*МЭИ (ТУ)*

*Кафедра парогенераторостроения*

***Типовой расчёт по курсу:***

***Генераторы тепловой энергии***

***Тепловой расчёт ВВЭР***

 ***Студент: Иванов А.А.***

 ***Группа: С-2-95***

 ***Преподаватель: Двойнишников В.А.***

***Москва 2000 год***

***Аннотация.***

В данной работе решались следующие задачи:

* расчёт реактора при m = 1 и qv = 100 и определение его экономичности и надёжности при учёте наложенных ограничений: 1.6 < n < 2.2,

 2 < Wт <10 м/с, tоб < 350 оС, tc < 2300 оС.

* нахождение области допустимых значений относительной высоты активной зоны m и удельного энерговыделения qv (m = 0.8 … 1.6,

 qv = 50 … 150) при учёте наложенных ограничений: 1.6 < n < 2.2,

 2 < Wт <10 м/с, tоб < 350 оС, tc < 2300 оС.

* для выбранного варианта расчёт температуры сердечника, оболочки и теплоносителя по высоте активной зоны.

***Содержание:***

1. Введение
2. Исходные данные
3. Тепловой расчёт реактора при m = 1 и qv = 100 МВт/м3

3.1. Определение размеров активной зоны реактора и скорости теплоносителя

3.2. Определение коэффициента запаса по критической тепловой нагрузке

3.3. Расчёт максимальных температур оболочки ТВЭЛа и материала

топливного сердечника

3.4. Определение области допустимых значений m и qv

3.5. Расчёт распределения температуры теплоносителя, оболочки и топливного

сердечника по высоте активной зоны реактора

4. Выводы

**1. Введение**

**Назначение и виды тепловых расчётов реакторов.**

Тепловой расчет ядерного реактора является одной из необходи­мых составных частей процесса обоснования и разработки конструк­ции. Без него невозможны ни предварительные поисковые проработки, ни определение оптимальных проектных решений.

Тепловые расчеты обычно выполняются одновременно с гидравлическим и нейтронно-физическим расчетами реактора. В зависимости от задач, решаемых на том или ином этапе проработки конструкции, различают поисковые и поверочные расчеты

Поисковые тепловые расчеты проводятся в период определения основных конструктивных решений. При их выполнении, как правило, известны тепловая мощность реактора, распределение плотности энерговыделения, вид теплоносителя и его параметры все эти данные получают в результате нейтронно-физического расчета, а также тип и конструкция ТВЭЛов и кассет, определяемых техническим заданием на основе накопленного опыта проектирования, изготовления и эксплуатации. В результате определяются размеры активной зоны и дру­гих элементов реактора, находятся, а при необходимости уточняются параметры теплоносителя, определяются характерные температуры, выбираются конструкционные материалы и топливные композиции.

По мере разработки конструкции тепловые расчеты выполняются снова, но более детально, с учетом выбранных конструктивных реше­ний, как для номинального режима, так и для работы на частичных нагрузках. Также обсчитываются тепловые режимы работы оборудова­ния при переходных процессах при пуске, останове, изменении наг­рузки, характерных как для штатных ситуаций, так и в аварийных случаях. Во всех этих случаях тепловой расчет носит характер поверочного, и его основной задачей является определение термодинамических характеристик теплоносителя и тепловых параметров ха­рактеризующих условия функционирования элементов ядерного реактора. Обеспечение надежной работы реактора в целом и его отдельных элементов, достижение высокой экономичности реакторной установки требует высокой точности определения теплотехнических параметров, что ведет к существенному усложнению всех видов расчетов, в том числе и теплового. Необходимость же их автоматизации приводит к созданию сложных программных комплексов, объединяющих тепловые, Гидравлические, нейтронно-физические и прочностные расчеты.

Настоящий метод ориентирован на использование несколько упрощенного теплового расчета, базирующегося на одномерном представлении протекания процессов тепло - и массообмена в одной ячейке активной зоны реактора.

