

Доклад

*Определяне изменението на неутронния
поток за кампанията на ядрено гориво*

Изготвил: маг. инж. Спас Иванов Спасов

ТУ-София

1.3.2015 г.

ВЪВЕДЕНИЕ

В доклада се разглежда кратка формулировка на основни понятия, като неутронен поток и кампания на горивото, като е представен математически модел за определяне времето за изгаряне на горивото и закона му на изменение, респективно определяне и на изменението на неутронния поток. Разглежда се опростен модел с цел представяне поведението на математическия модел, като за целта ще има графично представяне на резултатите.

Съдържание

1	Неутронен поток.....	3
2	Кампания на горивото.....	5
3	Математически модел.....	6
4	Резултати и графики.....	9
5	Изводи.....	10

1. Неутронен поток: Това е величина отчитаща общото изминато разстояние от всички неутрони за единица време в даден обем, докато неутронния флуенс се дефинира като се интегрира неутронния поток спрямо определен времеви интервал. Неутронния поток е основна величина в реакторната физика и участва в почти всички математически формулировки, като дава глобална представа за интензивността на ядрените процеси в обема на активната зона. Съществуват множество проблеми около определянето на точното изменение на неутронния поток в даден обем, както и неговото поведение в пространството, тъй като в процеса на работа на реактора се генерират и изчезват неутрони, което създава проблеми относно непрекъснатостта на неутронния поток, същевременно съществуват разлики в енергийния спектър на неутроните и количеството им в пространството, което означава, че неутронния поток зависи главно от пространството, енергията и времето: $\phi(r, t, E)$.

- $\phi(r)$ - изменението на неутронния поток в пространството зависи главно от геометрията на средата, в която протичат ядрените реакции. В зависимост от геометрията съществуват различни закономерности на изменение на неутронния поток от източника на неутрони към околното пространство. В математическите модели се разглеждат главно точкови или линейни източници на неутрони, в реалния случай неутроните се генерират в целия обем с различни вероятности, като тяхното изтичане от средата в процеса на забавяне и дифузия също е случайна величина. Често в математическите модели се прави опростяващо допускане, където се приема, че неутроните са равномерно разпределени в пространството (средата е хомогенна).

- $\phi(t)$ - изменението на неутронния поток във времето зависи главно от материалните характеристики на средата или от коефициента на размножение на неутрони. В ядрените реактори се цели неутронния поток във времето да бъде постоянен, това се нарича работа в стационарен режим, при дадена мощност имаме постоянен неутронен поток, като за поддържане на баланса се регулира генерирането и поглъщането на неутрони посредством поглъщители на неутрони под формата на изгарящи поглъщители, поглъщители разтворени в топлоносителя и посредством регулиращите органи, които представляват пръти изработени от материали с големи поглъщителни свойства.

Изгарящите поглъщители се поставят в началото на кампанията на реактора, които компенсират началната положителна реактивност и в процеса на работа се трансформират (изгарят).

Поглъщители разтворени в топлоносителя се контролират посредством водо-химичния режим, като при нужда се въвежда концентрат за понижаване на реактивност, а за компенсиране на отрицателна реактивност се въвежда чист кондензат (разреждаме средата). Често използван разтворен поглъстител във водо-водните реактори е разтвор на борна киселина. Процесът на регулиране е инертен и има време закъснение, но изравнява енергонапрегнатостта или изменението на неутронния поток в пространството.

Регулиращите органи се използват за бърза операторска намеса за компенсиране на изменения в реактивността, когато е необходимо да се въведе мигновено отрицателна реактивност.

- $\phi(E)$ - в процеса на ядрено делене се генерират неутрони с различни енергии с различни вероятности, чийто престой в активната зона зависи от мястото на генериране и начина им на разсейване, което отново е вероятностен процес. Взаимодействието на неутроните с ядрата зависи от тяхната енергия(скорост), колкото по-бавен един неутрон толкова е по-голяма вероятността му да взаимодейства с дадено ядро и да го раздели. Като в математическите модели неутронния енергиен спектър се дискретизира и се проследява забавянето и дифузията на неутроните както и вероятността им да взаимодействат с ядрата до тяхното забавяне до топлинни неутрони. Често при опростяващи допускания се приема , че енергията (скоростта) на всички неутрони е една и съща.

