

Цветелина Петрова

РЪКОВОДСТВО ЗА КУРСОВО ПРОЕКТИРАНЕ

ПО

**ЕНЕРГИЙНИ СЪОРЪЖЕНИЯ В
ЯДРЕНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЦЕНТРАЛИ**

**Авангард Прима
София, 2021**

Ръководството за курсово проектиране е предназначено за студентите от специалност „Промислена топлоенергетика“ на Колежа по енергетика и електроника към Технически университет – София.

Ръководството съдържа методика и формули за пресмятане на курсов проект по дисциплината „Енергийни съоръжения в ядрени електрически централи“. В първата част на ръководството се определя ефективният коефициент на размножение на неутроните за реактори с вода под налягане по еднoгруппова методика, а във втората част се пресмята температурният режим на активната зона. Включен е числен пример, който представя последователността на пресмятанията. Той има за цел да облекчи работата на студентите при решаването на курсовия проект с конкретните данни на техните задания.

© Гл.ас. д-р инж. Цветелина Станимирова Петрова, автор, 2021

Рецензент: проф. д-р инж. Ивайло Гинев Ганев

ISBN 978-619-239-530-8

978-619-239-531-5 (pdf)

Авангард Прима, 2021

Съдържание

Въведение	7
Едногруппова методика за пресмятане коефициента на размножение на неутроните k	13
1.1.Геометрични характеристики на еквивалентната елементарна клетка	14
1.2.Ядрени концентрации в клетката	16
1.2.1.Ядрена концентрация в горивото	18
1.2.2.Ядрена концентрация в забавителя	19
1.2.3.Ядрена концентрация в материала на обвивката	20
1.3.Макроскопични сечения на взаимодействие на ядреното гориво	20
1.4.Определяне на коефициента на размножение на неутроните	21
1.4.1.Пресмятане на средния брой вторични бързи неутрони η	22
1.4.2.Пресмятане на коефициента на размножение на бързи неутрони ϵ	23
1.4.3.Пресмятане на вероятността за избягване на резонансно поглъщане p	24
1.4.4.Пресмятане на коефициента на използване на топлинни неутрони f	27
1.4.5.Определяне на коефициента на размножение на неутроните	29
Пресмятане на топлинния режим на активната зона	31
2.1.Хидравлични пресмятания	33
2.2.Определяне на температурите за материалите на ТОЕ по височина на АЗ за среднонатоварена касета	38
2.3.Определяне на максималните температури в ТОЕ за среднонатоварена касета и техните координати	41
2.4.Определяне на максималните температури в ТОЕ за максималнонатоварена касета и техните координати	43
Числен пример за пресмятане на курсов проект по Енергийни съоръжения в ЯЕЦ	44
3.1.Геометрични характеристики на еквивалентната елементарна клетка	44
3.2.Определяне на ядрените концентрации в клетката	46
3.2.1.Ядрена концентрация в горивото	46
3.2.2.Ядрена концентрация в забавителя	47

3.2.3. Ядрена концентрация в материала на обвивката.....	49
3.3. Макроскопични сечения на взаимодействие на ядреното гориво.....	49
3.4. Определяне на коефициента на размножение на неутроните.....	50
3.4.1. Пресмятане на средния брой вторични бързи неутрони η	50
3.4.2. Пресмятане на коефициента на размножение на бързи неутрони ϵ	50
3.4.3. Пресмятане на вероятността за избягване на резонансно поглъщане p	51
3.4.4. Пресмятане на коефициента на използване на топлинни неутрони f	54
3.4.5. Определяне на коефициента на размножение на неутроните.....	58
3.5. Пресмятане на топлинния режим на активната зона.....	61
3.5.1. Хидравлични пресмятания.....	61
3.5.2. Определяне на максималните температури в ТОЕ за среднотоварена касета и техните координати.....	66
3.5.3. Определяне на максималните температури в ТОЕ за максималнотоварена касета и техните координати.....	70
Литература.....	74

Списък на съкращенията

АЗ	Активна зона
ТОЕ	Топлоотделящ елемент
ВВЕР	Водоводен енергиен реактор
ПЕ	Поглъщащ елемент
ЯЕР	Ядрен енергиен реактор
ЯЕЦ	Ядрена електрическа централа

ВЪВЕДЕНИЕ

Ядреният реактор е основно енергийно съоръжение в една ядрена електрическа централа. В ядрения реактор протича регулируема самоподдържаща се верижна реакция на делене на тежки ядра при взаимодействието им с неутрони. При това делене се освобождава значително количество енергия, получават се продукти на деленето – нови изотопи, различни видове лъчения и неутрони. Тези неутрони се наричат бързи неутрони, защото са със средна енергия от около 2 MeV. Неутроните, получени вследствие деленето, са много важни за продължаването на верижната реакция на делене. Поглъщането на един неутрон, предизвикал делене, трябва да се компенсира най-малко от един освободен неутрон, за да може да се продължат актовете на делене. Това налага забавянето на освободените при деленето неутрони, т.е. трябва да им се отнема енергия дотогава, докато станат с топлинна енергия. За такава се приема средната енергия от 0,025eV. В процеса на забавянето си от бързи до топлинни енергии неутроните претърпяват много на брой взаимодействия с ядрата на средата. Една част от тези взаимодействия водят до получаване на нови бързи неутрони, друга част води до намаляване на броя на забавящите се неутрони. Тези процеси зависят от състава и структурата на АЗ – ядрените свойства на материалите, използвани за забавител и за обвивка на ядреното гориво, размерите и състава на активната зона и др.

За да се направи оценка дали може да протече верижна самоподдържаща се реакция на делене при определени входни данни се използва коефициентът на размножение на неутроните **k**. Той може да се представи чрез използване на модела на жизнения цикъл. Към този модел

може да се приложи методът на последователните поколения. Съгласно този метод:

$$(1) \quad k = \frac{n_{i+1}}{n_i},$$

където:

n_{i+1} – брой на неутроните от едно поколение;

n_i – брой на неутроните от предходното поколение.

Коефициентът k може да е стойност по-малка, по-голяма или равна на единица.

Ще се разгледа случай, при който ядреното гориво е природен или слабообогатен уран, т.е. ядреното гориво съдържа изотопите на ^{235}U и ^{238}U . Това е най-използваният вид ядрено гориво. Уран-235 е единственият делящ се изотоп, който се среща в природата. Природният уран е смес от изотопите на ^{234}U , който е с най-ниска концентрация – 0,006%, ^{235}U – с концентрация 0,711% и ^{238}U – 99,238%. Поради ниската концентрация на ^{234}U , този изотоп може да се пренебрегне. Обогатеният уран е уран с повишено съдържание на уран-235 спрямо природния. Реакторът е с безкрайно големи размери, активната му зона е хомогенна смес от ядрено гориво и забавител. За разглеждания случай протичат следните четири вида взаимодействия, при които се поглъщат или се получават неутрони. Балансът на неутроните се съставя въз основа на следните взаимодействия:

- ^{235}U поглъща топлинни неутрони, ядрото му се дели, получават се бързи неутрони;
- ^{238}U поглъща бързи неутрони с енергия над 1,1 MeV, дели се и се получават нови бързи неутрони;
- ^{238}U поглъща неутрони в процеса на тяхното забавяне, не се предизвиква делене;

- Горивото и забавителя поглъщат топлинни неутрони, при което няма делене.

Ако в началния момент от време в разглежданата среда има n на брой топлинни неутрона, те представляват първото поколение неутрони. Тези неутрони се поглъщат от горивото, но само една част от тях предизвикват делене на ^{235}U . Отношението на броя на неутроните, получени при деленето с топлинни неутрони към броя топлинни неутрони, погълнати от горивото се нарича **брой на вторичните бързи неутрони** и се бележи с η . Тогава $n\eta$ е броят бързи неутрони, получен при поглъщане на n топлинни неутрони. Една част от получените бързи неутрони предизвиква делене на ^{238}U . Този процес води до увеличаване на броя на бързите неутрони и се отчита чрез ϵ – **коэффициент на размножение на бързи неутрони**. Общият брой бързи неутрони, генерирани вследствие поглъщането на n на брой топлинни неутрони, се получава от произведението $n\eta\epsilon$. Тези бързи неутрони намаляват своята енергия вследствие взаимодействието си със забавителя. По време на процеса на отнемане на енергия, забавящите се неутрони преминават през областта на резонансните енергии. В тази област една част от тях се поглъща от ядрата на ^{238}U , при което не предизвикват делене. Другата част от забавящите се неутрони достига до топлинна енергия. Поглъщането в резонансната област се отчита с коэффициента p – **вероятност за избягване на резонансно поглъщане**. Той може да се представи като отношение на броя неутрони, забавени до топлинна енергия към общия брой забавящи се неутрони. Произведението $n\eta\epsilon p$ дава общия брой неутрони, забавени до топлинна енергия. Тези неутрони се поглъщат не само от ядрата на горивото, но и от ядрата на другите материали, влизащи в състава на АЗ – топлоносител, забавител, продукти на делене и др. **Коефициентът на използване на топлинните неутрони** f дава съотношението на броя неутрони, погълнати от горивото, спрямо броя

неутрони, погълнати в активната зона. Произведението $n \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot f$ дава второто поколение неутрони – броят на топлинните неутрони, погълнати от горивото, които ще предизвикат следващо делене. Съгласно горния израз за коефициента на размножение на неутроните за безкрайно голяма среда се получава:

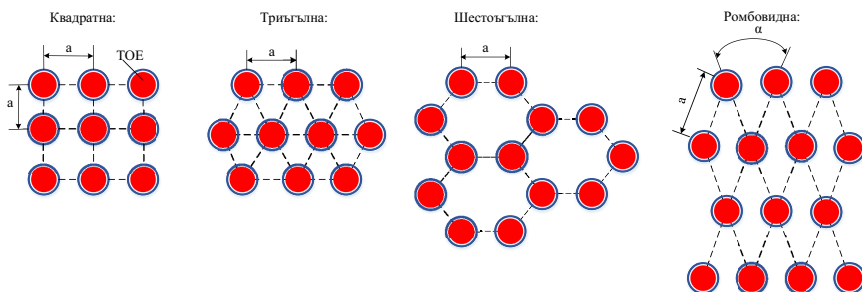
$$(2) \quad k_{\infty} = \frac{n \cdot \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f}{n} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

В хетерогенните реактори ядреното гориво е отделено от забавителя и топлоносителя посредством обвивка от конструктивен материал. Ядреното гориво и неговата защитна обвивка образуват топлоотделящ елемент (ТОЕ). Цилиндричните ТОЕ са с най-широко приложение в ядрените енергийни реактори. Активната зона на един ЯЕР е пространството, в което се разполага ядреното гориво и протича реакцията на делене. В активната зона съвкупността от всички ТОЕ образува пространствена решетка. Когато тази решетка е изградена от цилиндрични ТОЕ, АЗ представлява много на брой успоредни цилиндрични пръчки. В напречен разрез те се разполагат по ъглите на правилни геометрични фигури.

Както при хомогенните, така и при хетерогенните реактори размножаващите свойства на средата се характеризират с коефициент на размножение на неутроните k .

Настоящото ръководство представя методика за пресмятане на ефективния коефициент на размножение на неутроните за реактори с вода под налягане тип ВВЕР. Активна зона на този тип реактори е изградена от еднотипни цилиндрични ТОЕ с височина на стълба гориво в тях, равна на тази на АЗ. При реакторите с вода под налягане решетките са прости - във възелата на решетката има един топлоотделящ елемент. Теплоотделящите

елементи се разполагат на определено разстояние един от друг и в напречното сечение на реактора образуват правилна решетка. Решетките биват квадратни, триъгълни, шестоъгълни и ромбовидни (Фигура 1). Характерен параметър на решетката е стъпката a . Тя е равна на разстоянието между осевите линии на два съседни ТОЕ. Ромбовидните решетки имат още един характерен параметър – ъгъл на решетката α .

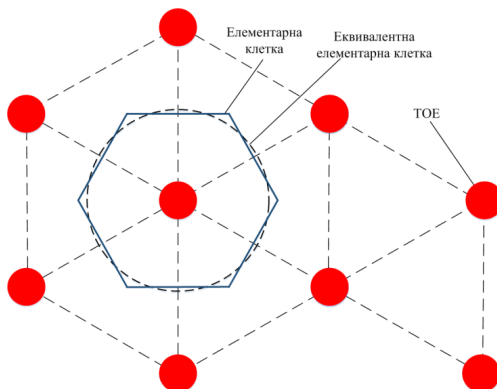


Фигура 1. Видове решетки

Когато ТОЕ са оформени във вид на цилиндрични пръти с дължина, равна на височината на АЗ, съответните обеми на горивото и забавителя са пропорционални на площта, която те заемат в АЗ. Площта може да се разглежда като обем за единица височина. В такъв случай задачата се свежда до изобразяване на решетката в една равнина и позволява нейното разглеждане като съставена от отделни клетки, в центъра на които е поставен ТОЕ.

Получените от ядреното гориво неутрони се забавят в забавителя, при което се приема, че неутроните на един ТОЕ се забавят в определен обем забавител, който се отнася към същия този ТОЕ. Трябва да се определи каква част от забавителя принадлежи към един ТОЕ и за целта се въвежда термина “**елементарна клетка**”. Площта на елементарната клетка се получава, като се раздели площта на АЗ на броя на ТОЕ. Геометричната форма на

елементарната клетка е в зависимост от типа на решетката. Например при квадратна решетка формата е квадрат, при триъгълна решетка – шестоъгълник (Фигура 2) и т.н.