**2. Исходные данные.**

Для выполнения теплового расчета водо-водяного энергети­ческого реактора (ВВЭР) в соответствии с упрощенной методикой требуются исходные данные, условно подразделяемые на режимные и конструктивные,

Данные режимного типа:

 Тепловая мощность ВВЭР N = 1664.87 МВт

Конструктивные данные:

1. Характеристики кассеты:

Число ТВЭЛов в кассете nТВЭЛ = 331

 Шаг решётки а′′ = 12.75·10-3 м

 Размер кассеты “под ключ” а′ = 0.238 м

 Толщина оболочки кассеты δ = 1.5·10-3 м

1. Характеристика ТВЭЛа:

 Радиус топливного сердечника r1 = 3.8·10-3 м

 Внутренний радиус оболочки r2 = 3.9·10-3  м

 Внешний радиус оболочки rq = 4.55·10-3 м

1. Размер ячейки а = 0.242 м
2. Материал оболочки ТВЭЛов и кассет: 99% циркония и 1% ниобия
3. Топливная композиция: двуокись урана

**3.Тепловой расчёт реактора при qv= 100 МВт/м3 и m= 1**

* 1. **Определение размеров активной зоны реактора и скорости теплоносителя.**
		1. ***Температура теплоносителя на выходе из реактора***

**tвых = 314 °C**

Принимаем из расчёта парогенератора

* + 1. ***Температура теплоносителя на входе в реактор***

**tвх = 283 °C**

Принимаем из расчёта парогенератора

* + 1. ***Перепад температур теплоносителя между входом и выходом***

**Δtт =** tвых - tвх = 314 – 283 **= 31 °С**

* + 1. ***Температура воды на линии насыщения***

Запас до температуры кипения δt = 30 °C

**ts =** tвых + δt = 314 + 30 **= 344 °C**

* + 1. ***Давление в реакторе***

**P = 15.2 МПа**

* + 1. ***Расход воды (теплоносителя) на один реактор***

средняя температура воды в реакторе tср =  = 298.5 °C

средняя теплоёмкость воды Cp = 5.433 кДж/кг

**Gт =  =9885.05 кг/с**

Принимаем из расчёта парогенератора.

* + 1. ***Объём активной зоны реактора.***

# Средняя плотность тепловыделения АЗ реактора qv = 100 МВт/м3

**VАЗ = = 16.648 м3**

* + 1. ***Диаметр активной зоны реактора***

Параметр m\* = = 1

**DАЗ =  = 2.767 м**

* + 1. ***Число кассет в активной зоне***

Площадь поперечного сечения ячейки: Sяч = 0.866·a2 = 5.072·10-2 м2

** = 178.2 шт.**

т.к.дробное, то округляем его до ближайшего большего целого числа

Nкас = 179 шт. с последующим уточнением величин:

**DАЗ== 3.4 м**

**m = = 0.993**

* + 1. ***Высота активной зоны реактора***

**HАЗ** = m·DАЗ = 0.993·3.4 = **3.376 м**

* + 1. ***Тепловыделение в ТВЭЛах***

Доля теплоты выделяемая в ТВЭЛах κ1 = 0.95

**Qт** = κ1·N = 0.95·3064 = **2910.8 МВт**

* + 1. ***Суммарная поверхность ТВЭЛ***

**F =** 2·π·rq·HАЗ·nТВЭЛ·Nкас = 2·π·4.55·10-3·3.376·331·179 **= 5719 м2**

* + 1. ***Расход теплоносителя через одну кассету***

**Gтк = = 90.22 кг/с**

***3.1.14. Скорость теплоносителя в активной зоне реактора***

сечение для прохода теплоносителя около одного ТВЭЛа SвТВЭЛ = 0.866·(a′′)2-

-π·rq2 = 0.866·(12.75·10-3)2 – π·(4.55·10-3)2 = 7.574·10-5 м2

сечение для прохода теплоносителя в кассете Sвкас = SвТВЭЛ·nТВЭЛ = 7.574·10-5·331 = 2.507·10-2 м2