В задачата , която ще се разгледа в този доклад ще се проследи единствено изменението на неутронния поток във времето при стационарен режим на работа.

2. Кампания на горивото:

Това е времето за достигане на определена дълбочина на изгаряне на горивото в процеса му на работа в ядрен реактор или това е времето за достигане на определена дълбочина на изгаряне.

Дълбочината на изгаряне показва колко килограма от всеки един тон тежък метал първоначално заредено гориво са се разделили в активната зона или по-лесното за измерване, каква енергия сме произвели от всеки тон (MWd/t-ядрено гориво).

Кампания на реактора е времето между две презареждания на активната зона на реактора, като при презареждане се извежда от активната зона частта от горивото, която е достигнала своята дълбочина на изгаряне (е изработила своята кампания) и се въвежда

свежо гориво, като активната зона се пренарежда с цел бъдещо равномерно изгаряне на горивото в обема и с цел изравняване на неутронния поток (енергонапрегнатостта) в обема (пространството) в активната зона. В ядрените енергийни реактори винаги кампанията на горивото е по-голяма от кампанията на реактора, докато при някои малки реактори кампанията на горивото съвпада с кампанията на реактора. Не равномерното изгаряне на горивото е пряко свързано с неутронния поток .

3. Математически модел:

Задачата, която се разглежда е примерна с цел да се покаже поведението на функцията на неутронния поток при използването на получения итерационен кръг. Цялата задача е въведена като код в Matlab и поради големия си обем не е включена в описанието. Пресмята се коефициентът на размножение с метода на четирите множителя за хомогенна среда, като е извършено усредняване на микроскопични сечения по температурата на топлоносителя, но за удобство се извършва изчисления при температура 20°C.

Разгледаме сферичен хомогенен реактор с мощност 50 MW

Гориво – Уранил сулфат – UO_2SO_4

Забавител – Тежка вода – D_2O

Обогатяване по Уран-235 $x=2\%$. Радиуса на активната зона

$R_{core}=150$ cm.

1. $\phi(t) = const$ за целия обем на активната зона;
2. Активната зона се разглежда като хомогенна смес (разтвор) от гориво-забавител;
3. Всички неутрони в активната зона са забавени до топлинна енергия.
4. Изчисленията се извършват при нормални условия $T_{mod} = 293,15^\circ K$,
 $P = 0,1 MPa$;

5. В процеса на работа единствено изгаря Уран-235;
6. Усреднените сечения в края на кампанията и в началото са приблизително равни, от където при пресмятанията ще се използват усреднените микроскопични сечения от началото на кампанията.

Цел:

- Да се определи времето (ефективните денонощия) на кампанията на горивото и изменението на неутронния поток във времето, при постоянна мощност на работа.
- Да се покаже принципното действие на математическия модел, за целта се използва максимално опростен пример, основна задача остава да се провери поведението на модела при реален хетерогенен реактор.

Мощността на реактора се дава от следната зависимост:

$$(1) \quad P = V \Sigma_f E_f \phi = \frac{4\pi R_{core}^3}{3} \cdot N_5 \sigma_{f,5} E_f \phi, \quad P = const \text{ за целия период на}$$

работа на реактора, от където следва :

$$(2) \quad \frac{3P}{\sigma_{f,5} E_f 4\pi R_{core}^3} = N_5 \phi = const, \quad t \in (t_0 : t_f),$$

Определяме ефективния коефициент на размножение, като се решава като функция на обогатяването (концентрацията на Уран-235 – x).

Концентрация на Уран-235:

$$(3) \quad N_5(x) = \frac{N_A}{M_{fuel}(x)} \bar{\rho}_{fuel}(x) \cdot x \text{ [cm}^{-3}\text{]}$$

$$(4) \quad N_5(t) = N_{0,5} \exp[-\phi(t) \bar{\sigma}_a t] \text{ [cm}^{-3}\text{]}, \text{ където } N_{0,5} = N_5(x_0)$$

На базата на горните уравнения се получава $k_{eff}=f(x)$. Реактора ще работи еднократно до изгаряне на запаса от реактивност.

