

TÍNH TOÁN HỆ SỐ NHIỆT ĐỘ CỦA ĐỘ PHẢN ỨNG ĐỐI VỚI Lò PHẢN ỨNG HẠT NHÂN LOẠI MNSR

Đỗ Quang Bình ⁽¹⁾, Nguyễn Hoàng Hải ⁽²⁾

(1) Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM,

(2) Trung tâm Nghiên cứu và Triển khai Công nghệ Bức xạ, Tp. HCM

(Bài nhận ngày 03 tháng 01 năm 2012, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 25 tháng 05 năm 2012)

TÓM TẮT: Bài báo này trình bày kết quả đánh giá hằng số nhóm đối với nhiên liệu và các vật liệu quan trọng trong vùng hoạt của lò phản ứng hạt nhân MNSR và hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng của lò phản ứng này thông qua tính toán toàn lò. Trong nghiên cứu này, hằng số nhóm được tính toán bằng chương trình WIMSD và tính toán toàn lò được thực hiện bằng chương trình CITATION. Công trình này cũng trình bày một phương pháp đánh giá hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng tại các nhiệt độ khác nhau và giá trị trung bình của nó trong một khoảng nhiệt độ trực tiếp thông qua giá trị của nhiệt độ chất làm chậm đối với lò phản ứng loại MNSR. Phương pháp này cung cấp một biểu diễn toán học thuận lợi cho các tính toán động học và đánh giá an toàn lò phản ứng hạt nhân.

Từ khóa: lò phản ứng hạt nhân, MNSR, hằng số nhóm, hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng, WIMSD, CITATION.

MỞ ĐẦU

Lò phản ứng hạt nhân MNSR (Miniature Neutron Source Reactor) [1] là loại lò phản ứng nghiên cứu công suất thấp (công suất danh định là 30 kW), do Trung Quốc thiết kế và sản xuất dựa trên thiết kế của lò phản ứng hạt nhân SLOWPOKE của Canada. Đây là loại lò phản ứng bể bơi (tank-in-pool), làm chậm và tải nhiệt bằng nước nhẹ, phản xạ bằng beryllium và thanh điều khiển được làm bằng vật liệu cadmium. Vùng hoạt lò phản ứng có 347 thanh nhiên liệu, 4 thanh nối (tie rod) làm bằng thép không rỉ và 3 giả thanh (dummy rod) bằng nhôm. Loại nhiên liệu được sử dụng trong lò là UAl_4-Al với mật độ $3,456 \text{ g/cm}^3$ và độ làm giàu ^{235}U là 90%. Các thông số quan trọng của

loại lò MNSR được tóm tắt trong Bảng 1. Cấu trúc của lò MNSR được mô tả trên Hình 1.

Bảng 1. Một số thông số chung của loại lò MNSR

Loại lò	Bể bơi (tank-in-pool)
Công suất danh định	30 kW
Chất tải nhiệt	Nước nhẹ
Chất làm chậm	Nước nhẹ
Chất phản xạ	Beryllium
Thanh điều khiển	Cadmium
Nhiên liệu	$UAl_4 - Al$
Độ làm giàu ^{235}U	90%
Khối lượng ^{235}U trong một thanh nhiên liệu	2,88 g

Báo cáo này trình bày kết quả tính toán một thông số an toàn quan trọng của lò phản ứng

MNSR là hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng bằng hệ chương trình tính toán toàn lò CITATION [2] và chương trình tính toán ô mạng WIMSD [3]. Trong đó, chương trình CITATION có nhiệm vụ giải hệ phương trình khuếch tán neutron nhiều nhóm năng lượng bằng phương pháp sai phân hữu hạn để xác định các đặc trưng vật lý toàn lò và hằng số nhóm của các loại vật liệu trong lò được chuẩn bị bởi chương trình WIMSD.