Фигура 2. Елементарна клетка при триъгълна решетка

За да се опростят решаваните задачи, елементарната клетка се заменя с **еквивалентна елементарна клетка**. Нейната геометрична форма зависи от геометричната форма на ТОЕ. Елементарната шестоъгълна клетка се привежда към еквивалентна по площ цилиндрична клетка, когато ТОЕ е с цилиндрична форма (Фигура 3). Така отпада необходимостта от двумерно описание на ядрените характеристики. По този начин те зависят само от радиуса. Между отделните клетки няма материална граница - в АЗ елементарната и съответстващата ѝ еквивалентна клетка не са отделени конструктивно. Всички клетки са поставени при еднакви условия, когато се разглежда една безкрайна еднородна решетка. В такъв случай може да се разглежда само една клетка, като с **условието за огледално отразяване** на границите на клетката се отчита влиянието на съседните клетки. Това е гранично условие за еквивалентната елементарна клетка, съгласно което на

всеки неутрон, пресичащ отвътре навън границата на една клетка, съответства друг неутрон, притежаващ същата енергия, навлизащ в клетката през същата точка и под същия ъгъл спрямо нормалата. С помощта на еквивалентна елементарна клетка ще се определи ефективният коефициент на размножение на неутроните $k_{\text{эф}}$.

1. Едногрупова методика за пресмятане коефициента на размножение на неутроните k

В едногруповата методика (едногрупово приближение) се предполага, че спектърът на неутроните в целия реактор е еднакъв. Към границите на активната зона и в отражателя такова предположение не е достоверно. Въпреки това едногруповото приближение може да се използва за онагледяване и оценка на големината на ефектите, протичащи в реактора. Едногруповото приближение е метод, при който се приема, че всички неутрони в определен момент от времето са забавени до едно и също ниво на енергията и са само топлинни.

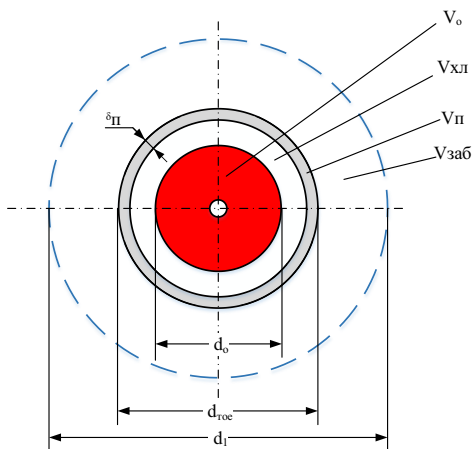
Курсовият проект по Енергийни съоръжения в ЯЕЦ включва следните пресмятания за реактор с вода под налягане:

- коефициентът на размножение на неутроните k за студено и горещо състояние;
- максималните температури на материалите по напречното сечение на ТОЕ за среднонатоварена касета;
- определяне на координатите на получените максимални температури за среднонатоварена касета по височина на АЗ;
- максималните температури на материалите по напречното сечение на ТОЕ за максималнонатоварена касета;

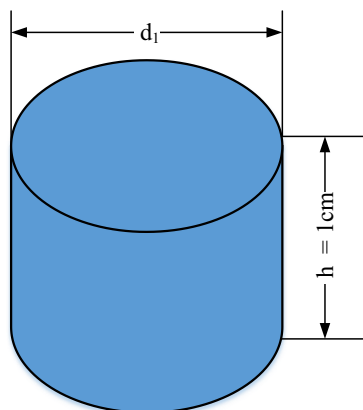
- определяне на координатите на получените максимални температури за максимално натоварена касета по височина на АЗ.

1.1. Геометрични характеристики на еквивалентната елементарна клетка

Пресмятанията са за елементарна еквивалентна клетка с височина 1 cm, показана на Фигура 4. Изчисляват се следните обеми в нея:



Фигура 3. Еквивалентна елементарна клетка



Фигура 4. Еквивалентна елементарна клетка с височина 1 cm

- Обем на горивото:

$$(3) \quad V_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4} \cdot 1 \text{ cm}^3$$

- Обем на материала на обвивката:

$$(4) \quad V_n = \frac{\pi \cdot [d_{TOE}^2 - (d_{TOE} - 2\delta_n)^2]}{4} \cdot 1 \text{ cm}^3$$

- Обем на хлабината:

$$(5) \quad V_{xl} = \frac{\pi \cdot [(d_{TOE} - 2\delta_n)^2 - d_o^2]}{4} \text{ cm}^3$$

- Обем на TOE:

$$(6) \quad V_{TOE} = \frac{\pi \cdot d_{TOE}^2}{4} \cdot 1 \text{ cm}^3$$

- Обем на елементарната клетка:

$$(7) \quad V_{кл} = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 \cdot 1 \text{ cm}^3$$

- Обем на забавителя. Забавител в този тип реактори е обикновена или т.нар. лека вода (H₂O).

$$(8) \quad V_{заб} = V_{H_2O} = V_{кл} \cdot V_{TOE} \text{ cm}^3$$

Диаметърът на еквивалентната елементарна клетка:

$$(9) \quad d_1 = \sqrt{\frac{4V_{кл}}{\pi}} \text{ cm}$$

1.2. Ядрени концентрации в клетката

Неутронните ефективни напречни сечения на взаимодействие са количествената мярка за вероятността, с която се осъществяват различните видове взаимодействия на неутроните с ядрата. Ефективната площ на едно ядро, с която то участва в определен вид ядрена реакция с един неутрон, се нарича **ефективно микроскопично напречно сечение на взаимодействие** σ . Сеченията се измерват с единица площ и за единица сечение е приета площта 10^{-24} cm^2 , която се нарича барн (b). Тази площ се получава вследствие допускането, че средният радиус на ядрото е около 10^{-12} cm^2 , следователно $1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$. Неутронните ефективни сечения зависят от вида на ядрата и от енергията на неутроните. Зависимостта има сложен характер. Стойностите на неутронните ефективни сечения се определят експериментално за определена енергия и се дават в таблици.

Макроскопичното сечение на взаимодействие на един вид ядра се получава при умножаване на микроскопичното му сечение на взаимодействие σ с ядрената му концентрация N :

$$(10) \quad \Sigma = N \cdot \sigma \text{ cm}^{-1}$$

Когато молекулата на веществото съдържа различен вид ядра, то макроскопичното сечение на взаимодействие Σ се определя посредством израза:

$$(11) \quad \Sigma = \sum_{i=1}^n N_i \cdot \sigma_i ,$$

където:

N_i – броят на ядрата от i -тия вид в 1cm^3 от веществото, ядра/ cm^3 ;

σ_i – ефективно микроскопично напречно сечение на i -тия вид ядра.

За химични съединения, когато молекулата на веществото съдържа различни видове ядра, ядрената концентрация се изчислява съгласно зависимостта:

$$(12) \quad N_{i,xc} = c_i \cdot \frac{\rho_{xc} \cdot N_a}{M_{xc}} \text{ ядра/cm}^3,$$

където:

c_i – брой атоми от i -тия вид в молекулата;

$N_{i,xc}$ – ядрена концентрация на i -тия вид ядра във веществото;

ρ_{xc} – плътност на химичното съединение, g/cm^3 ;

N_a – число на Авогадро, $N_a = 0,6022 \cdot 10^{24}$ ядра/ g ;

M_{xc} – молекулна маса на химичното съединение. Тя се изчислява по следната зависимост:

$$(13) \quad M_{xc} = \sum_{i=1}^n c_i \cdot M_i,$$

където M_i е атомна маса от i -тия вид ядра в молекулата.

Тогава за макроскопичното сечение на взаимодействие за химични съединения Σ_{xc} се получава:

$$(14) \quad \Sigma_{xc} = \frac{\rho_{xc} \cdot N_a}{M_{xc}} \sum_{i=1}^n c_i \cdot \sigma_i$$

В зависимост от видовете взаимодействия на неутроните с ядрата се дефинират и съответните микроскопични и макроскопични напречни сечения на взаимодействие:

- σ_a, Σ_a – микроскопично и макроскопично сечение на поглъщане;
- σ_f, Σ_f – микроскопично и макроскопично сечение на делене;
- σ_c, Σ_c – микроскопично и макроскопично сечение на поглъщане;
- σ_s, Σ_s – микроскопично и макроскопично сечение на разсейване;

1.2.1. Ядрена концентрация в горивото

Молекулна маса на горивото:

$$(15) \quad M_{UO_2} = M_5 \cdot c_5 + M_8 \cdot (1 - c_5) + 2 \cdot M_{O_2},$$

където:

M_5 – атомна маса на ^{235}U , $M_5 = 235$;

M_8 – атомна маса на ^{238}U , $M_8 = 238$;

M_{O_2} – атомна маса на кислорода, $M_{O_2} = 16$.

Ядрена концентрация на ^{235}U в единица обем от горивото:

$$(16) \quad N_5 = c_5 \cdot \rho_{UO_2} \cdot \frac{N_a}{M_{UO_2}} \text{ ядра/cm}^3$$

Ядрена концентрация на ^{238}U в единица обем от горивото:

$$(17) \quad N_8 = (1 - c_5) \cdot \rho_{UO_2} \cdot \frac{N_a}{M_{UO_2}} \text{ ядра/cm}^3$$

Ядрена концентрация на кислорода в единица обем от горивото:

$$(18) \quad N_{O_2}^G = c_{O_2} \cdot \rho_{UO_2} \cdot \frac{N_a}{M_{UO_2}} \text{ ядра/cm}^3$$

1.2.2. Ядрена концентрация в забавителя

Молекулната маса на забавителя се изчислява по зависимостта:

$$(19) \quad M_{H_2O} = 2 \cdot M_{H_2} + M_{O_2},$$

където M_{H_2} е атомна маса на водорода.

Ядрена концентрация на H_2 в единица обем от забавителя:

$$(20) \quad N_{H_2} = 2 \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{N_a}{M_{H_2O}} \text{ ядра/cm}^3,$$

където ρ_{H_2O} е плътността на водата.

Ядрена концентрация на кислорода в единица обем от забавителя:

$$(21) \quad N_{O_2} = \rho_{H_2O} \cdot \frac{N_a}{M_{H_2O}} \text{ ядра/cm}^3$$

1.2.3. Ядрена концентрация в материала на обвивката

В реакторите с вода под налягане обвивките на ТОЕ са от цирконий. Ядрената концентрация се пресмята по следната зависимост:

$$(22) \quad N_{Zr} = \frac{N_a}{M_{Zr}} \rho_{Zr} \text{ ядра/cm}^3,$$

където:

ρ_{Zr} – плътност на циркониевата обвивка на ТОЕ;

M_{Zr} – атомна маса на циркония.

1.3. Макроскопични сечения на взаимодействие на ядреното гориво

Макроскопично сечение на поглъщане на горивото:

$$(23) \quad \Sigma_{a,o} = \sigma_{a,5} \cdot N_5 + \sigma_{a,8} \cdot N_8 + \sigma_{a,O_2} \cdot N_{O_2}^G \text{ cm}^{-1},$$

където σ_a е микроскопичното напречно сечение на поглъщане на топлинни неутрони за съответния изотоп. Табличните сечения на поглъщане са дадени в Таблица 1.

Макроскопично сечение на разсейване на горивото:

$$(24) \quad \Sigma_{s,o} = \sigma_{s,5} \cdot N_5 + \sigma_{s,8} \cdot N_8 + \sigma_{s,O_2} \cdot N_{O_2}^G \text{ cm}^{-1},$$

където σ_s е микроскопичното напречно сечение на разсейване на топлинни неутрони за съответния изотоп. Табличните сечения на разсейване са дадени в Таблица 1.

Таблица 1. Микроскопични ефективни напречни сечения на някои нуклиди за неутрони с топлинна енергия (0,025eV)

Нуклид	σ_a [b]	σ_s [b]
U ²³⁵	680,9	13,8
U ²³⁸	2,7	8,9
O ₂	0,00027	3,76
H ₂	0,332	20,4
Zr	0,185	

1.4. Определяне на коефициента на размножение на неутроните

Размножаващите свойства на средата се характеризират с коефициент на размножение на неутроните k . С помощта на формула на четирите множителя се определя коефициента на размножение на неутроните в безкрайна среда k_{∞} . С допускането за реактор с безкрайно големи размери се опростява задачата, защото по този начин няма загуби на неутрони вследствие на изтичане от средата. След намиране на k_{∞} се определя и коефициентът на размножение на неутроните за среда с крайни размери $k_{\text{эф}}$.