плотность воды при средней температуре и давлении в реакторе ρв = 713.2 кг/м3

**Wт = = 5.046 м/с**

* 1. **Определение коэффициента запаса по критической тепловой нагрузке.**

***3.2.1. Коэффициенты неравномерности тепловыделения***

Эффективная добавка отражателя δ0 = 0.1 м

Эффективная высота активной зоны Hэф = HАЗ + 2·δ0 = 3.376 + 2·0.1 = 3.576 м

***по оси реактора:* Kz = = 1.489**

***по радиусу активной зоны:* Kr = = 2.078**

***3.2.2. Коэффициент неравномерности тепловыделения в объёме АЗ***

**Kv =** Kz·Kr = 1.489·2.078 **= 3.094**

* + 1. ***Максимальная величина тепловой нагрузки на единицу поверхности ТВЭЛа***

Средняя тепловая нагрузка на единицу поверхности ТВЭЛа **qF = = =0.509 МВт/м2**

**qmax =** qF·Kv = 0.509·3.094 **= 1.575 МВт/м2**

* + 1. ***Критический тепловой поток кризиса первого рода для трубы*** d = 8 мм

Теплота парообразования теплоносителя R = 931.2 кДж/кг

Температура воды на линии насыщения ts = 347.32 °C

Величина паросодержания теплоносителя в центральной точке реактора xкр = = = -0.2782

**qкр(8) =**

**=**

**=** 1.347·3.5990.5549·е0.4173 **= 4.161 МВт/м2**

* + 1. ***Критический тепловой поток кризиса первого рода для труб диаметром 2rq***

**qкр(2rq) = = 3.901 МВт/м2**

* + 1. ***Коэффициент запаса по критической нагрузке.***

**nзап = = 2.477**

* 1. **Расчёт максимальных температур оболочки ТВЭЛа и материала топливного сердечника.**

***3.3.1. Максимальное тепловыделение в центре реактора приходящееся на единицу высоты ТВЭЛа.***

**ql,0= = 4.503·10-2 МВт/м**

* + 1. ***Коэффициент теплоотдачи от стенки к теплоносителю.***

Коэффициент теплопроводности теплоносителя λ = 548.3·10-3 Вт/(м·К) при температуре tcр

Эквивалентный диаметр сечения для прохода воды dэкв = = 6.851·10-3 м

Кинематическая вязкость воды. Для её определения необходимо найти динамическую вязкость. μ = 8.936·10-5 Па/с. ν = = 1.253·10-7 м2/с

Критерий Рейнольдса Re = = 2.759·105

Число Прандтля Pr = 0.9217

**α==3.685·104 Вт/м2К**

* + 1. ***Перепад температуры между оболочкой ТВЭЛа и теплоносителем в центре реактора.***

**Δθа0 = = 40.61 °С**

* + 1. ***Координата в которой температура на наружной поверхности оболочки ТВЭЛа максимальна.***