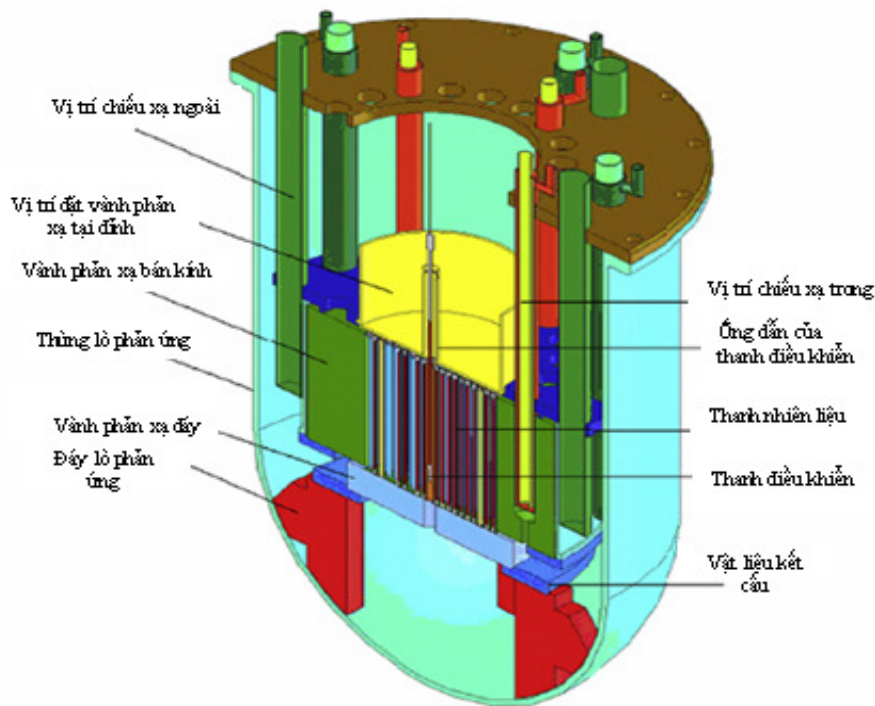
Chương trình CITATION được xây dựng tại Phòng Thí nghiệm Quốc gia Oak Ridge, Tennessee, USA; dùng để giải các bài toán liên quan đến biểu diễn sai phân hữu hạn lý thuyết xấp xỉ khuếch tán của phương trình vận chuyển neutron. Chương trình còn được thiết kế để giải các bài toán cháy nhiên liệu trong vùng hoạt lò và các bài toán động lực học nói chung, cùng với hoặc không kết hợp với bài toán thay thế nhiên liệu để phân tích đa chu trình nhiên liệu. Trong tính toán toàn lò, người sử dụng phải cung cấp số liệu đầu vào mô tả cấu trúc hình học, thành phần vật liệu, dữ liệu vận hành của lò phản ứng, lựa chọn mô hình và phương pháp tính toán ... Chương trình CITATION được viết bằng ngôn ngữ lập trình FORTRAN và gồm 210 chương trình con. Phiên bản được sử dụng

trong tính toán này là CITATION-LDI 2. Chương trình WIMSD được xây dựng và phát triển bởi Tổ chức Năng lượng nguyên tử Winfrith, dùng để tính toán ô mạng của lò phản ứng. Chương trình này được viết bằng ngôn ngữ lập trình FORTRAN và dưới dạng các module, bao gồm một chương trình chính và 16 chương trình con. Cấu trúc của chương trình WIMSD bao gồm ba phần: tính toán nhiều nhóm năng lượng, tính toán ít nhóm năng lượng và hiệu chỉnh. Trong nghiên cứu này, phiên bản WIMSD-5A được sử dụng cùng với thư viện số liệu WIMS '1986', trong đó năng lượng neutron từ 10 MeV đến 0 MeV được chia thành 69 nhóm. Số liệu đầu vào cho chương trình này là các thông số hình học và vật liệu của ô mạng nhiên liệu và lựa chọn mô hình tính toán.

Hệ số nhiệt độ của độ phản ứng α_T đặc trưng cho tốc độ thay đổi của độ phản ứng theo nhiệt độ chất làm chậm và được tính bằng công thức [4]:

$$\alpha_T = \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{k_{eff}^2} \frac{\partial k_{eff}}{\partial T} \quad (1)$$

Trong đó, ρ là độ phản ứng, k_{eff} là hệ số nhân hiệu dụng của lò phản ứng và T là nhiệt độ chất làm chậm.