В настоящото ръководство за курсово проектиране зависимостите, които се използват за пресмятане на четирите множителя, са за тесни решетки. От този тип са решетките в реакторите с вода под налягане. Тесни решетки са тези, при които дължината на свободен пробег при разсейване на неутроните λ_s е по-малка от стъпката a , с която се разполагат ТОЕ. Дължината на свободен пробег при разсейване е функция на

макроскопичното сечение на разсейване на забавителя Σ_s , т.е. зависи от ядрените свойства на средата. Стойността на λ_s се определя по зависимостта:

$$(25) \quad \lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s} \text{ cm}$$

1.4.1. Пресмятане на средния брой вторични бързи неутрони η

Това е коефициент, даващ средния брой вторични бързи неутрони, получени при поглъщането от ядрата на дялящите се нуклиди на един топлинен неутрон. Има взаимодействия на топлинните неутрони с ядрата на горивото, при които неутроните не предизвикват делене. Процесът, при който ядрото, погълнало неутрон, не се дели, се нарича радиационно залавяне. В случай, когато ядреното гориво е смес от няколко изотопа, η зависи от концентрацията на отделните изотопи и от техните микроскопични сечения на взаимодействие. В разглеждания случай ядреното гориво е слабообогатен уран, т.е. със степен на обогатяване до 5%. Такова гориво се състои от изотопите на ^{235}U и ^{238}U . И двата изотопа поглъщат топлинни неутрони, но само ^{235}U се дели от тях. Коефициентът η се изчислява по уравнението:

$$(26) \quad \eta = \frac{\eta_5}{1 + \frac{1 - c_5}{c_5} \cdot \frac{\sigma_{a,8}}{\sigma_{a,5}}},$$

където:

η_5 – броят вторичните неутрони, получени при делене на едно ядро на с неутрон с топлинна енергия.

1.4.2. Пресмятане на коефициента на размножение на бързи неутрони ϵ

Този коефициент отчита деленето на ядрата от бързи неутрони. За ^{238}U този процес е възможен при енергия на неутрона над граничната енергия от приблизително 1,1MeV. При слабообогатен уран ядрената концентрация на ^{238}U многократно превишава ядрената концентрация на ^{235}U , а сеченията им на делене са от един порядък. По тази причина коефициентът на размножение на бързи неутрони отчита само получаваните неутрони вследствие деленето на ядрата на ^{238}U . Този коефициент дава отношението на броя неутрони, получени вследствие деленето на ядрата с бързи и топлинни неутрони към броя на неутроните, получени вследствие деленето на ядрата само с топлинни неутрони. За реакторите на топлинни неутрони ϵ е в порядъка 1,02÷1,05, т.е. приходът на бързи неутрони е (2÷5)%. Най-висок е коефициентът на размножение на бързите неутрони за реактори с тесни решетки. Това се дължи на т.нар. „кръстосан ефект“. Той се състои в следното: бързи неутрони от един стълб гориво могат да попаднат в съседен стълб гориво като бързи и там да осъществят първо си взаимодействие. Тъй като горивото е отделено от забавителя, има голяма вероятност първото им взаимодействие да е с ядра на ^{238}U , да ги разделят и да се генерират нови бързи неутрони. Коефициентът ϵ се изчислява за студено (c) и за горещо (z) състояние по следната зависимост:

$$(27) \quad \epsilon = 1 + \frac{0,168}{1 + \frac{\alpha_r \cdot \rho_{H_2O}}{(1 - c_5) \cdot \rho_{UO_2}} \cdot \frac{V_{H_2O}}{V_o}},$$

където α_r е параметър, зависещ от вида на горивото.

1.4.3. Пресмятане на вероятността за избягване на резонансно поглъщане p

След генерирането си бързите неутрони взаимодействат с ядрата на средата, в която се разпространяват. В процеса на взаимодействието си една част от тях губи на порции своята енергия, т.е. забавя се, а друга част се поглъща непродуктивно от т.нар. резонансни поглъщатели. В реактори с ядрено гориво слабообогатен уран основен резонансен поглъщател е уран-238. Вероятността за избягване на резонансно поглъщане представлява отношението на броя неутрони от една генерация, преминали през резонансната област, т.е. забавени до топлинни енергии към общия брой забавящи се неутрони с енергии над резонансната. Определянето на този множител зависи от избрания метод за описание на жизнения цикъл на неутроните. При едноруповия метод той се прекъсва в областта на топлинните енергии на неутроните. В тази област част от неутроните предизвикват делене, а част от тях се поглъщат без делене. За елементарна клетка, която се състои от гориво и забавител, за цялата резонансна област p се определя посредством уравнението:

$$(28) \quad p = \exp \left(- \frac{N_8 V_0}{(\xi \cdot \Sigma_s)_{H_2O} V_{H_2O}} I_{ef} \right),$$

където I_{ef} е ефективният резонансен интеграл и има размерност 10^{-24} cm^2 или барн [b]. Това е ефективно сечение на поглъщане, отнесено към цялото множество на ядрата в масата на горивото. I_{ef} се изчислява по зависимостта:

$$(29) \quad I_{ef} = \left(A + B \sqrt{\frac{S}{M}} \cdot \Pi_o \cdot \Pi_{вт} \cdot \Pi_T \right) \cdot 10^{-24},$$

където:

A – коефициент, определящ обемното поглъщане, зависещ от вида на ядреното гориво;

B – коефициент, определящ повърхностното поглъщане, зависещ от вида на ядреното гориво;

S – околна повърхнина на горивния блок, изчислена чрез:

$$(30) \quad S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d_o}{2} \cdot 1 = \pi \cdot d_o \text{ cm}^2;$$

M – маса на горивото, която се изчислява по уравнението:

$$(31) \quad M = V_o \cdot \rho_{uo_2} \text{ g}$$

Π_o – поправка, отчитаща наличието на леки елементи в обема на горивото:

$$(32) \quad \Pi_o = 1 + \frac{d_o}{1,27} \cdot f_{O_2} \cdot N_{O_2}^G \cdot \sigma_{s,O_2},$$

където параметърът f_{O_2} се изчислява по зависимостта:

$$(33) \quad f_{O_2} = 1 - \frac{0,01661 \cdot (M_{O_2} + 1)^2}{M_{O_2}}$$

Пресмятане на $\Pi_{вл}$ – поправка за взаимно влияние на съседни ТОЕ:

$$(34) \quad \Pi_{вл} = \frac{2,42}{2,397 + \frac{4 \cdot V_o}{1,464 \cdot \pi \cdot d_o \cdot V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}}$$

С увеличаване на температурата намалява максималното сечение на поглъщане за даден резонанс и се увеличава неговата широчина. Резултатът е повишено резонансното поглъщане. Този ефект се отчита с P_T -температурна поправка:

- за студено състояние $P_T^c = 1$
- за горещо състояние:

$$(35) \quad P_T^c = 0,775(1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{\bar{T}}),$$

където:

$$(36) \quad \bar{T} = 0,4(T_{o,G} - T_{cm,G}) + T_{cm,G},$$

където:

\bar{T} – средна температура на горивото, К;

$T_{o,G}$ – температура в центъра на горивото, К;

$T_{cm,G}$ – температура на стената на горивото, К.

Забавящата способност на забавителя напълно определя забавящата способност на елементарната клетка. Забавящата способност се пресмята за студено и за горещо състояние на забавителя:

$$(37) \quad (\xi \Sigma_s)_{заб} = \sum_{i=1}^n \xi_i \cdot \sigma_{s,i} \cdot N_i \text{ cm}^{-1},$$

където ξ_i е параметър на забавяне за i -тия вид ядра.

Горният израз може да се преобразува във вида:

$$(38) \quad (\xi \Sigma_s)_{H_2O} = \xi_{H_2} \cdot \sigma_{s,H_2} \cdot N_{H_2} + \xi_{O_2} \cdot \sigma_{s,O_2} \cdot N_{O_2} \text{ cm}^{-1}$$

1.4.4. Пресмятане на коефициента на използване на топлинни неутрони f

Той представлява отношението на броя топлинни неутрони, погълнати в горивото на елементарната клетка към броя неутрони, погълнати в елементарната клетка.

Пресмятане на макроскопичното сечение на поглъщане в забавителя:

$$(39) \quad \Sigma_{a,H_2O} = \sigma_{a,H_2} \cdot N_{H_2} + \sigma_{a,O_2} \cdot N_{O_2} \text{ cm}^{-1}$$

Реципрочната стойност на дължината на дифузия в горивото е:

$$(40) \quad \chi_0 = \sqrt{3 \cdot \Sigma_{a,o} \cdot \Sigma_{s,o}} \text{ cm}^{-1}$$

Изчисляване на коефициента на вътрешния блоков ефект:

$$(41) \quad Q = 1 + \frac{(\chi_o \cdot r_o)^2}{8} - \frac{(\chi_o \cdot r_o)}{198},$$

където r_0 е радиусът на горивото, $r_0 = d_0/2$ cm.

Макроскопичното сечение на разсейване на забавителя:

$$(42) \quad \Sigma_{s,H_2O} = \sigma_{s,H_2} \cdot N_{H_2} + \sigma_{s,O_2} \cdot N_{O_2} \text{ cm}^{-1}$$

Реципрочната стойност на дължината на дифузия в забавителя:

$$(43) \quad \chi_1 = \sqrt{3 \cdot \Sigma_{a,H_2O} \cdot \Sigma_{s,H_2O}} \text{ cm}^{-1}$$

Изчисляване на параметър A_q :

$$(44) \quad A_q = \frac{r_1^2}{r_1^2 - r_0^2} \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} + \frac{r_0^2}{4r_1^2},$$

където $r_1 = d_1/2$ cm

Макроскопично сечение на поглъщане на обвивката:

$$(45) \quad \Sigma_{a,n} = \sigma_{a,Zr} \cdot N_{Zr} \text{ cm}^{-1}$$

Относителното непродуктивно поглъщане на неутрони в забавителя спрямо горивото q (относителен дял на вредното поглъщане) се оценява по следната зависимост:

$$(46) \quad q = \frac{1-f}{f} = \frac{\Sigma_{a,H_2O} \cdot V_{H_2O}}{\Sigma_{a,o} \cdot V_o} \cdot Q + \frac{(\chi_1)^2 \cdot (r_1^2 - r_{TOE}^2)}{2r_{TOE}^2} \cdot A_q + \frac{\Sigma_{a,n} \cdot V_n}{\Sigma_{a,o} \cdot V_o} \cdot Q$$

Коефициентът на използване на топлинни неутрони се изчислява по зависимостта:

$$(47) \quad f = \frac{1}{1+q}$$

1.4.5. Определяне на коефициента на размножение на неутроните

Коефициентът на размножение на неутроните за безкрайно голяма среда k_{∞} се изчислява по формулата на четирите множителя:

$$(48) \quad k_{\infty} = \eta \cdot \epsilon \cdot p \cdot f$$

Изчисляване на вероятността да се избегне изтичането на неутрони от АЗ в процеса на забавяне:

$$(49) \quad P_1 = e^{-B^2 \cdot \tau}$$

където:

B^2 – геометричен параметър;

τ – възраст на неутроните.

За цилиндрична активна зона геометричният параметър се изчислява по следната зависимост:

$$(50) \quad B^2 = \left(\frac{2,405}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H} \right)^2$$

При $\tau_{H_2O} = 26,5 \text{ cm}^2$ се пресмята възрастта на неутроните:

$$(51) \quad \tau = \tau_{H_2O} \left(\frac{1 + \frac{V_o + V_n}{V_{H_2O}}}{\rho_{H_2O} + \frac{0,82 \cdot V_o + 0,4 \cdot V_n}{V_{H_2O}}} \right)^2, \text{ cm}^2$$

Вероятност неутроните да не напуснат активната зона в процеса на тяхната дифузия за студено и за горещо състояние:

$$(52) \quad P_2 = \frac{1}{1 + L^2 \cdot B^2},$$

където L^2 е квадрата на дължината на дифузия на неутроните в забавителя, който се изчислява по зависимостта:

$$(53) \quad L^2 = \left(\frac{2,72}{\rho_{H_2O}} \right)^2 \cdot \frac{(293 + t) \cdot 1,0614}{293 \left(1 + 0,6014 \sqrt{\frac{273 + t}{293}} \right)}, \text{ cm}^2$$

Определянето на ефективния коефициент на размножение на неутроните е по уравнението:

$$(54) \quad k_{ef} = k_{\infty} \cdot P_1 \cdot P_2$$

За да бъде критичен реакторът, е необходимо:

$$(55) \quad k_{ef} = k_{\infty} \cdot P_1 \cdot P_2 = 1$$

Критичен ЯР е такъв реактор, в който верижната реакция на делене протича с постоянна скорост. Ако $k_{ef} > 1$, то тогава реакторът е надкритичен, т.е. неговата мощност нараства. При $k_{ef} < 1$ реакторът е подкритичен.

2. Пресмятане на топлинния режим на активната зона

В обема на ядрения реактор топлоотделянето е неравномерно. Това се дължи на много причини, основната е неравномерното разпределение на неутронния поток в обема на активната зона. Топлинният режим на работа на активната зона се характеризира чрез нейния максимален топлинен поток, максималната температура и др. Неравномерността на топлоотделянето се дължи на следните фактори:

- Неравномерност на неутронния поток по височина на активната зона, отчита се чрез коефициента k_z ;
- Неравномерност на неутронния поток по радиус на активната зона, отчита се посредством коефициента на неравномерност по радиус на АЗ k_r ;
- Горивните касети в един ЯР са с различно обогатяване и това води до локални неравномерности, отчитани чрез коефициента k_E ;
- В зависимост от размерите на горивната касета и конструктивните особености на АЗ, топлоотделянето в напречното сечение на една касета не е еднакво. Съществуващата локална неравномерност се отчита с коефициента k_k ;
- Дори в рамките на регламентирания допуск съществуват разлики в геометричните размери на горивните касети и това води до локални неравномерности, отчитани чрез механичния коефициент k_m .

