3.5371	0.0015312	1517.3	3.5296
340	0.01201	2672.6	5.4297	0.0016323	1594.6	3.6592	0.0016175	1589.6	3.6484
350	0.01323	2753.5	5.5606	0.01148	2693.8	5.4450	0.009782	2618.5	5.3071
360	0.01422	2817.4	5.6624	0.01258	2771.3	5.5685	0.01107	2717.8	5.4653

t , °C	Параметры воды и пара при давлении								
	17 МПа			18 МПа			19 МПа		
	$t_s=352.26$			$t_s=356.96$			$t_s=361.44$		
	$v'=0.0017690 \quad v''=0.008401$			$v'=0.0018380 \quad v''=0.007534$			$v'=0.0019231 \quad v''=0.006700$		
	$h'=1691.6 \quad h''=2550.8$			$h'=1733.4 \quad h''=2514.4$			$h'=1778.2 \quad h''=2470.1$		
	$r=859.2$			$r=781.0$			$r=691.9$		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
250	0.0012293	1086.4	2.7639	0.0012277	1086.5	2.7617	0.0012262	1086.7	2.7596
260	0.0012517	1134.0	2.8540	0.0012500	1134.0	2.8516	0.0012483	1134.0	2.8493
270	0.0012765	1182.6	2.9443	0.0012745	1182.5	2.9417	0.0012725	1182.4	2.9391
280	0.0013041	1232.4	3.0352	0.0013017	1232.1	3.0323	0.0012994	1231.9	3.0294
290	0.0013352	1283.8	3.1271	0.0013324	1283.2	3.1238	0.0013296	1282.8	3.1206
300	0.0013707	1336.9	3.2206	0.0013672	1336.1	3.2168	0.0013639	1335.3	3.2131
310	0.0014120	1392.4	3.3167	0.0014077	1391.3	3.3123	0.0014035	1390.1	3.3079
320	0.0014615	1451.2	3.4166	0.0014558	1449.5	3.4113	0.0014503	1447.9	3.4060
330	0.0015229	1514.6	3.5225	0.0015150	1512.0	3.5157	0.0015075	1509.6	3.5092
340	0.0016042	1585.0	3.6384	0.0015920	1580.9	3.6291	0.0015807	1577.2	3.6204
350	0.001728	1668.7	3.7736	0.001704	1660.9	3.7582	0.001683	1654.2	3.7448
360	0.009616	2653.6	5.3475	0.008135	2569.8	5.2011	0.001871	1756.8	3.9080

Абсолютное давление p , МПа.

Температура теплоносителя t , °C;

Температура насыщения t_s , °C.

Удельный объем v , м³/кг.

Удельный объем воды на линии насыщения v' , м³/кг.

Удельный объем сухого насыщенного пара v'' , м³/кг.

Удельная энтальпия h , кДж/кг.

Удельная энтальпия воды на линии насыщения h' , кДж/кг.

Удельная энтальпия сухого насыщенного пара h'' , кДж/кг.

Скрытая теплота парообразования r , кДж/кг.

Таблица 2 - Коэффициент динамической вязкости воды и пара [11]

p , МПа	Коэффициент динамической вязкости воды и пара $мкПа \cdot с$ при температурах, $^{\circ}C$									
	250	300	310	320	330	340	350	360	380	400
15	109.1	88.31	84.37	80.27	75.86	70.77	22.94	23.25	24.07	24.93
16	109.4	88.69	84.77	80.74	76.43	71.56	23.41	23.57	24.26	25.08
17	109.6	89.04	85.16	81.19	76.98	72.28	66.44	24.02	24.50	25.26
18	109.9	89.38	85.55	81.63	77.50	72.35	67.51	24.77	24.82	25.47
19	110.1	89.72	85.92	82.05	78.01	73.61	68.46	61.08	25.23	25.73
20	110.4	90.05	86.29	82.47	78.50	74.22	69.31	62.81	25.78	26.03

Таблица 3 - Удельная изобарная теплоёмкость воды и пара [11]