**Z\*==0.4287м**

* + 1. ***Максимальная температура наружной поверхности оболочки ТВЭЛа***

**t= 351.7 °C**

* + 1. ***Температурный перепад в цилиндрической оболочке ТВЭЛа***

## Коэффициент теплопроводности материала оболочки λоб = 24.1 Вт/(м·К)

**Δθоб0 = = 43.55 °С**

* + 1. ***Температурный перепад в зазоре ТВЭЛа***

## Коэффициент теплопроводности газа в зазоре λз = 30 Вт/(м·К)

**Δθз0 = = 18.52 °С**

* + 1. ***Температурный перепад в цилиндрическом сердечнике***

## Коэффициент теплопроводности в цилиндрическом сердечнике λс = 2.7 Вт/(м·К)

**Δθс0 = = 1261 °С**

* + 1. ***Перепад температур между теплоносителем и топливным сердечником***

**Δθс =** Δθа0 + Δθоб0 + Δθз0 + Δθс0 = 42.46 + 43.55 + 18.52 + 1261 **= 1366 °С**

* + 1. ***Максимальная температура топливного сердечника***

**t = 1674 °C**

***3.4 Определение области допустимых значений m и qv***

**Исходные данные для расчёта по программе WWERTR**

|  |  |
| --- | --- |
| 1. Тепловая мощность реактора [МВт]
2. Давление в реакторе [МПа]
3. Перепад температур воды [°C]
4. Радиус топливного сердечника ТВЭЛа [м]
5. Внутренний радиус оболочки ТВЭЛа [м]
6. Внешний радиус оболочки ТВЭЛа [м]
7. Шаг решетки [м]
8. Размер кассеты “под ключ” [м]
9. Размер ячейки [м]
10. Толщина оболочки кассеты [м]
11. Эффективная добавка отражателя [м]
12. Число ТВЭЛов в кассете [шт]
13. Температура воды на линии насыщения [°С]
14. Теплота парообразования [кДж/кг]
15. Теплоемкость воды [кДж/кг·К]
16. Теплопроводность воды [Вт/м·°С]
17. Кинематическая вязкость воды [м2/с]
18. Число Прандтля
19. Плотность воды [кг/м3]
20. Теплопроводность оболочки ТВЭЛа [Вт/м·°С]
21. Теплопроводность газа в зазоре ТВЭЛа [Вт/м·°С]
22. Теплопроводность двуокиси урана [Вт/м·°С]
23. Удельное энерговыделение [кВт/л]
24. Относительная высота активной зоны
25. Расч. скорость воды [м/с]
26. Расч. коэффициент запаса
27. Расч. координата точки с мак. темп. оболочки [м]
28. Расч. мак. температура оболочки ТВЭЛа [°С]
29. Расч. мак. температура сердечника ТВЭЛа [°С]
 | N = 1664.84 P = 15.2Δt = 31r1 = 3.8·10-3 r2 = 3.9·10-3  rq = 4.55·10-3а′′ = 12.75·10-3 а′ = 0.238 а = 0.242 δ = 1.5·10-3 δ0 = 0.1nТВЭЛ = 331ts = 344R = 1020.9Cp = 5.433λ = 556.658·10-3ν = 1.21·10-7Pr = 0.905ρв = 724.4λоб = 23.9λз = 30.5λс = 2.7qv = 100 m = 0.995 Wт = 4.345 nзап = 2.699 Z\*= 0.333 t= 343.957 t = 1623.37  |

**Результаты расчёта по программе WWERTR.**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | m\* | DАЗ | Wт | nзап | Z\* | t | t |
| - | м | м/с | - | м | °С | °С |
|  | qv = 50.0 кВт/л |
| 12345 | 0.8001.0041.2031.4091.608 | 4.6024.2674.0183.8123.647 | 2.754 3.204 3.614 4.015 4.386 | 3.433 3.731 3.990 4.234 4.451 | 0.5460.699 0.850 1.007 1.160 | 345.5 342.1 339.7 337.8 336.3 | 1016.81013.41010.51007.71005.2 |
|  | qv = 75.0 кВт/л |
| 12345 | 0.8021.0061.2011.4051.611 | 4.0183.7263.5123.3333.184 | 3.614 4.202 4.730 5.253 5.755 | 2.707 2.941 3.141 3.332 3.510 | 0.413 0.530 0.645 0.766 0.889 | 351.4 347.2 344.2 341.9 340.0 | 1343.51339.71336.21332.7 1329.3 |
|  | qv = 100.0 кВт/л |
| 12345 | 0.8041.0011.2091.4051.604 | 3.6473.3903.1843.0282.897 | 4.386 5.076 5.755 6.362 6.950 | 2.290 2.482 2.662 2.817 2.962 | 0.339 0.433 0.533 0.630 0.729 | 356.2 351.5 347.9 345.3 343.2 | 1662.91659.01654.71650.7 1646.7 |
|  | qv = 125.0 кВт/л |
| 12345 | 0.8011.0051.2131.4111.605 | 3.3903.1432.9532.8072.689 | 5.076 5.905 6.692 7.405 8.067 | 2.009 2.183 2.341 2.479 2.602 | 0.289 0.372 0.459 0.543 0.627 | 360.5 355.1 351.1 348.2 346.0 | 1976.91972.61967.81963.2 1958.7 |
|  | qv = 150.0 кВт/л |
| 12345 | 0.8061.0101.2061.4121.609 | 3.1842.9532.7842.6412.528 | 5.755 6.692 7.529 8.365 9.126 | 1.812 1.969 2.102 2.231 2.345 | 0.256 0.330 0.402 0.479 0.555 | 364.0 358.3 354.2 350.9 348.4 | 2286.22281.82276.92271.42266.1 |