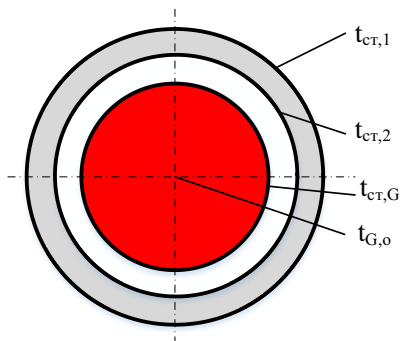
Първите два коефициента оказват най-голямо влияние върху топлоотделянето, поради което в настоящото ръководство те се вземат под внимание при изчисляване на стойностите на топлинния поток. Произведението $k_z \cdot k_r$ дава стойността на обемния коефициент на неравномерност k_v . Общият коефициент на неравномерност на топлоотделянето е произведение от всички коефициенти на неравномерност.

Коефициентът на неравномерност може да се дефинира като максималната плътност на топлоотделянето (топлинния поток) в активната зона към средната плътност на топлоотделянето в активната зона.

В тази част на курсовия проект се пресмятат температурните полета и температурния режим на един цилиндричен ТОЕ като целта е да се оцени безопасната работа на ТОЕ. При зададени топлинна мощност на реактора и коефициенти на неравномерност е необходимо:

- Да се пресметнат максималните температури по напречно сечение на ТОЕ за среднонатоварена и за максималнонатоварена касета;
- Да се анализират получените резултати и оценят максималните стойности на температурите спрямо допустимите.

От голямо значение за безопасната експлоатация на един ядрен реактор е поддържането на температурите в ТОЕ в допустими граници. По тази причина се пресмятат следните характеризиращи ги температури, показани на Фигура 5: температура на външната стена на циркониевата обвивка на ТОЕ $t_{ст,1}$, температура на вътрешната стена на циркониевата обвивка на ТОЕ $t_{ст,2}$, температура на външната стена на горивната таблетка $t_{ст,G}$ и температура в центъра на горивната таблетка $t_{G,0}$.



Фигура 5. Пресмятани температури, характеризиращи работата на ТОЕ

При работа на ядрения реактор не се допуска превишаване на температурата на циркониевата обвивка над 350°C. За циркониева сплав и вода тази граница е от гледна точка на корозионна устойчивост. Температурата на топене на циркониевата сплав е 1845°C. Температурата на топене на UO₂ е 2650°C за облъчен материал.

За нуждите на пресмятанията в този раздел необходимите конструктивни и режимни параметри са дадени в Таблица 2.

2.1. Хидравлични пресмятания

Разходът на топлоносител през реактора се пресмята по уравнението:

$$(56) \quad G_T = \frac{Q_p}{c_p(t_{изх} - t_{вх})} \text{ kg/s,}$$

където:

Q_p – топлинна мощност на реактора, W;

c_p – специфичен топлинен капацитет на водата при постоянно налягане, J/kg.K;

$t_{изх}$ – температура на топлоносителя на изхода на АЗ, °C;

$t_{вх}$ – температура на топлоносителя на входа на АЗ, °C.

Средният разход на топлоносител през една касета се получава от израза:

$$(57) \quad G_k = \frac{G_T}{n_k} \text{ kg/s,}$$

където n_k е броят касети с ядрено гориво в АЗ на ядрения реактор.

Линейната плътност на топлинния поток за един ТОЕ и средноатоварена касета се пресмята чрез израза:

$$(58) \quad \bar{q}_l = \frac{Q_p}{H_{A3} \cdot n_k \cdot n_{TOE}} \text{ W/m}$$

Максималната стойност на линейната плътност на топлинния поток за средноатоварена касета и косинусов закон на енергоотделянето по височина на активната зона се получава от уравнението:

$$(59) \quad \bar{q}_{l,o} = \bar{q}_l \cdot k_z \text{ W/m}$$

Максималната линейна плътност на топлинния поток за централна касета при Беселов закон на енергоотделяне по радиуса на АЗ се определя с помощта на обемния коефициент на неравномерност на топлоотделянето:

$$(60) \quad q_{l,o}^{\max} = \bar{q}_l \cdot k_v = \bar{q}_l \cdot k_z \cdot k_r \text{ W/m}$$

Изчисляване на проходното сечение на касетата f_k :

$$(61) \quad f_k = \frac{\sqrt{3}}{2} a_k^2 - \frac{\pi \cdot d_{TOE}^2 \cdot n_{TOE}}{4} - \frac{\pi \cdot d_{mp}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{nel}^2 \cdot n_{nel}}{4} \text{ m,}$$

където:

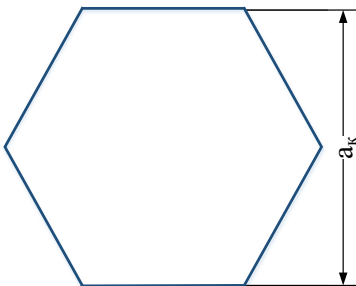
a_k – размер на горивната касета “под ключ” (Фигура 6);

d_{nel} – диаметър на поглъщащите елементи в горивната касета;

$n_{нел}$ – брой на поглъщащите елементи в една горивна касета (само за ВВЕР -1000);

d_{mp} – диаметър на централната тръбичка на горивната касета;

$n_{ТОЕ}$ – брой на топлоотделящите елементи в една горивна касета.



Фигура 6. Размер на горивната касета „под ключ“

Периметърът на канала на горивната касета се изчислява съгласно уравнението:

$$(62) \quad \Pi_k = \frac{6 \cdot a_k}{\sqrt{3}} + \pi \cdot d_{ТОЕ} \cdot n_{ТОЕ} + \pi \cdot d_{нел} \cdot n_{нел} + \pi \cdot d_{mp} \cdot n_{mp} \text{ m}$$

Изчисляване на еквивалентния диаметър на горивната касета:

$$(63) \quad d_{екв} = \frac{4 \cdot f_k}{\Pi_k} \text{ m}$$

Изчисляване на скоростта на топлоносителя в горивната касета:

$$(64) \quad w = \frac{G_k \cdot \varrho_{H_2O}}{f_k} \text{ m/s,}$$

където ϱ_{H_2O} е специфичен обем на водата, отчетен от Парни таблици.

$$(65) \quad Re = \frac{w \cdot d_{екв}}{\mu_{H_2O} \cdot \varrho_{H_2O}},$$

където μ_{H_2O} е динамичен вискозитет на водата.

Определянето на числото на Прандтл е по зависимостта:

$$(66) \quad Pr = \frac{\mu_{H_2O} \cdot c_p}{\lambda_{H_2O}},$$

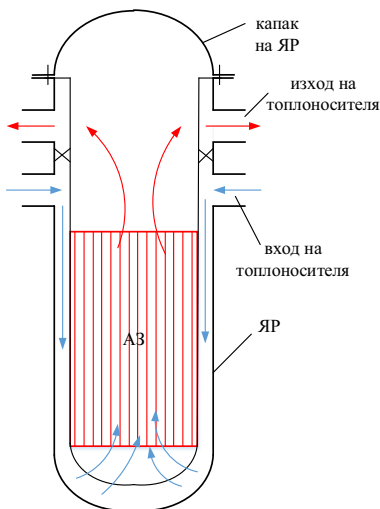
където λ_{H_2O} е коефициент на топлопроводност на водата.

Коефициентът на конвективен топлообмен се пресмята по следната зависимост:

$$(67) \quad \alpha = 0,021 \cdot \frac{\lambda_{H_2O}}{d_{екв}} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \text{ W/m}^2\text{K}$$

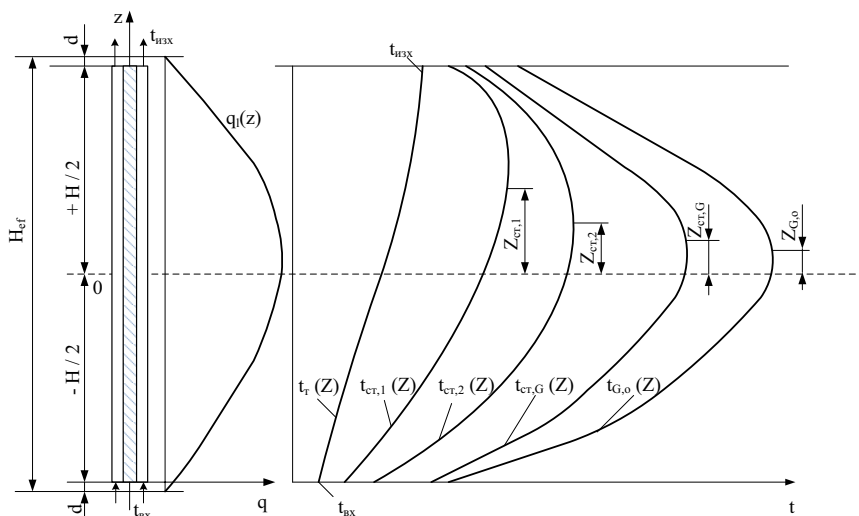
Безопасната работа на един ядрен реактор е в пряка зависимост от безопасната работа на ТОЕ в активната му зона. При експлоатацията на един ЯР задължително се следи температурата в него. По дължина на ТОЕ изменението на температурата на топлоносителя зависи от вида и геометричната форма на ТОЕ и на канала, от входната и изходни температури на канала и др. Температурният режим на ТОЕ зависи от много фактори - скорост на топлоносителя, плътност на топлинния поток, неравномерност на енергоотделянето.

При реакторите с вода под налягане, какъвто е ВВЕР-1000, топлоносителят се подава в долната част на АЗ и се отвежда от горната част, както е показано на Фигура 7.



Фигура 7. Принципна схема на реактор с вода под налягане

Ще бъде разгледан канал с един цилиндричен ТОЕ и симетрично охлаждане, както е показано на Фигура 8. Каналът и ТОЕ имат постоянна геометрична форма и размери по дължината си. Теплоотделянето по височина на АЗ се приема, че се описва от косинусова функция и с $q_1(z)$ е показано изменението на линейната плътност на топлинния поток по височина на АЗ. С H е означена дължината на ТОЕ, която е равна на височината на АЗ на ядрения реактор. H_{ef} е дължината заедно с ефективната добавка d : $H_{ef} = H + 2d$. При $z = H_{ef}/2$ и при $z = -H_{ef}/2$ неутронният поток е равен на нула. При реактори с топлинни неутрони може да се приеме, че $H \approx H_{ef}$. Началото на координатната система е в геометричния център на ТОЕ, защото теплоотделянето е симетрично. Оста z е насочена по оста на канала. Максимални температури на топлоносителя и на материалите на ТОЕ се получават във втората половина на канала по хода на топлоносителя.



Фигура 8. Изменение на температурите по дължина на ТОЕ

2.2. Определяне на температурите за материалите на ТОЕ по височина на АЗ за среднотоварена касета

Разходът на топлоносител, отнесен към един ТОЕ, се получава от уравнението:

$$(68) \quad G_{TOE} = \frac{G_k}{n_{TOE}} \text{ kg/s}$$

Промяната на температурата на топлоносителя по височина на активната зона се описва със следното уравнение:

$$(69) \quad t_T(z) = t_{вх} + \frac{\Delta t}{2} + A \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{ef}}\right) \text{ } ^\circ\text{C},$$

където:

z – текуща координата по височина на активната зона.

A – параметър, чиято стойност е половината от температурната разлика между температурите на топлоносителя на вход в активната зона и на изхода от нея:

$$(70) \quad A = \frac{q_{l,o} \cdot H_{ef}}{\pi \cdot G_{TOE} \cdot c_p}$$

Температурата на външната стена на обвивката на ТОЕ по височина на активната зона се променя по следната зависимост:

$$(71) \quad t_{cm,1}(z) = t_T(z) + B_1 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{ef}}\right) \text{ } ^\circ\text{C},$$

където B_1 е параметър, отразяващ разликата между температурите на топлоносителя и на външната стена на обвивката на ТОЕ при $z = 0$:

$$(72) \quad B_1 = \frac{q_{l,o}}{\pi \cdot d_{TOE} \cdot \alpha}$$

Промяната на температурата на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ е съгласно уравнението:

$$(73) \quad t_{cm,2}(z) = t_{cm,1}(z) + B_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{ef}}\right) \text{ } ^\circ\text{C},$$

където B_2 е величина, даваща температурната разлика на температурите на вътрешната и на външната стени на обвивката на ТОЕ при $z = 0$. B_2 се получава от следната зависимост:

$$(74) \quad B_2 = \frac{q_{l,o}}{2\pi \cdot \lambda_{cm}} \ln \frac{d_{TOE}}{d_2},$$

където:

λ_{cm} – коефициент на топлопроводност на стената на ТОЕ;

$d_2 = d_{moe} - 2\delta_n$, m .

Температурата на стената на горивото по височина на активната зона се променя съгласно израза:

$$(75) \quad t_{cm,G}(z) = t_{cm,2}(z) + B_3 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{ef}}\right) \text{ } ^\circ\text{C},$$

където B_3 е величина, даваща разликата между температурите на вътрешната стена на обвивката и външната стена на горивната таблетка:

$$(76) \quad B_3 = \frac{q_{l,o}}{2\pi \cdot \lambda_{He}} \ln \frac{d_2}{d_o},$$

където λ_{He} - коефициент на топлопроводност за хелиевата хлабина.