За да определим крайната стойност на концентрацията на уран-235, задаваме $k_{\text{eff}}=f(x)=1$ и решаваме уравнението, което има единствен корен, който ще отговаря на крайната стойност $x=x_f$.

За да определим времето за достигане на тази концентрация от уравнение (1) и (3) получаваме:

$$(5) \quad t_f = \ln\left(\frac{N_0}{N(x_f)}\right) N(x_f) \frac{\bar{\sigma}_f V E_f}{P \bar{\sigma}_a} [\text{s}] - \text{това ще е и времето на престой на горивото в активната зона.}$$

След като определим началната и крайната концентрация на уран-235 и времето за изменение, остава да определим закона на изменение, за да получим стойностите на неутронния поток във времето. За целта ще разделим времевия интервал $(t_0: t_f)$ на $n=1000$ равни части.

- За целия период на работа на реактора имаме условието $N_5 \phi = \text{const}$ от където следва, че с намаляване на концентрацията на уран-235, ще се повишава неутронния поток.

Търсим решение за $\phi(t)$ в следния вид:

$\phi(t) = \phi_0 \exp(yt)$ тогава ще получим следната система от у-ния:

$$\begin{cases} \phi(t) = \phi_0 \exp(yt) \\ N_5(t) = N_{0,5} \exp[-\phi(t) \bar{\sigma}_a t] \\ N_5(t) \phi(t) = \text{const} \end{cases}$$

От където получаваме: $N_{0,5} \phi_0 \exp(yt - \phi \bar{\sigma}_a t) = \text{const} = \phi(t) N_5(t) \Rightarrow \Rightarrow \exp(yt - \phi(t) \bar{\sigma}_a t) = 1$ и $yt - \overline{\phi(t)} \bar{\sigma}_a t = \ln(1) = 0 \Rightarrow y = \phi(t) \bar{\sigma}_a$

Така получаваме:

$\phi(t) = \phi_0 \exp(\phi(t) \bar{\sigma}_a t) \Rightarrow \ln[\phi(t)] - \ln[\phi_0] = \phi(t) \bar{\sigma}_a t$ полученото замества в уравнението за изменение на Уран-235:

$$N_5(t) = N_{0,5} \exp[-\phi(t)\bar{\sigma}_a t] = N_{0,5} \exp[-\{\ln[\phi(t)] - \ln[\phi_0]\}] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N_5(t) = N_{0,5} \frac{\phi_0}{\phi(t)} \Rightarrow \phi(t) = \frac{N_{0,5}}{N_5(t)} \phi_0$$

Итерационен кръг: $\bar{\phi} = \frac{\phi_f + \phi_0}{2}$

1. $N_5(t) = N_{0,5} \exp[-\bar{\phi}\bar{\sigma}_a t];$

2. $\phi(t) = \frac{N_{0,5}}{N_5(t)} \phi_0;$

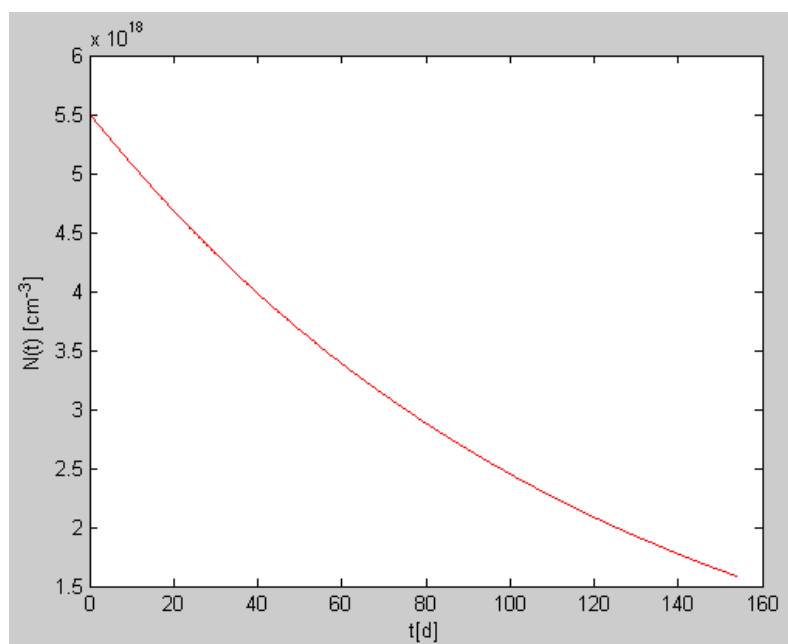
3. $N_5(t) = N_{0,5} \exp[-\phi(t)\bar{\sigma}_a t]$