m = 0.8

m = 1.0

m = 1.2

m = 1.4

m = 1.6

Границы возможного диапазона значений qv

для каждого параметра (по графикам).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| mпараметры | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 |
| Wт | —  | —  | —  | —  | —  |
| —  | —  | —  | —  | —  |
| nзап | —  | —  | —  | —  | —  |
| 108.1 | 123.6 | 139.9 | —  | —  |
| t | 68.83 | 91.04 | 116.4 | 141.6 | —  |
| —  | —  | —  | —  | —  |
| t | —  | —  | —  | —  | —  |
| —  | —  | —  | —  | —  |
| Диапазон допустимых значений | —  | —  | —  | —  | —  |
| —  | —  | —  | —  | —  |

Прочерк в таблице означает, что максимальное или (и) минимальное значение величины находится за границами рассматриваемой области.

Знак "\*" означает, что ни одно значение не входит в накладываемые ограничения.

Анализ таблицы показывает, что при заданных начальных условиях не существует значений m и qv,которые удовлетворяли бы наложенным ограничениям.

**3.5. Расчёт распределения температуры теплоносителя, оболочки и топливного сердечника по высоте активной зоны реактора. m = 1.4, qv = 125 кВт/л.**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Координата, м | Температура теплоносителя, °С | Температура сердечника,°С | Температура оболочки,°С |
| 1234567891011 | -1.981-1.585 -1.188-0.792-0.3960.0000.3960.7921.188 1.5851.981 | 292.0293.1 295.5 299.0 303.3 308.0 312.7 317.0 320.5 322.9 324.0 | 416.8 898.6 1328.0 1666.8 1885.0 1963.2 1894.4 1684.9 1353.1 928.5 448.8 | 294.8 306.6 318.5 329.5 338.5  344.9 348.0 347.5 343.6336.4326.8 |

1. ***Выводы по проведённой работе.***

При m = 1 и qv = 100 получено, что данный пример не удовлетворяет условию экономичности n = 2.477 (1.6 < n < 2.2) и незначительно условию надёжности tоб = 351.7 oC (tоб < 350 oC).

При заданных начальных условиях характеристики теплоносителя и реактора, и поставленных ограничениях на скорость теплоносителя, коэффициент запаса, максимальную температуру оболочки и теплоносителя; области допустимых значений относительной высоты активной зоны m и удельного энерговыделения qv (m = 0.8 … 1.6, qv = 50 … 150) не существует. Во всех случаях кроме последнего (m = 1.6 и qv = 150, здесь n > 2.2) не проходит по надёжности.

При расчёте температур по высоте активной зоны получено для m = 1.4 и qv = 125: температура сердечника максимальна в середине высоты ТВЭЛа, температура оболочки максимальна на высоте z = 0.5, а температура теплоносителя максимальна в верхней части ТВЭЛа. Максимальный градиент температуры теплоносителя в середине высоты ТВЭЛа.