Температурата в центъра на горивото (на горивната таблетка) се определя посредством уравнението:

$$(77) \quad t_{G,o}(z) = t_{cm,G}(z) + B_4 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{ef}}\right) \text{ } ^\circ\text{C},$$

където параметърът B_4 се изчислява по зависимостта:

$$(78) \quad B_4 = \frac{q_{l,o}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_G},$$

където λ_G е коефициент на топлопроводност на ядреното гориво.

2.3. Определяне на максималните температури в ТОЕ за среднатоварена касета и техните координати

Изчисляване на максималната температура на външната стена на циркониевата обвивка на ТОЕ по височина на активната зона:

$$(79) \quad t_{cm,1} = t_{ex} + \frac{\Delta t}{2} + B_1 \sqrt{1 + \left(\frac{A}{B_1}\right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на максималната температура $t_{cr,1}$:

$$(80) \quad z_{cm,1} = \frac{H_{ef}}{\pi} \operatorname{actg} \left(\frac{A}{B_1} \right) \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура на вътрешната стена на циркониевата обвивка по височина на активната зона:

$$(81) \quad t_{cm,2} = t_{ex} + \frac{\Delta t}{2} + (B_1 + B_2) \sqrt{1 + \left(\frac{A}{B_1 + B_2}\right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на максималната температура $t_{ct,2}$:

$$(82) \quad z_{cm,2} = \frac{H_{ef}}{\pi} \operatorname{actg} \left(\frac{A}{B_1 + B_2} \right) \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура на външната повърхност на горивната таблетка $t_{ct,G}$:

$$(83) \quad t_{cm,G} = t_{ex} + \frac{\Delta t}{2} + (B_1 + B_2 + B_3) \sqrt{1 + \left(\frac{A}{B_1 + B_2 + B_3} \right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на изчислената максимална температура:

$$(84) \quad z_{cm,G} = \frac{H_{ef}}{\pi} \operatorname{actg} \left(\frac{A}{B_1 + B_2 + B_3} \right) \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура в центъра на горивната таблетка:

$$(85) \quad t_{G,o} = t_{ex} + \frac{\Delta t}{2} + (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) \sqrt{1 + \left(\frac{A}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4} \right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на максималната температура $t_{G,o}$:

$$(86) \quad z_{G,o} = \frac{H_{ef}}{\pi} \operatorname{actg} \left(\frac{A}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4} \right) \text{ m}$$

2.4. Определяне на максималните температури в ТОЕ за максимално-натоварена касета и техните координати

За определяне на максималните температури за максималнонатоварена касета и техните координати по височина на ТОЕ, аналогично на уравнения (70), (72), (74), (76) и (78), трябва да се изчислят параметрите A , B_1 , B_2 , B_3 и B_4 , но за разглеждания случай в изчислителните им зависимости ще бъде включена максималната линейна плътност на топлинния поток за централна касета $q_{l,o}^{\max}$:

$$(87) \quad A = \frac{q_{l,o}^{\max} \cdot H_{ef}}{\pi \cdot G_{TOE} \cdot c_p}$$

$$(88) \quad B_1 = \frac{q_{l,o}^{\max}}{\pi \cdot d_{TOE} \cdot \alpha}$$

$$(89) \quad B_2 = \frac{q_{l,o}^{\max}}{2\pi \cdot \lambda_{cm}} \ln \frac{d_{TOE}}{d_2}$$

$$(89) \quad B_3 = \frac{q_{l,o}^{\max}}{2\pi \cdot \lambda_{H_2O}} \cdot \ln \frac{d_1}{d_o}$$

$$(90) \quad B_4 = \frac{q_{l,o}^{\max}}{4\pi \cdot \lambda_G}$$

3. Числен пример за пресмятане на курсов проект по Енергийни съоръжения в ЯЕЦ

Съгласно входните данни от Таблица 2, за ЯЕР тип ВВЕР-1000, да се пресметнат:

- коефициентът на размножение на неутроните k за студено и горещо състояние;
- максималните температури на материалите по напречното сечение на ТОЕ за среднонатоварена касета;
- координатите на получените максимални температури за среднонатоварена касета по височина на АЗ;
- максималните температури на материалите по напречното сечение на ТОЕ за максималнонатоварена касета;
- координатите на получените максимални температури за максималнонатоварена касета по височина на АЗ.

3.1. Геометрични характеристики на еквивалентната елементарна клетка

Пресмятане на:

- Обем на горивото:

$$V_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4} \cdot 1 = \frac{3,14 \cdot 0,75^2 \cdot 1}{4} = 0,44156 \text{ cm}^3$$

- Обем на материала на обвивката:

$$V_n = \frac{\pi \cdot [d_{TOE}^2 - (d_{TOE} - 2\delta_n)^2]}{4} \cdot 1 = \frac{3,14 \cdot [0,91^2 - (0,91 - 2 \cdot 0,07)^2]}{4} = 0,1846 \text{ cm}^3$$

- Обем на хлабината:

$$V_{xl} = \frac{\pi \cdot [(d_{TOE} - 2\delta_n)^2 - d_o^2]}{4}$$

$$V_{xl} = \frac{3,14 \cdot [(0,91 - 2 \cdot 0,07)^2 - 0,75^2]}{4} = 0,02386 \text{ cm}^3$$

- Обем на ТОЕ:

$$V_{TOE} = \frac{\pi \cdot d_{TOE}^2}{4} \cdot 1 = \frac{3,14 \cdot 0,91^2}{4} = 0,6500585 \text{ cm}^3$$

- Обем на елементарната клетка:

$$V_{кл} = \frac{\sqrt{3}}{2} a^2 \cdot 1 = \frac{\sqrt{3}}{2} 1,27^2 = 1,3968 \text{ cm}^3$$

- Обем на забавителя:

$$V_{H_2O} = V_{кл} - V_{TOE} = 1,3968 - 0,6500585 = 0,74675 \text{ cm}^3$$

- Диаметър на еквивалентната елементарна клетка:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4V_{кл}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,3968}{3,14}} = 1,3339 \text{ cm}$$

Таблица 2. Входни данни за курсов проект по Енергийни съоръжения в ЯЕЦ

Диаметър на обвивката на ТОЕ	$d_{\text{тое}}$, mm	9,1
Дебелина на обвивката	δ_n , mm	0,7
Диаметър на ядреното гориво	d_0 , mm	7,5
Степен на обогатяване на ядреното гориво	c_5 [%]	3,3
Коефициент на неравномерност по радиус на активната зона	k_r	1,3
Коефициент на неравномерност по височина на активната зона	k_z	1,57
Ядрено гориво		UO ₂
Тип решетка		триъгълна
Стъпка на решетката	a , mm	12,7
Плътност на обвивката	ρ_n , g/cm ³	6,44
Плътност на горивото	ρ_{UO_2} , g/cm ³	9,85

3.2. Определяне на ядрените концентрации в клетката

3.2.1. Ядрена концентрация в горивото

Броят атоми на ²³⁵U се изчислява съгласно заданието от Таблица 2:

$$c_5 = c_5 [\%] / 100 = 3,3/100 = 0,033$$

Изчисляване на молекулната маса на ядреното гориво:

$$M_{UO_2} = M_5 \cdot c_5 + M_8 \cdot (1 - c_5) + 2 \cdot M_{O_2} = 235 \cdot 0,033 + 238 \cdot (1 - 0,033) + 2 \cdot 16 = 269,901$$

Ядрена концентрация на ^{235}U в единица обем от горивото:

$$N_5 = c_5 \cdot \rho_{\text{UO}_2} \cdot \frac{N_a}{M_{\text{UO}_2}} = 0,033 \cdot 9,85 \cdot \frac{0,6022 \cdot 10^{24}}{269,901} = 7,25248 \cdot 10^{20} \text{ ядра/cm}^3,$$

Ядрена концентрация на ^{238}U в единица обем от горивото:

$$N_8 = (1 - c_5) \cdot \rho_{\text{UO}_2} \cdot \frac{N_a}{M_{\text{UO}_2}} = (1 - 0,033) \cdot 9,85 \cdot \frac{0,6022 \cdot 10^{24}}{269,901}$$

$$N_8 = 2,1252 \cdot 10^{22} \text{ ядра/cm}^3$$

Ядрена концентрация на кислорода в единица обем от горивото:

$$N_{\text{O}_2}^G = c_{\text{O}_2} \cdot \rho_{\text{UO}_2} \cdot \frac{N_a}{M_{\text{UO}_2}} = 2,9,85 \cdot \frac{0,6022 \cdot 10^{24}}{269,901} = 4,3954 \cdot 10^{22} \text{ ядра/cm}^3$$

3.2.2. Ядрена концентрация в забавителя

Молекулна маса на забавителя:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \cdot M_{\text{H}_2} + M_{\text{O}_2} = 2 \cdot 1 + 16 = 18$$

Пресмятане на ядрената концентрация на водорода в единица обем от забавителя се извършва за студено и горещо състояние на топлоносителя, тъй като съществуват разлики в плътностите на водата.

За студено състояние: при $t = 25^{\circ}\text{C}$ и $P_{\text{атм}} = 0,1 \text{ МПа}$ от Парни таблици се отчита специфичния обем на водата $v_{\text{H}_2\text{O}}$ и се изчислява плътността на водата при студено състояние: $\rho_{\text{H}_2\text{O}}^c = 0,99705 \text{ g/cm}^3$.

За горещо състояние, в зависимост от заданието, се търси плътността на водата при следните параметри:

• За реактор тип ВВЕР-440: при средна температура в АЗ $t = 285^{\circ}\text{C}$ и $P = 12,5 \text{ МПа}$ от Парни таблици се отчита $v_{\text{H}_2\text{O}}$ и се пресмята плътността на водата: $\rho_{\text{H}_2\text{O}}^g = 0,75069 \text{ g/cm}^3$.

• За реактор тип ВВЕР-1000: при средна температура в АЗ $t = 305^{\circ}\text{C}$ и $P = 16 \text{ МПа}$ от Парни таблици се отчита $v_{\text{H}_2\text{O}}$ и се пресмята плътността на водата: $\rho_{\text{H}_2\text{O}}^g = 0,7168 \text{ g/cm}^3$.

$$N_{\text{H}_2}^c = c_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}^c \cdot \frac{N_a}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = 2,0,99705 \cdot \frac{0,6022 \cdot 10^{24}}{18} = 6,6714 \cdot 10^{22}$$

$$N_{\text{H}_2}^g = c_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}^g \cdot \frac{N_a}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = 2,0,7168 \cdot \frac{0,6022 \cdot 10^{24}}{18} = 4,7962 \cdot 10^{22}$$

Изчисляване на ядрената концентрация на кислорода в единица обем от забавителя:

$$N_{\text{O}_2}^c = c_{\text{O}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}^c \cdot \frac{N_a}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,0,99705 \cdot \frac{0,6022 \cdot 10^{24}}{18} = 3,33569 \cdot 10^{22}$$

$$N_{\text{O}_2}^g = c_{\text{O}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}^g \cdot \frac{N_a}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,0,7168 \cdot \frac{0,6022 \cdot 10^{24}}{18} = 2,39809 \cdot 10^{22}$$

3.2.3. Ядрена концентрация в материала на обвивката:

$$N_{Zr} = \frac{N_a}{M_{Zr}} \rho_{Zr} = \frac{0,6022 \cdot 10^{24}}{91,22} \cdot 6,44 = 4,25144 \cdot 10^{22} \text{ ядра/cm}^3$$

3.3. Макроскопични сечения на взаимодействие на ядреното гориво

Макроскопично сечение на поглъщане на горивото:

$$\Sigma_{a,o} = \sigma_{a,5} \cdot N_5 + \sigma_{a,8} \cdot N_8 + \sigma_{a,O_2} \cdot N_{O_2}^G$$

$$\Sigma_{a,o} = 680,9 \cdot 10^{-24} \cdot 7,252 \cdot 10^{20} + 2,7 \cdot 10^{-24} \cdot 2,1252 \cdot 10^{22} + 0,00027 \cdot 10^{-24} \cdot 4,395 \cdot 10^{22}$$

$$\Sigma_{a,o} = 0,5512 \text{ cm}^{-1}$$

Макроскопично сечение на разсейване на горивото:

$$\Sigma_{s,o} = \sigma_{s,5} \cdot N_5 + \sigma_{s,8} \cdot N_8 + \sigma_{s,O_2} \cdot N_{O_2}^G \text{ cm}^{-1}$$

$$\Sigma_{s,o} = 13,8 \cdot 10^{-24} \cdot 7,252 \cdot 10^{20} + 8,9 \cdot 10^{-24} \cdot 2,1252 \cdot 10^{22} + 3,76 \cdot 10^{-24} \cdot 4,395 \cdot 10^{22}$$

$$\Sigma_{s,o} = 0,3644 \text{ cm}^{-1}$$

3.4. Определяне на коефициента на размножение на неутроните

3.4.1. Пресмятане на средния брой вторични бързи неутрони η :

$$\eta = \frac{\eta_5}{1 + \frac{1-c_5}{c_5} \cdot \frac{\sigma_{a,8}}{\sigma_{a,5}}} = \frac{2,08}{1 + \frac{1-0,033}{0,033} \cdot \frac{2,7}{680,9}} = 1,8635,$$

където $\eta_5 = 2,08$ е броят на вторичните неутрони, получени при делене на едно ядро с неутрон с топлинна енергия за чист изотоп уран-235.