4. По условие $\phi(t)N_5(t) = \phi(0)N_5(0)$, което означава, че за 1000 стойности на времето в $t \in (t_0; t_f)$ ще се извършват 1000 независими итерации, които ще се сходят до избраната абсолютна грешка след различен брой завъртания на цикъла. Грешката се определя по ϕ -лата:

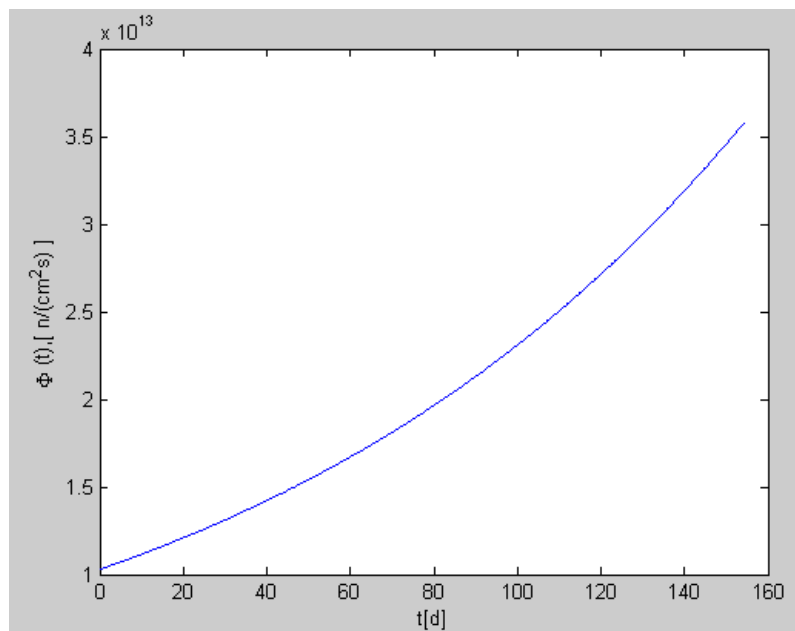
$$\Delta[\phi(t)N_5(t)] = \left| \frac{\phi(t)N_5(t)}{\phi(0)N_5(0)} - 1 \right| < 1.10^{-4}$$

4. Резултати от пресмятането:

Фиг.1.1



Фиг.1.2



Време за достигане на тази дълбочина на изгаряне е 154,39 дни
 От където , ако 70% от обема на активната зона е запълнен от раз-
 твор на тежка вода и уранил сулфат при обогатяване 2% и 150 cm
 радиус на сферата ще имаме около 15 тона разтвор, дялово на
 уранил сулфата се пада около 0,82 тона за началото на кампания-
 та, така получаваме:

$$B = \frac{P \cdot \tau_{\text{еф.ден}}}{m_{\text{гориво}}} \left[\frac{MWd}{tU} \right] = \frac{50 \cdot 154,39}{0,82} = 9414,23 \left[\frac{MWd}{tU} \right] \text{ при използване на}$$

100% от мощността.

5.Изводи и заключения

- Познаването изменението на неутронния поток във времето и пространството дава предпоставки за определяне на неговото влияние върху материалите в ядрен реактор, като ако предвиждането на неутронния поток бъде достатъчно точно и модела е достатъчно точен то ще бъде полезно за предполагагане остатъчния ресурс на корпуса на реактора.
- Възможност да се проследява и цялостното изменение на изотопния състав във времето.
- Недостатък е множество опростяващи допускания, които няма да могат да бъдат отстранени напълно.
- При параметричното решаване на коефициента на размножение има голяма възможност за натрупването на грешки и при усложняването с цел достигане на по реалистичен модел, ще нарасне обема на кода, което ще повиши тази възможност.
- В зависимост от моментния запас от реактивност може да се определи изотопния състав във всеки един момент.