P , МПа	Удельная изобарная теплоёмкость воды и пара $кДж/кг \cdot ^{\circ}C$ при температурах, $^{\circ}C$									
	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340
15	4.733	4.829	4.944	5.083	5.256	5.476	5.769	6.184	6.829	8.065
16	4.722	4.816	4.928	5.063	5.230	5.441	5.719	6.106	6.693	7.744
17	4.712	4.804	4.913	5.045	5.205	5.408	5.672	6.035	6.572	7.485
18	4.702	4.792	4.898	5.026	5.182	5.376	5.628	5.968	6.463	7.269
19	4.692	4.780	4.884	5.008	5.159	5.346	5.586	5.907	6.364	7.085
20	4.682	4.769	4.870	4.991	5.137	5.317	5.546	5.849	6.274	6.924

p , МПа	Удельная изобарная теплоёмкость воды и пара $кДж/кг \cdot ^{\circ}C$ при температурах, $^{\circ}C$									
	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351
15	8.487	12.23	11.48	10.85	10.32	9.856	9.456	9.103	8.789	8.505
16	8.079	8.274	8.494	8.741	9.023	9.346	14.38	13.30	12.41	11.68
17	7.760	7.917	8.090	8.282	8.497	8.739	9.013	9.326	9.687	10.12
18	7.501	7.631	7.773	7.928	8.098	8.287	8.497	8.733	8.999	9.305
19	7.285	7.396	7.515	7.644	7.784	7.936	8.104	8.288	8.494	8.729
20	7.100	7.196	7.299	7.409	7.527	7.654	7.792	7.942	8.106	8.295

p , МПа	Удельная изобарная теплоёмкость воды и пара $кДж/кг \cdot ^{\circ}C$ при температурах, $^{\circ}C$									
	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361
15	8.248	8.013	7.797	7.596	7.409	7.235	7.072	6.919	6.774	6.638
16	11.05	10.52	10.06	9.660	9.304	8.985	8.697	8.434	8.193	7.970
17	10.64	16.88	15.30	14.12	13.14	12.32	11.63	11.05	10.55	10.11
18	9.655	10.06	10.55	11.14	11.88	22.93	19.69	17.46	15.82	14.55
19	8.987	9.279	9.613	9.999	10.45	11.00	11.67	12.51	13.64	15.23
20	8.496	8.720	8.969	9.248	9.566	9.930	10.35	10.86	11.46	12.21

p , МПа	Удельная изобарная теплоёмкость воды и пара $кДж/кг \cdot ^{\circ}C$ при температурах, $^{\circ}C$									
	362	363	364	365	366	367	370	380	390	400
15	6.509	6.387	6.271	6.162	6.057	5.958	5.687	5.000	4.526	4.178
16	7.764	7.572	7.392	7.224	7.066	6.917	6.517	5.554	4.929	4.488
17	9.720	9.374	9.062	8.777	8.518	8.278	7.657	6.254	5.410	4.846
18	13.53	12.73	12.01	11.40	10.88	10.42	9.327	7.171	5.999	5.265
19	26.96	22.42	19.50	17.42	15.87	14.64	12.17	8.419	6.738	5.761
20	13.17	14.46	16.31	19.29	40.85	30.01	18.66	10.22	7.693	6.360

Таблица 4 - Коэффициент теплопроводности воды и пара [11]

p , МПа	Коэффициент теплопроводности воды и пара $Вт/м \cdot ^\circ C$ при температурах, $^\circ C$								
	250	260	270	280	290	300	310	320	330
15	0.6317	0.6196	0.6065	0.5921	0.5762	0.5587	0.5393	0.5174	0.4925
16	0.6326	0.6209	0.6079	0.5936	0.5780	0.5607	0.5416	0.5202	0.4959
17	0.6338	0.6221	0.6093	0.5952	0.5797	0.5627	0.5438	0.5228	0.4991
18	0.6350	0.6234	0.6107	0.5967	0.5814	0.5646	0.5460	0.5254	0.5022
19	0.6361	0.6246	0.6120	0.5982	0.5831	0.5665	0.5482	0.5280	0.5052
20	0.6372	0.6259	0.6134	0.5997	0.5847	0.5683	0.5503	0.5304	0.5082