3.4.2. Пресмятане на коефициента на размножение на бързи неутрони ε :

$$\varepsilon^{c/z} = 1 + \frac{0,168}{1 + \frac{\alpha_r \cdot \rho_{H_2O}^{c/z}}{(1-c_5) \cdot \rho_{UO_2}} \cdot \frac{V_{H_2O}}{V_o}},$$

За окисно гориво $\alpha_r = 21,46$.

- за студено състояние:

$$\varepsilon^c = 1 + \frac{0,168}{1 + \frac{21,46 \cdot 0,99705}{(1-0,033) \cdot 9,85} \cdot \frac{0,74675}{0,44156}} = 1,035$$

- за горещо състояние:

$$\varepsilon^z = 1 + \frac{0,168}{1 + \frac{21,46 \cdot 0,7168}{(1-0,033) \cdot 9,85} \cdot \frac{0,74675}{0,44156}} = 1,045$$

3.4.3. Пресмятане на вероятността за избягване на резонансно поглъщане p :

Пресмятане на околната повърхнина на горивния блок:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d_o}{2} \cdot 1 = \pi \cdot d_o = 3,14 \cdot 0,75 = 2,355 \text{ cm}^2$$

Пресмятане на масата на горивото:

$$M = V_o \cdot \rho_{\text{UO}_2} = 0,44156 \cdot 9,85 = 4,349 \text{ g;}$$

Пресмятане на Π_o – поправка, отчитаща наличието на леки елементи в обема на горивото:

$$f_{O_2} = 1 - \frac{0,01661 \cdot (M_{O_2} + 1)^2}{M_{O_2}} = 1 - \frac{0,01661 \cdot (16 + 1)^2}{16} = 0,69998,$$

$$\Pi_o = 1 + \frac{d_o}{1,27} \cdot f_{O_2} \cdot N_{O_2}^G \cdot \sigma_{s,O_2},$$

$$\Pi_o = 1 + \frac{0,75}{1,27} \cdot 0,69998 \cdot 4,3954 \cdot 10^{22} \cdot 3,76 \cdot 10^{-24} = 1,0683$$

Пресмятане на $\Pi_{\text{вл}}$ – поправка за взаимно влияние на съседни ТОЕ:

$$\Pi_{\text{вл}}^{c/z} = \frac{2,42}{2,397 + \frac{4 \cdot V_o}{1,464 \cdot \pi \cdot d_o \cdot V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}^{c/z}}}$$

- за студено състояние:

$$P_{вл}^c = \frac{2,42}{2,397 + \frac{4,0,44156}{1,464.3,14.0,75.0,74675.0,99705}} = 0,7844$$

- за горещо състояние:

$$P_{вл}^z = \frac{2,42}{2,397 + \frac{4,0,44156}{1,464.3,14.0,75.0,74675.0,7168}} = 0,7215$$

P_T – температурна поправка:

- за студено състояние $P_T^c = 1$

- за горещо състояние:

$$P_T^z = 0,775(1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{\bar{T}}),$$

където:

$$\bar{T} = 0,4(T_{o,G} - T_{cm,G}) + T_{cm,G},$$

Приема се:

$$T_{o,G} = 2000 \text{ K};$$

$$T_{ст,G} = 650 \text{ K}.$$

$$\bar{T} = 0,4(2000 - 650) + 650 = 1190\text{K}$$

$$P_T^z = 0,775 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \sqrt{1190}) = 1,2429$$

Определяне на ефективния резонансен интеграл за студено и горещо състояние I_{ef}^c и I_{ef}^z :

$$I_{ef}^{c/z} = \left(A + B \sqrt{\frac{S}{M}} \cdot \Pi_o \cdot \Pi_{el}^{c/z} \cdot \Pi_T^{c/z} \right) \cdot 10^{-24}$$

За уранов диоксид:

$$A = 4,15;$$

$$B = 26,6.$$

$$I_{ef}^c = \left(4,15 + 26,6 \sqrt{\frac{2,355}{4,3494}} \cdot 1,0683 \cdot 0,7844 \cdot 1 \right) \cdot 10^{-24} = 2,05527 \cdot 10^{-23}$$

$$I_{ef}^z = \left(4,15 + 26,6 \sqrt{\frac{2,355}{4,3494}} \cdot 1,0683 \cdot 0,7215 \cdot 1,2429 \right) \cdot 10^{-24} = 2,2901 \cdot 10^{-23}$$

Изчисляване на забавящата способност на забавителя:

$$\left(\xi \Sigma_s \right)_{H_2O}^{c/z} = \xi_{H_2} \cdot \sigma_{s,H_2} \cdot N_{H_2}^{c/z} + \xi_{O_2} \cdot \sigma_{s,O_2} \cdot N_{O_2}^{c/z} \text{ cm}^{-1},$$

където параметърът на забавяне е със стойност:

- за водорода $\xi_{H_2} = 1$;
- за кислорода $\xi_{O_2} = 0,12$.

Забавяща способност на водата за студено състояние:

$$\left(\xi \Sigma_s \right)_{H_2O}^c = 1,20 \cdot 4 \cdot 10^{-24} \cdot 6,6714 \cdot 10^{22} + 0,12 \cdot 3,76 \cdot 10^{-24} \cdot 3,33569 \cdot 10^{22} = 1,3760 \text{ cm}^{-1}$$

Забавяща способност на водата за горещо състояние:

$$(\xi \Sigma_s)_{H_2O}^c = 1.20,4 \cdot 10^{-24} \cdot 4,7962 \cdot 10^{22} + 0,12,3,76 \cdot 10^{-24} \cdot 2,39809 \cdot 10^{22} = 0,9892 \text{ cm}^{-1}$$

С така получените резултати може да се изчисли, съгласно ур. (28), вероятността за избягване на резонансно поглъщане за студено и за горещо състояние:

$$p^c = e^{-\left(\frac{2,1252 \cdot 10^{22} \cdot 0,44156}{1,376 \cdot 0,74675} \cdot 2,05527 \cdot 10^{-23} \right)} = 0,82886$$

$$p^s = e^{-\left(\frac{2,1252 \cdot 10^{22} \cdot 0,44156}{0,9892 \cdot 0,74675} \cdot 2,2901 \cdot 10^{-23} \right)} = 0,747578$$

3.4.4. Пресмятане на коефициента на използване на топлинни неутрони f

Макроскопично сечение на поглъщане на забавителя:

$$\Sigma_{a,H_2O}^{c/s} = \sigma_{a,H_2}^{c/s} \cdot N_{H_2}^{c/s} + \sigma_{a,O_2}^{c/s} \cdot N_{O_2}^{c/s} \text{ cm}^{-1}$$

Макроскопично сечение на поглъщане на забавителя за студено състояние:

$$\Sigma_{a,H_2O}^c = 0,332 \cdot 10^{-24} \cdot 6,6714 \cdot 10^{22} + 0,00027 \cdot 10^{-24} \cdot 3,33569 \cdot 10^{22} = 0,02216 \text{ cm}^{-1}$$

Макроскопично сечение на поглъщане на забавителя за горещо състояние:

$$\Sigma_{a,H_2O}^s = 0,332 \cdot 10^{-24} \cdot 4,7962 \cdot 10^{22} + 0,00027 \cdot 10^{-24} \cdot 2,39809 \cdot 10^{22} = 0,01593 \text{ cm}^{-1}$$

Реципрочната стойност на дължината на дифузия в горивото е:

$$\chi_0 = \sqrt{3 \cdot \Sigma_{a,o} \cdot \Sigma_{s,o}} = \sqrt{3 \cdot 0,5512 \cdot 0,3644} = 0,77629 \text{ cm}^{-1}$$

$$r_0 = d_0/2 = 0,75/2 = 0,375 \text{ cm}$$

Коефициент на вътрешния блоков ефект:

$$Q = 1 + \frac{(\chi_o \cdot r_o)^2}{8} - \frac{(\chi_o \cdot r_o)}{198} = 1 + \frac{(0,77629 \cdot 0,375)^2}{8} - \frac{(0,77629 \cdot 0,375)}{198} = 1,009$$

Получаване на макроскопичното сечение на разсейване на забавителя за студено състояние:

$$\Sigma_{s,H_2O}^c = \sigma_{s,H_2} \cdot N_{H_2}^c + \sigma_{s,O_2} \cdot N_{O_2}^c$$

$$\Sigma_{s,H_2O}^c = 20,4 \cdot 10^{-24} \cdot 6,6714 \cdot 10^{22} + 3,76 \cdot 10^{-24} \cdot 3,33569 \cdot 10^{22} = 1,4864 \text{ cm}^{-1}$$

Получаване на макроскопичното сечение на разсейване на забавителя за горещо състояние:

$$\Sigma_{s,H_2O}^z = \sigma_{s,H_2} \cdot N_{H_2}^z + \sigma_{s,O_2} \cdot N_{O_2}^z$$

$$\Sigma_{s,H_2O}^z = 20,4 \cdot 10^{-24} \cdot 4,7962 \cdot 10^{22} + 3,76 \cdot 10^{-24} \cdot 2,39809 \cdot 10^{22} = 1,0686 \text{ cm}^{-1}$$

Реципрочната стойност на дължината на дифузия в забавителя:

$$\chi_1^{c/z} = \sqrt{3 \cdot \Sigma_{a,H_2O}^{c/z} \cdot \Sigma_{s,H_2O}^{c/z}}$$

- за студено състояние:

$$\chi_1^c = \sqrt{3.0,02216 \cdot 1,4864} = 0,31433 \text{ cm}^{-1}$$

- за горещо състояние:

$$\chi_1^s = \sqrt{3.0,01593 \cdot 1,0686} = 0,22598 \text{ cm}^{-1}$$

Изчисляването на параметъра A_q , съгласно заданието, е със стойност на $r_1 = d_1/2 = 1,3339/2 = 0,66697\text{cm}$:

$$A_q = \frac{r_1^2}{r_1^2 - r_0^2} \ln \frac{r_1}{r_0} - \frac{3}{4} + \frac{r_0^2}{4r_1^2}$$

$$A_q = \frac{0,66697^2}{0,66697^2 - 0,375^2} \ln \frac{0,66697}{0,375} - \frac{3}{4} + \frac{0,375^2}{4 \cdot 0,66697^2} = 0,17101$$

Макроскопично сечение на поглъщане на обвивката:

$$\Sigma_{a,n} = \sigma_{a,Zr} \cdot N_{Zr} = 0,185 \cdot 10^{-24} \cdot 4,2514 \cdot 10^{22} = 0,0079 \text{ cm}^{-1}$$

Относително непродуктивно поглъщане на неутрони в забавителя спрямо горивото q (относителен дял на вредното поглъщане) се оценява по следната зависимост:

$$q^{c/z} = \frac{1-f}{f} = \frac{\Sigma_{a,H_2O} \cdot V_{H_2O}}{\Sigma_{a,o} \cdot V_o} \cdot Q + \frac{(\chi_1^{c/z})^2 \cdot (r_1^2 - r_{TOE}^2)}{2r_{TOE}^2} \cdot A_q + \frac{\Sigma_{a,n} \cdot V_n}{\Sigma_{a,o} \cdot V_o} \cdot Q$$

- за студено състояние:

$$q^c = \frac{0,02216 \cdot 0,74675}{0,55121 \cdot 0,44156} \cdot 1,009 + \frac{0,314^2 \cdot (0,66697^2 - 0,455^2)}{2 \cdot 0,455^2} \cdot 0,171 + \\ + \frac{0,0079 \cdot 0,16014}{0,55121 \cdot 0,44156} \cdot 1,009 = 0,07904$$

- за горещо състояние:

$$q^g = \frac{0,01593 \cdot 0,74675}{0,55121 \cdot 0,44156} \cdot 1,009 + \frac{0,22598^2 \cdot (0,66697^2 - 0,455^2)}{2 \cdot 0,455^2} \cdot 0,171 + \\ + \frac{0,0079 \cdot 0,16014}{0,55121 \cdot 0,44156} \cdot 1,009 = 0,05762$$

Коефициент на използване на топлинни неутрони за студено състояние:

$$f^c = \frac{1}{1 + q^c} = \frac{1}{1 + 0,07904} = 0,92675$$

Коефициент на използване на топлинни неутрони за горещо състояние:

$$f^g = \frac{1}{1 + q^g} = \frac{1}{1 + 0,05762} = 0,9455$$

3.4.5. Определяне на коефициента на размножение на неутроните

Коефициентът на размножение на неутроните за безкрайно голяма среда k_{∞} се изчислява по формулата:

$$k_{\infty}^{c/2} = \eta \cdot \varepsilon^{c/2} \cdot p^{c/2} \cdot f^{c/2}$$

- за студено състояние:

$$k_{\infty}^c = 1,8635 \cdot 1,035 \cdot 0,82886 \cdot 0,92675 = 1,4815$$

- за горещо състояние:

$$k_{\infty}^z = 1,8635 \cdot 1,045 \cdot 0,74758 \cdot 0,9455 = 1,3765$$

Ефективен коефициент на размножение на неутроните:

Геометричният параметър B^2 зависи от типа и размерите на ядрения реактор. Съгласно заданието, B^2 се изчислява за размери на АЗ на ЯЕР тип ВВЕР-1000, т.е. радиус $R = 158$ cm и височина $H = 350$ cm:

$$B^2 = \left(\frac{2,405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 = \left(\frac{2,405}{158}\right)^2 + \left(\frac{3,14}{350}\right)^2 = 0,000312181$$

При $\tau_{H_2O} = 26,5 \text{ cm}^2$ се определя възрастта на неутроните:

$$\tau^{c/z} = \tau_{H_2O} \left(\frac{1 + \frac{V_o + V_n}{V_{H_2O}}}{\rho_{H_2O} + \frac{0,82.V_o + 0,4.V_n}{V_{H_2O}}} \right)^2, \text{ cm}^2$$

- за студено състояние:

$$\tau^c = 26,5 \left(\frac{1 + \frac{0,44156 + 0,1846}{0,74675}}{0,99705 + \frac{0,82 \cdot 0,44156 + 0,4 \cdot 0,1846}{0,74675}} \right)^2 = 35,845, \text{ cm}^2$$

- за горещо състояние:

$$\tau^z = 26,5 \left(\frac{1 + \frac{0,44156 + 0,1846}{0,74675}}{0,7168 + \frac{0,82 \cdot 0,44156 + 0,4 \cdot 0,1846}{0,74675}} \right)^2 = 52,958, \text{ cm}^2$$

Вероятността да се избегне изтичането на неутрони в процеса на забавяне за студено състояние:

$$P_1^c = e^{-B^2 \cdot \tau^c} = e^{-0,00031218135 \cdot 35,845} = 0,9889$$

Вероятността да се избегне изтичането на неутрони в процеса на забавянето им за горещо състояние:

$$P_1^z = e^{-B^2 \cdot \tau^z} = e^{-0,00031218152 \cdot 52,958} = 0,9836$$

Квадратът на дължината на дифузия на неутроните в забавителя $L_{c/z}^2$ за студено и за горещо състояние на ядрения реактор се изчислява по зависимостта:

$$L_{c/z}^2 = \left(\frac{2,72}{\rho_{H_2O}^{c/z}} \right)^2 \cdot \frac{(293 + \bar{t}_{c/z}) \cdot 1,0614}{293 \left(1 + 0,6014 \sqrt{\frac{273 + \bar{t}_{c/z}}{293}} \right)}, \text{ cm}^2$$

Пресмятане на L_c^2 за студено състояние при средна температура на водата $\bar{t}_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$L_c^2 = \left(\frac{2,72}{0,99705} \right)^2 \cdot \frac{(293 + 25) \cdot 1,0614}{293 \left(1 + 0,6014 \sqrt{\frac{273 + 25}{293}} \right)} = 5,3365 \text{ cm}^2$$

При средна температура на топлоносителя в активната зона на ядрения реактор $\bar{t}_z = 305 \text{ }^\circ\text{C}$ за горещо състояние квадрата на дължината на дифузия е:

$$L_z^2 = \left(\frac{2,72}{0,7168} \right)^2 \cdot \frac{(293 + 305) \cdot 1,0614}{293 \left(1 + 0,6014 \sqrt{\frac{273 + 305}{293}} \right)} = 16,90958 \text{ cm}^2$$

Вероятност неутроните да не напуснат средата в процеса на дифузия, съгласно ур. (52), за студено състояние:

$$P_2^c = \frac{1}{1 + 5,3365 \cdot 0,000312} = 0,9983$$

Вероятност неутроните да не напуснат средата в процеса на дифузия за горещо състояние:

$$P_2^z = \frac{1}{1 + 16,90958.0,000312} = 0,9947$$

Определяне на ефективния коефициент на размножение на неутроните:

$$k_{ef}^{c/z} = k_{\infty}^{c/z} . P_1^{c/z} . P_2^{c/z}$$

- за студено състояние:

$$k_{ef}^c = 1,4815 . 0,9889 . 0,9983 = 1,4626$$

- за горещо състояние:

$$k_{ef}^z = 1,3765 . 0,9836 . 0,9947 = 1,3468$$

3.5. Пресмятане на топлинния режим на активната зона

3.5.1. Хидравлични пресмятания

Данните за тази част от курсовия проект се вземат от Таблица 3 в зависимост от заданието и от типа на ЯЕР.

Изчисляване на разхода на топлоносител през реактора:

$$G_T = \frac{Q_P}{c_p(t_{изх} - t_{вх})} = \frac{3000.10^6}{5633,3(320 - 290)} = 17751,47929 \text{ kg/s}$$

Среден разход на топлоносител през една касета:

$$G_k = \frac{G_T}{n_k} = \frac{17751,47929}{163} = 108,904 \text{ kg/s}$$

Линейна плътност на топлинния поток за един ТОЕ и среднатоварена касета:

$$\bar{q}_l = \frac{Q_p}{H_{A3} \cdot n_k \cdot n_{ТОЕ}} = \frac{3000 \cdot 10^6}{3,5 \cdot 163 \cdot 312} = 16854,311 \text{ W/m}$$

Максимална стойност на линейната плътност на топлинния поток за среднатоварена касета и косинусов закон на енергоотделянето по височина на активната зона:

$$q_{l,o} = \bar{q}_l \cdot k_z = 16854,311 \cdot 1,57 = 26461,26879 \text{ W/m}$$

Максимална линейна плътност на топлинния поток за централна касета при Беселов закон на енергоотделяне по радиуса на А3:

$$q_{l,o}^{\max} = \bar{q}_l \cdot k_z \cdot k_r = 16854,311 \cdot 1,57 \cdot 1,3 = 34399,649 \text{ W/m}$$

Таблица 3. Термодинамични и конструктивни характеристики на реактори тип ВВЕР- 440 и ВВЕР-1000

Параметър	Условно означение	Тип реактор	
		ВВЕР-440	ВВЕР-1000
Топлинна мощност на реактора	Q_p, W	$1375 \cdot 10^6$	$3000 \cdot 10^6$
Енталпия на топлоносителя на изход от АЗ	$h_{изх}, kJ/kg$	1341	1453
Енталпия на топлоносителя на вход на АЗ	$h_{вх}, kJ/kg$	1183,4	1284
Температура на топлоносителя на изход от АЗ	$t_{изх}, ^\circ C$	300	320
Температура на топлоносителя на вход в АЗ	$t_{вх}, ^\circ C$	270	290
Специфичен топлинен капацитет на водата	$\vartheta, m^3/kg$	0,001313	0,001395
Динамичен вискозитет на водата	$\mu, Pa \cdot s$	0,00009	0,00009
Размер на касетата „под ключ“	a_k, m	0,144	0,234
Коефициент на топлопроводност на UO_2	$\lambda_{гор}, W/mK$	4	3,6
Коефициент на топлопроводност на водата	$\lambda_{H_2O}, W/mK$	0,58	0,5516
Коефициент на топлопроводност на хелия	$\lambda_{He}, W/mK$	0,3	0,275
Коефициент на топлопроводност на циркония	$\lambda_{Zr}, W/mK$	23,7	19,9
Височина на АЗ	$H_{аз}, m$	2,5	3,5
Радиус на АЗ	R, m	1,44	1,58
Налягане в ЯР	P, MPa	12,5	16
Брой касети в АЗ	n_k	349	163
Брой ТОЕ в една горивна касета	$n_{ТОЕ}$	126	312
Брой поглъщащи елементи	$n_{пел.}$	0	18
Брой централни тръбички в горивната касета	$n_{тр}$	1	1
Диаметър на поглъщащите елементи	$d_{пел}, m$	-	0,0126
Диаметър на централната тръбичка в горивната касета	$d_{тр}, m$	0,0126	0,0126
Плътност на водата в горещо състояние	$\rho_{H_2O}^*, g/cm^3$	0,75069	0,7168
Специфичен топлинен капацитет на водата при постоянно налягане	$c_p, kJ/kg$	5,2533	5,6333

Определяне на проходното сечение на касетата f_k :

$$f_k = \frac{\sqrt{3}}{2} a_k^2 - \frac{\pi \cdot d_{TOE}^2}{4} \cdot n_{TOE} - \frac{\pi \cdot d_{mp}^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{nel}^2}{4} \cdot n_{nel}$$

$$f_k = \frac{\sqrt{3}}{2} 0,234^2 - \frac{\pi \cdot 0,0091^2}{4} \cdot 312 - \frac{\pi \cdot 0,0126^2}{4} - \frac{\pi \cdot 0,0126^2}{4} \cdot 18 = 0,02477 \text{ m}$$

където, съгласно данните от Таблица 3:

$$a_k = 0,234 \text{ m};$$

$$d_{nel} = 0,0126 \text{ m};$$

$$n_{nel} = 18;$$

$$d_{mp} = 0,0126 \text{ m};$$

$$n_{TOE} = 312.$$

Периметърът на канала на горивната касета е:

$$\Pi_k = \frac{6 \cdot a_k}{\sqrt{3}} + \pi \cdot d_{TOE} \cdot n_{TOE} + \pi \cdot d_{nel} \cdot n_{nel} + \pi \cdot d_{mp} \cdot n_{mp} \text{ m}$$

$$\Pi_k = \frac{6 \cdot 0,234}{\sqrt{3}} + 3,14 \cdot 0,0091 \cdot 312 + 3,14 \cdot 0,0126 \cdot 18 + 3,14 \cdot 0,0126 \cdot 1 = 10,4774 \text{ m}$$

Пресмятане на еквивалентния диаметър:

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot f_k}{\Pi_k} = \frac{4 \cdot 0,02477}{10,4774} = 0,0094567 \text{ m}$$

Изчисляване на скоростта на топлоносителя в горивната касета:

$$w = \frac{G_k \cdot \rho_{H_2O}}{f_k} = \frac{108,905.0,001395}{0,02477} = 6,13323 \text{ m/s}$$

За разглеждания случай при $P = 16 \text{ MPa}$ и средна температура в АЗ 305°C се отчита:

- $\rho_{H_2O} = 0,001395 \text{ m}^3/\text{kg}$;

- $\mu_{H_2O} = 0,00009 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_{\text{екв}}}{\mu_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}} = \frac{6,133.0,0094567}{0,00009.0,001395} = 461966,8$$

Пресмятане на числото на Прандтл:

$$\text{Pr} = \frac{\mu_{H_2O} \cdot c_p}{\lambda_{H_2O}} = \frac{0,00009.5633,3}{0,5516} = 0,91914$$

Коефициентът на конвективен топлообмен се получава от следната зависимост:

$$\alpha = 0,021 \cdot \frac{\lambda_{H_2O}}{d_{\text{екв}}} \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,43}$$

$$\alpha = 0,021 \cdot \frac{0,5516}{0,0094567} \cdot 461966,7799^{0,8} \cdot 0,91914^{0,43} = 40183,6112 \text{ W/m}^2\text{K}$$

След така направените изчисления се преминава към определяне на температурите за материалите на ТОЕ по височина на АЗ за среднотоварена касета.

Разходът на топлоносител, отнесен към един ТОЕ, е:

$$G_{ТОЕ} = \frac{G_k}{n_{ТОЕ}} = \frac{108,905}{312} = 0,34905 \text{ kg/s}$$

3.5.2. Определяне на максимални температури в ТОЕ за среднотоварена касета

При определянето на максималните температури за среднотоварена касета, в уравненията за изчисляване на коефициентите A , B_1 , B_2 , B_3 и B_4 се взема максималната стойност на линейната плътност на топлинния поток за среднотоварена касета $q_{1,0}$.

