*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 = 15.2  Δt = 31  r1 = 3.8·10-3  r2 = 3.9·10-3  rq = 4.55·10-3  а′′ = 12.75·10-3  а′ = 0.238  а = 0.242  δ = 1.5·10-3  δ0 = 0.1  nТВЭЛ = 331  ts = 344  R = 1020.9  Cp = 5.433  λ = 556.658·10-3  ν = 1.21·10-7 Pr = 0.905 ρв = 724.4  λоб = 23.9  λз = 30.5  λс = 2.7  qv = 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 | | | | | | | | | | | | | |
| 1  2  3  4  5 | 0.800  1.004  1.203  1.409  1.608 | | 4.602  4.267  4.018  3.812  3.647 | | 2.754  3.204  3.614  4.015  4.386 | | 3.433  3.731  3.990  4.234  4.451 | | 0.546  0.699  0.850  1.007  1.160 | | 345.5  342.1  339.7  337.8  336.3 | | 1016.8  1013.4  1010.5  1007.7  1005.2 | |
|  | qv = 75.0 кВт/л | | | | | | | | | | | | | |
| 1  2  3  4  5 | 0.802  1.006  1.201  1.405  1.611 | | 4.018  3.726  3.512  3.333  3.184 | | 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 | | 1343.5  1339.7  1336.2  1332.7  1329.3 | |
|  | qv = 100.0 кВт/л | | | | | | | | | | | | | |
| 1  2  3  4  5 | 0.804  1.001  1.209  1.405  1.604 | | 3.647  3.390  3.184  3.028  2.897 | | 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 | | 1662.9  1659.0  1654.7  1650.7  1646.7 | |
|  | qv = 125.0 кВт/л | | | | | | | | | | | | | |
| 1  2  3  4  5 | 0.801  1.005  1.213  1.411  1.605 | | 3.390  3.143  2.953  2.807  2.689 | | 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 | | 1976.9  1972.6  1967.8  1963.2  1958.7 | |
|  | qv = 150.0 кВт/л | | | | | | | | | | | | | |
| 1  2  3  4  5 | 0.806  1.010  1.206  1.412  1.609 | | 3.184  2.953  2.784  2.641  2.528 | | 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 | | 2286.2  2281.8  2276.9  2271.4  2266.1 | |

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).

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| m  параметры | 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 |
| 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11 | -1.981  -1.585  -1.188  -0.792  -0.396  0.000  0.396  0.792  1.188  1.585  1.981 | 292.0  293.1  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  343.6  336.4  326.8 |



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.