p , МПа	Коэффициент теплопроводности воды и пара $Вт/м \cdot ^\circ C$ при температурах, $^\circ C$								
	340	342	345	347	350	352	355	357	360
15	0.4633	0.4567	0.1106	0.1077	0.1041	0.1020	0.0923	0.0977	0.0955
16	0.4677	0.4614	0.4515	0.4445	0.1209	0.1171	0.1124	0.1098	0.1064
17	0.4718	0.4658	0.4563	0.4497	0.4392	0.4317	0.1327	0.1276	0.1217
18	0.4757	0.4699	0.4609	0.4545	0.4445	0.4375	0.4264	0.1604	0.1462
19	0.4795	0.4739	0.4651	0.4590	0.4495	0.4428	0.4323	0.4250	0.4139
20	0.4831	0.4776	0.4691	0.4633	0.4541	0.4477	0.4377	0.4307	0.4198
p , МПа	Коэффициент теплопроводности воды и пара $Вт/м \cdot ^\circ C$ при температурах, $^\circ C$								
	262	364	365	366	368	370	380	390	400
15	0.0942	0.0929	0.0923	0.0917	0.0903	0.0888	0.0839	0.0815	0.0799
16	0.1044	0.1025	0.1015	0.1006	0.0987	0.0966	0.0894	0.0858	0.0835
17	0.1184	0.1154	0.1140	0.1126	0.1098	0.1069	0.0961	0.0908	0.0874
18	0.1397	0.1343	0.1319	0.1297	0.1254	0.1211	0.1043	0.0966	0.0920
19	0.1812	0.1671	0.1618	0.1573	0.1494	0.1423	0.1150	0.1036	0.0972
20	0.4125	0.4060	0.4039	0.2214	0.1954	0.1793	0.1294	0.1121	0.1034

**Перечень вариантов заданий к расчетно-графической работе
«Тепловой расчет тепловыделяющей сборки реактора PWR»**

Описание ТВС: четырёхгранная бесчехловая ТВС, собранная из твэлов стержневой формы, расположенных в узлах квадратной решетки.

№	Наименование	Обозначение	Размерность	Вариант		
				1	2	3
1	Тепловая мощность	Q	МВт	4900	3411	4000
2	Давление теплоносителя	P	МПа	15,5	15,5	15,8
3	Температура теплоносителя на входе в ЯР	tvx	°C	293	291	290
4	Температура теплоносителя на выходе из ЯР	tвых	°C	330	326	324
5	Размер ТВС под ключ	a	мм	230	229	230
6	Количество ТВС	птвс	шт.	241	193	177
7	Высота активной зоны	Наз	мм	4200	3700	3810
8	Шаг расположения твэлов		мм	12,6	12,7	12,7
9	Общее количество ячеек в 1 ТВС		шт.	289 17x17	289 17x17	256 16x16
10	Количество твэлов	птвэ	шт.	264	264	243
11	Число ПС в 1 ОРСУЗ	пр	шт.	24	24	12
12	Центральный канал	пц	шт.	1	1	1
13	Число дистанционирующих решеток	пдр	шт.	9	10	9
14	Ø внешний оболочки твэла/ толщина оболочки	dтвэ $\delta_{об}$	мм	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625
15	Материал оболочки твэла			Zr-4	Zr-4	Zr-4
16	Выгорание топлива в ТВС	B	МВт·сут/кг	55	60	72
17	Ø внешний топливной таблетки	dтоп	мм	7,844	7,844	7,844
18	толщина зазора в твэле, заполненного гелием	δ_z	мм	0,157	0,157	0,157
19	Ø, направляющей трубы под ПС ОРСУЗ	dp	мм	12	12	12
20	Ø, центральной трубы	dc	мм	14	14	14
21	Вид топлива			UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ _ (C _{Gd} =3%)