Изчисляване на максималната температура на външната стена на циркониевата обвивка на ТОЕ $t_{cm,1}$ за среднотоварена касета по височина на активната зона:

$$A = \frac{q_{1,0} \cdot H_{ef}}{\pi \cdot G_{ТОЕ} \cdot c_p} = \frac{26461,26879 \cdot 3,5}{3,14 \cdot 0,34905 \cdot 5633,33} = 15$$

$$B_1 = \frac{q_{1,0}}{\pi \cdot d_{ТОЕ} \cdot \alpha} = \frac{26461,26879}{3,14 \cdot 0,0091 \cdot 40183,6112} = 23,05$$

$$t_{cm,1} = t_{ax} + \frac{\Delta t}{2} + B_1 \sqrt{1 + \left(\frac{A}{B_1}\right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{cm,1} = 290 + \frac{30}{2} + 23,05 \sqrt{1 + \left(\frac{15}{23,05}\right)^2} = 332,50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на получената максимална температура:

$$z_{cm,1}^{cp.n.} = \frac{H_{ef}}{\pi} \operatorname{actg}\left(\frac{A}{B_1}\right) = \frac{3,5}{3,14} \operatorname{actg}\left(\frac{15}{23,05}\right) = 0,64 \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура на вътрешната стена на циркониевата обвивка на ТОЕ $t_{cr,2}$ за среднонатоварена касета по височина на активната зона:

$$B_2 = \frac{q_{l,o}}{2 \cdot \pi \lambda_{cm}} \ln \frac{d_{TOE}}{d_2} = \frac{26461,26879}{2 \cdot 3,14 \cdot 19,9} \cdot \ln \frac{0,0091}{0,0077} = 35,37$$

$$t_{cm,2} = t_{ax} + \frac{\Delta t}{2} + (B_1 + B_2) \sqrt{1 + \left(\frac{A}{B_1 + B_2}\right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{cm,2} = 290 + \frac{30}{2} + (23,05 + 35,37) \sqrt{1 + \left(\frac{15}{23,05 + 35,37}\right)^2} = 365,31 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на изчислената максимална температура:

$$z_{cm,2}^{cp.n.} = \frac{H_{ef}}{\pi} \operatorname{actg}\left(\frac{A}{B_1 + B_2}\right) = \frac{3,5}{3,14} \operatorname{actg}\left(\frac{15}{23,05 + 35,37}\right) = 0,28 \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура на външната повърхност на горивната таблетка $t_{ct,G}$ за среднонатоварена касета по височина на активната зона:

$$B_3 = \frac{q_{l,o}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{He}} \ln \frac{d_2}{d_o} = \frac{26461,27}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,275} \cdot \ln \frac{0,0077}{0,0075} = 403,24$$

$$t_{cm,G} = t_{ax} + \frac{\Delta t}{2} + (B_1 + B_2 + B_3) \sqrt{1 + \left(\frac{A}{B_1 + B_2 + B_3} \right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{cm,G} = 290 + \frac{30}{2} + (23,05 + 35,37 + 403,24) \sqrt{1 + \left(\frac{15}{23,05 + 35,37 + 403,24} \right)^2} = 766,90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на изчислената максимална температура:

$$z_{cm,G} = \frac{H_{ef}}{\pi} \operatorname{actg} \left(\frac{A}{B_1 + B_2 + B_3} \right) = \frac{3,5}{3,14} \operatorname{actg} \left(\frac{15}{23,05 + 35,37 + 403,24} \right) = 0,04 \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура в центъра на горивната таблетка $t_{G,o}$ за среднонатоварена касета по височина на активната зона:

$$B_4 = \frac{q_{l,o}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_G} = \frac{26461,26879}{4 \cdot 3,14 \cdot 3,6} = 585,22$$

$$t_{G,o} = t_{ax} + \frac{\Delta t}{2} + (B_1 + B_2 + B_3 + B_4) \sqrt{1 + \left(\frac{A}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4} \right)^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

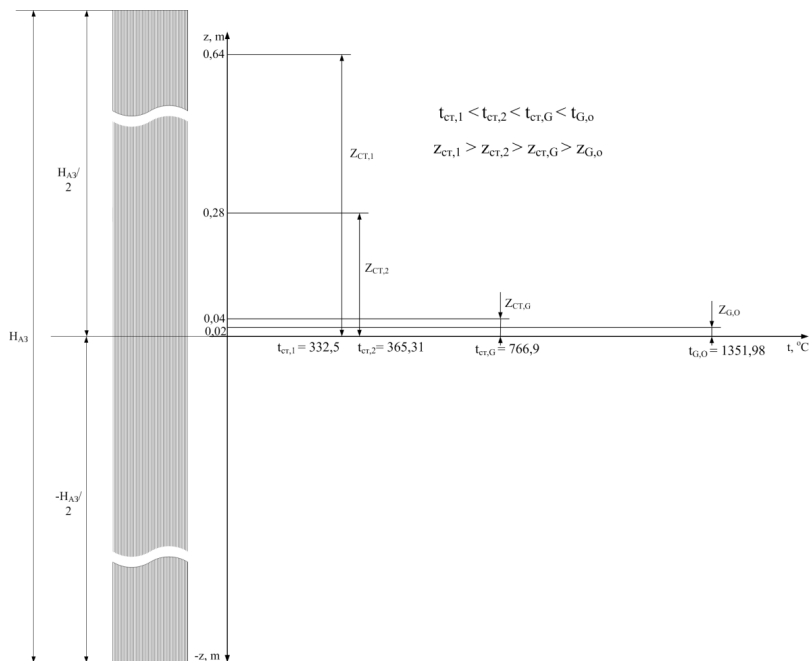
$$t_{G,o} = 290 + \frac{30}{2} + (23,05 + 35,37 + 403,24 + 585,22) \sqrt{1 + \left(\frac{15}{23,05 + 35,37 + 403,24 + 585,22} \right)^2} = 1351,98 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на изчислената максимална температура:

$$z_{G,o}^{cp.n.} = \frac{H_{ef}}{\pi} \operatorname{actg} \left(\frac{A}{B_1 + B_2 + B_3 + B_4} \right) \text{ m}$$

$$z_{G,o} = \frac{3,5}{3,14} \operatorname{actg} \left(\frac{15}{23,05 + 35,37 + 403,24 + 585,22} \right) = 0,02 \text{ m}$$

Изчислените максимални температури на материалите на ТОЕ не превишават максимално допустимите. Получените резултати са представени в графичен вид на Фигура 9. Всички изчислени координати на максималните температури са със положителни стойности, т.е. $z > 0$. Това означава, че получените максимални температури се намират във втората половина по височина на АЗ.



Фигура 9. Максимални температури и техните координати за среднотоварена касета

3.5.3. Определяне на максимални температури в ТОЕ за максималнотоварена касета

При определянето на максималните температури за максималнотоварена касета, в уравненията за изчисляване на коефициентите A , B_1 , B_2 , B_3 и B_4 се взема стойността на максималната линейна плътност на топлинния поток за централна касета $q_{1,0}^{\max}$, определена чрез коефициентите на неравномерност по височина (k_z) и по радиус (k_r) на АЗ.

Със стойността на максималната линейна плътност на топлинния поток се изчисляват параметрите, които са необходими за определяне на максималните температури и техните координати:

$$A = \frac{q_{l,o}^{\max} \cdot H_{ef}}{\pi \cdot G_{TOE} \cdot c_p} = \frac{34399,64943,3,5}{3,14,0,34905,5633,33} = 19,50$$

$$B_1 = \frac{q_{l,o}^{\max}}{\pi \cdot d_{TOE} \cdot \alpha} = \frac{34399,64943}{3,14,0,0091,40183,6112} = 29,96$$

$$B_2 = \frac{q_{l,o}^{\max}}{2\pi \cdot \lambda_{cm}} \ln \frac{d_{TOE}}{d_2} = \frac{34399,64943}{2,3,14,19,9} \cdot \ln \frac{0,0091}{0,0077} = 45,98$$

$$B_3 = \frac{q_{l,o}^{\max}}{2\pi \lambda_{He}} \ln \frac{d_2}{d_o} = \frac{34399,65}{2,3,14,0,275} \cdot \ln \frac{0,0077}{0,0075} = 524,21$$

$$B_4 = \frac{q_{l,o}^{\max}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_G} = \frac{34399,65}{4,3,14,3,6} = 760,78$$

Изчисляване на максималната температура на външната стена на циркониевата обвивка на ТОЕ за максималнонатоварена касета по височина на активната зона:

$$t_{cm,1}^{\max} = 290 + \frac{30}{2} + 29,96 \sqrt{1 + \left(\frac{19,50}{29,96}\right)^2} = 340,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на изчислената максимална температура:

$$z_{cm,1}^{\max} = \frac{3,5}{3,14} \operatorname{actg} \left(\frac{19,50}{29,96} \right) = 0,64 \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура на вътрешната стена на циркониевата обвивка на ТОЕ за максималнонатоварена касета по височина на активната зона:

$$t_{cm,2}^{\max} = 290 + \frac{30}{2} + (29,96 + 45,98) \sqrt{1 + \left(\frac{19,50}{29,96 + 45,98} \right)^2} = 383,41 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Координатата на получената максимална температура е:

$$z_{cm,2}^{\max} = \frac{3,5}{3,14} \operatorname{actg} \left(\frac{19,50}{29,96 + 45,98} \right) = 0,28 \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура на външната повърхност на горивната таблетка за максималнонатоварена касета по височина на активната зона:

$$t_{cm,G}^{\max} = 290 + \frac{30}{2} + (29,96 + 45,98 + 524,21) \sqrt{1 + \left(\frac{19,50}{29,96 + 45,98 + 524,21} \right)^2} = 905,47 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяне на координатата на изчислената максимална температура:

$$z_{cm,G}^{\max} = \frac{3,5}{3,14} \operatorname{actg} \left(\frac{19,50}{29,96 + 45,98 + 524,21} \right) = 0,04 \text{ m}$$

Изчисляване на максималната температура в центъра на горивната таблетка за максималнонатоварена касета по височина на активната зона:

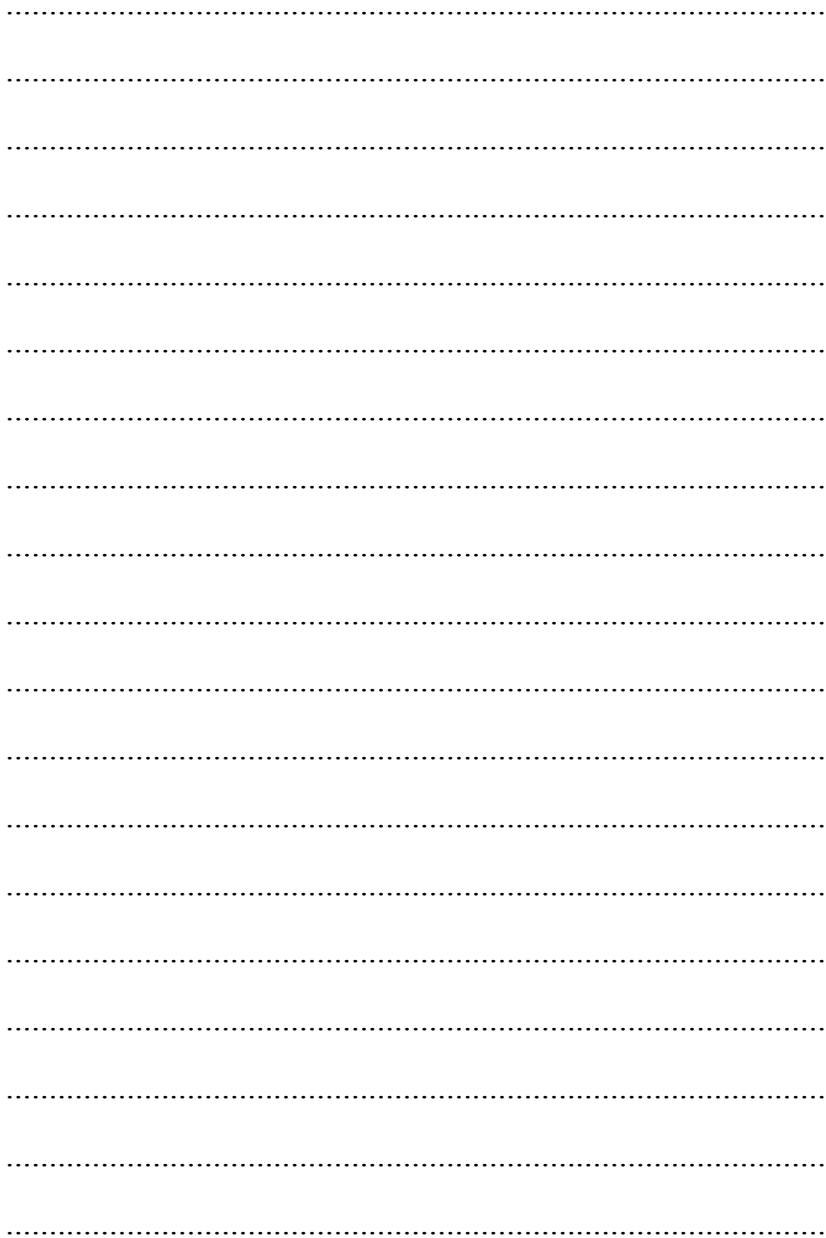
$$t_{G,o}^{\max} = 290 + \frac{30}{2} + (29,96 + 45,98 + 524,21 + 760,78) \sqrt{1 + \left(\frac{19,50}{29,96 + 45,98 + 524,21 + 760,78} \right)^2} = 1666,07 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Координатата на получената максимална температура е:

$$z_{G,o}^{\max} = \frac{3,5}{3,14} \operatorname{actg} \left(\frac{19,50}{29,96 + 45,98 + 524,21 + 760,78} \right) = 0,02 \text{ m}$$

Литература

1. Велев В., К. Филипов, Ядрена техника, ИФО Дизайн, С., 2011
2. Велев В., К. Филипов, Ядрени горива, ИФО Дизайн, С., 2008
3. Лаков Л., Г. Глухов, Основи на ядрената техника, Сиела, 1999
4. Глухов Г., Ядрени енергийни реактори, ИФО Дизайн, 2004
5. Лаков М., Теория на ядрените реактори, Сиела, 2002
6. Бартоломей Г. Г. и др., Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов, Энергоиздат, М., 1982



Гл.ас. д-р инж. Цветелина Станимирова Петрова

**Ръководство за курсово проектиране по Енергийни съоръжения
в ядрени електрически централи**

Българска
Второ преработено издание

Рецензент:
Проф. д-р инж. Ивайло Гинев Ганев

Дадена за печат: 14.01.2021
Излязла от печат: 29.01.2021

Формат 60/90/16
Печатни коли 5

ISBN 978-619-239-530-8
978-619-239-531-5 (pdf)
Издателство Авангард Прима

София, 2021