№	Наименование	Обоз- на- чение	Размер- ность	Вариант					
				4	5	6	7	8	9
1	Тепловая мощность	Q	МВт	1940	3765	4450	3384	3550	3035
2	Давление теплоносителя	P	МПа	15,5	15,5	15,5	16,5	16,0	15,5
3	Температура теплоносителя на входе в ЯР	t _{вх}	°C	279,5	291	293	294	291	290
4	Температура теплоносителя на выходе из ЯР	t _{вых}	°C	315,5	326	330	326	323	320
5	Размер ТВС под ключ (сторона)	a	мм	230	229	230	230	229	230
6	Количество ТВС	птвс	шт.	145	241	257	193	241	177
7	Высота активной зоны	Наз	мм	3658	3810	4200	3680	3810	4200
8	Шаг расположения твэлов		мм	12,6	12,7	12,7	12,6	12,7	12,7
9	Общее количество ячеек в 1ТВС		шт.	289 17x17	324 18x18	289 17x17	289 17x17	289 17x17	256 16x16
10	Количество твэлов	птвэ	шт.	264	300	264	264	264	243
11	Число ПС в 1 ОРСУЗ	нр	шт.	24	23	24	24	24	12
12	Центральный канал	пц	шт	1	1	1	1	1	1
13	Число дистанционирующих решеток	ндр	шт.	9	10	9	9	10	9
14	Ø внешней оболочки твэла/ толщина оболочки	d _{твэ} $\delta_{об}$	мм	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625
15	Материал оболочки твэла			Э-110	Zr-4	Э-110	Zr-4	Э-100	Zr-4
16	Выгорание топлива в ТВС	B	МВт·сут/кг	55	62	72	55	60	65
17	Ø внешний топливной таблетки	d _{топ}	мм	7,844	7,844	7,844	7,844	7,844	7,844
18	толщина зазора в твэле, заполненного гелием	δ_z	мм	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157
19	Ø, направляющей трубы под ПС ОРСУЗ	d _p	мм	12	12	12	12	12	12
20	Ø, центральной трубы	d _ц	мм	14	14	14	14	14	14
21	Вид топлива			UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ (C _{Gd} =8%)	UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ (C _{Gd} =5%)

№	Наименование	Обоз- на- чение	Размер- ность	Вариант					
				10	11	12	14	14	15
1	Тепловая мощность	Q	МВт	3110	2950	3935	3750	3500	3650
2	Давление теплоносителя	P	МПа	16,5	16,0	15,5	16,0	16,5	16,0
3	Температура теплоносителя на входе в ЯР	t _{вх}	°C	293	291	289	293	294	290
4	Температура теплоносителя на выходе из ЯР	t _{вых}	°C	325	323	321	325	326	322
5	Размер ТВС под ключ	a	мм	230	229	230	230	229	230
6	Количество ТВС	птвс	шт.	193	177	257	241	241	257
7	Высота активной зоны	Наз	мм	3810	3900	3810	4200	4200	3700
8	Шаг расположения твэлов		мм	12,6	12,7	12,7	12,6	12,7	12,7
9	Общее количество ячеек в 1ТВС		шт.	289 17x17	256 16x16	289 17x17	256 16x16	289 17x17	324 18x18
10	Количество твэлов	птвэ	шт.	264	243	264	243	264	300
11	Число ПС в 1 ОРСУЗ	нр	шт.	24	12	24	12	24	23
12	Центральный канал	пц	шт	1	1	1	1	1	1
13	Число дистанционирующих решеток	ндр	шт.	9	10	9	10	9	10
14	Ø внешней оболочки твэла/ толщина оболочки	d _{твэ} $\delta_{об}$	мм	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625
15	Материал оболочки твэла			(Zr-4)	Э-110	(Zr-4)	Э-110	(Zr-4)	Э-110
16	Выгорание топлива в ТВС	B	МВт·сут/кг	72	55	60	65	60	72
17	Ø внешний топливной таблетки	d _{топ}	мм	7,844	7,844	7,844	7,844	7,844	7,844
18	толщина зазора в твэле, заполненного гелием	δ_z	мм	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157
19	Ø, направляющей трубы под ПС ОРСУЗ	d _p	мм	12	12	12	12	12	12
20	Ø, центральной трубы	d _ц	мм	14	14	14	14	14	14
21	Вид топлива			UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ (C _{Gd} =3%)	UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ (C _{Gd} =5%)

№	Наименование	Обоз- на- чение	Размер- ность	Вариант					
				16	17	18	19	20	21
1	Тепловая мощность	Q	МВт	4250	4400	4315	3800	4000	3200
2	Давление теплоносителя	P	МПа	15,5	16,5	16	15,5	15,5	16,5
3	Температура теплоносителя на входе в ЯР	t _{вх}	°C	290	294	290	290	294	290
4	Температура теплоносителя на выходе из ЯР	t _{вых}	°C	323	326	323	323	326	320
5	Размер ТВС под ключ	a	мм	230	229	230	230	229	230
6	Количество ТВС	птвс	шт.	241	257	241	193	241	241
7	Высота активной зоны	Наз	мм	3810	3810	3700	3680	3700	3810
8	Шаг расположения твэлов		мм	12,6	12,7	12,7	12,6	12,7	12,7
9	Общее количество ячеек в 1ТВС		шт.	324 18x1 8	289 17x1 7	256 16x16	289 17x1 7	256 16x1 6	289 17x17
10	Количество твэлов	птвэ	шт.	300	264	243	264	243	264
11	Число ПС в 1 ОРСУЗ	нр	шт.	23	24	12	24	12	24
12	Центральный канал	пц	шт	1	1	1	1	1	1
13	Число дистанционирующих решеток	ндр	шт.	9	10	9	10	9	10
14	Ø внешней оболочки твэла/ толщина оболочки	d _{твэ} $\delta_{об}$	мм	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625
15	Материал оболочки твэла			(Zr-4)	Э- 110	(Zr-4)	Э- 110	(Zr-4)	Э-110
16	Выгорание топлива в ТВС	B	МВт·сут/кг	55	65	72	55	65	40
17	Ø внешний топливной таблетки	d _{топ}	мм	7,844	7,844	7,844	7,844	7,844	7,844
18	толщина зазора в твэле, заполненного гелием	δ_z	мм	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157
19	Ø, направляющей трубы под ПС ОРСУЗ	d _p	мм	12	12	12	12	12	12
20	Ø, центральной трубы	d _ц	мм	14	14	14	14	14	14
21	Вид топлива			UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ (C _{Gd} =8%)	UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ (C _{Gd} =3%)

№	Наименование	Обозначение	Размерность	Вариант					
				22	23	24	25	26	27
1	Тепловая мощность	Q	МВт	3100	3000	4100	2800	2100	3100
2	Давление теплоносителя	P	МПа	16,0	15,5	16,5	16,0	15,5	15,7
3	Температура теплоносителя на входе в ЯР	t _{вх}	°C	294	295	290	280	288	294
4	Температура теплоносителя на выходе из ЯР	t _{вых}	°C	326	330	320	316	320	326
5	Размер ТВС под ключ	a	мм	230	229	230	230	229	230
6	Количество ТВС	птвс	шт.	257	193	257	193	193	257
7	Высота активной зоны	Наз	мм	3650	4200	4200	3658	3810	3650
8	Шаг расположения твэлов		мм	12,6	12,7	12,7	12,6	12,7	12,7
9	Общее количество ячеек в 1ТВС		шт.	289 17x17	289 17x17	324 18x18	256 16x16	256 16x16	289 17x17
10	Количество твэлов	птвэ	шт.	264	264	300	243	243	264
11	Число ПС в 1 ОРСУЗ	пр	шт.	24	24	23	12	12	24
12	Центральный канал	пц	шт	1	1	1	1	1	1
13	Число дистанционирующих решеток	пдр	шт.	9	10	9	9	10	9
14	Ø внешний оболочки твэла/ толщина оболочки	d _{твэ} δ _{об}	мм	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625	9,5/ 0,625	9,5/ 0,64	9,5/ 0,625
15	Материал оболочки твэла			(Zr-4)	Э-110	(Zr-4)	Э-110	(Zr-4)	Э-110
16	Выгорание топлива в ТВС	B	МВт·сут/кг	50	55	60	40	42	50
17	Ø внешний топливной таблетки	d _{топ}	мм	7,844	7,844	7,844	7,844	7,844	7,844
18	толщина зазора в твэле, заполненного гелием	δ _з	мм	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157
19	Ø, направляющей трубы под ПС ОРСУЗ	d _п	мм	12	12	12	12	12	12
20	Ø, центральной трубы	d _ц	мм	14	14	14	14	14	14
21	Вид топлива			UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ (C _{Gd} =5%)	UO ₂	UO ₂ + PuO ₂	UO ₂ - Gd ₂ O ₃ (C _{Gd} =8%)

У ч е б н о е и з д а н и е

Шаповаленко Виктория Владимировна
Матузаев Кирилл Борисович

**ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ
РЕАКТОРА PWR**

Учебно-методическое пособие

Редактор О.В. Дмитриева

Изд. № 81/17. Объем 2,5 п. л. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,45.

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»