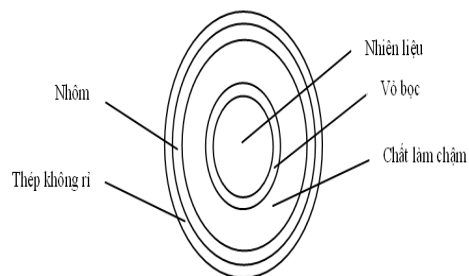


Hình 1. Cấu trúc lò phản ứng hạt nhân MNSR

PHƯƠNG PHÁP

Mô hình tính toán của bài toán ô mạng

Trong nghiên cứu này, phương pháp tọa độ gián đoạn [5] và mô hình ô mạng pincell trong chương trình WIMSD được sử dụng đối với bài toán ô mạng. Tính toán nhiều nhóm sử dụng 69 nhóm năng lượng chuẩn của thư viện chương trình WIMSD. Tính toán ít nhóm sử dụng bốn nhóm năng lượng. Cấu trúc của bốn nhóm năng lượng này như sau: nhóm một từ 10 MeV đến 0,821 MeV; nhóm hai từ 0,821 MeV xuống 5530 eV; nhóm ba từ 5530 eV xuống 0,625 eV và nhóm bốn từ 0,625 eV xuống 0 eV.



Hình 2. Mô hình một ô mạng nhiên liệu trong bài toán ô mạng

Ô mạng nhiên liệu (Hình 2) được tính tương đương với một thanh nhiên liệu. Mô hình pincell của một ô mạng nhiên liệu bao gồm năm lớp, chứa các thành phần lần lượt là nhiên liệu, vỏ bọc, chất làm chậm, nhôm và thép không gỉ. Thành phần nhôm trong lớp thứ tư

giống với các thanh nhôm (dummy rod), còn thành phần thép không rỉ trong lớp thứ năm giống với các thanh nối (tie rod) trong vùng hoạt. Tỷ lệ diện tích giữa các lớp được giữ nguyên như trong thực tế. Diện tích của lớp chất làm chậm trong ô mạng bằng diện tích chất làm chậm thực tế trong vùng hoạt chia cho số lượng các thanh nhiên liệu trong vùng hoạt (347 thanh). Diện tích lớp nhôm và thép không rỉ của ô mạng bằng diện tích của các thanh nhôm (ba thanh) và thép không rỉ (bốn thanh) trong vùng hoạt chia cho số lượng các thanh nhiên liệu. Với cách tính như vậy, bán kính ngoài của các lớp trong ô mạng nhiên liệu như sau: 0,215 cm; 0,275 cm; 0,61820 cm; 0,61873 cm và 0,61971 cm.

Ô mạng thanh điều khiển bao gồm sáu lớp: cadmium, vỏ bọc thanh điều khiển, lớp nước nhẹ tương ứng với thanh điều khiển, lớp nước

nhẹ tương ứng với nhiên liệu, vỏ bọc nhiên liệu và nhiên liệu. Ba lớp đầu sẽ được tính như một vùng và hằng số nhóm của vùng này được sử dụng như hằng số nhóm của thanh điều khiển. Bán kính ngoài của các lớp trong ô mạng thanh điều khiển lần lượt là: 0,195 cm; 0,245 cm; 0,575 cm; 0,8632 cm; 0,9600 cm và 1,0949 cm.

Ô mạng nước nhẹ và ô mạng beryllium có cấu trúc giống nhau, gồm sáu lớp, năm lớp đầu tương tự như trong ô mạng nhiên liệu đóng vai trò là nguồn neutron, lớp thứ sáu là nước nhẹ hoặc Beryllium.

Mô hình tính toán toàn lò

Bài toán toàn lò giải hệ phương trình khuếch tán neutron nhiều nhóm trong môi trường lò phản ứng [2]:

$$-D_{r,g} \Delta \Phi_{r,g} + (\Sigma_{a,r,g} + \sum_{g'} \Sigma_{s,r,g \rightarrow g'}) \Phi_{r,g} = \sum_{g'} (\Sigma_{s,r,g' \rightarrow g} + \frac{\chi_g (\nu \Sigma)_{f,r,g'}}{k_{eff}}) \Phi_{r,g'} \quad (2)$$

Trong đó, Δ là ký hiệu toán tử Laplacian hình học, $\Phi_{r,g}$ là thông lượng neutron tại vị trí r với năng lượng thuộc nhóm g , $\Sigma_{a,r,g}$ là tiết diện hấp thụ vĩ mô nhóm g tại vị trí r , $\Sigma_{s,r,g \rightarrow g'}$ là tiết diện tán xạ vĩ mô từ nhóm g đến nhóm g' tại vị trí r , $D_{r,g}$ là hệ số khuếch tán neutron tại vị trí r đối với neutron nhóm g , $\nu \Sigma_{f,r,g}$ là tiết diện sinh neutron vĩ mô, χ_g là phần neutron nhóm g được tạo ra từ phản ứng phân hạch hạt nhân, k_{eff} là hệ số nhân hiệu dụng của LPU.

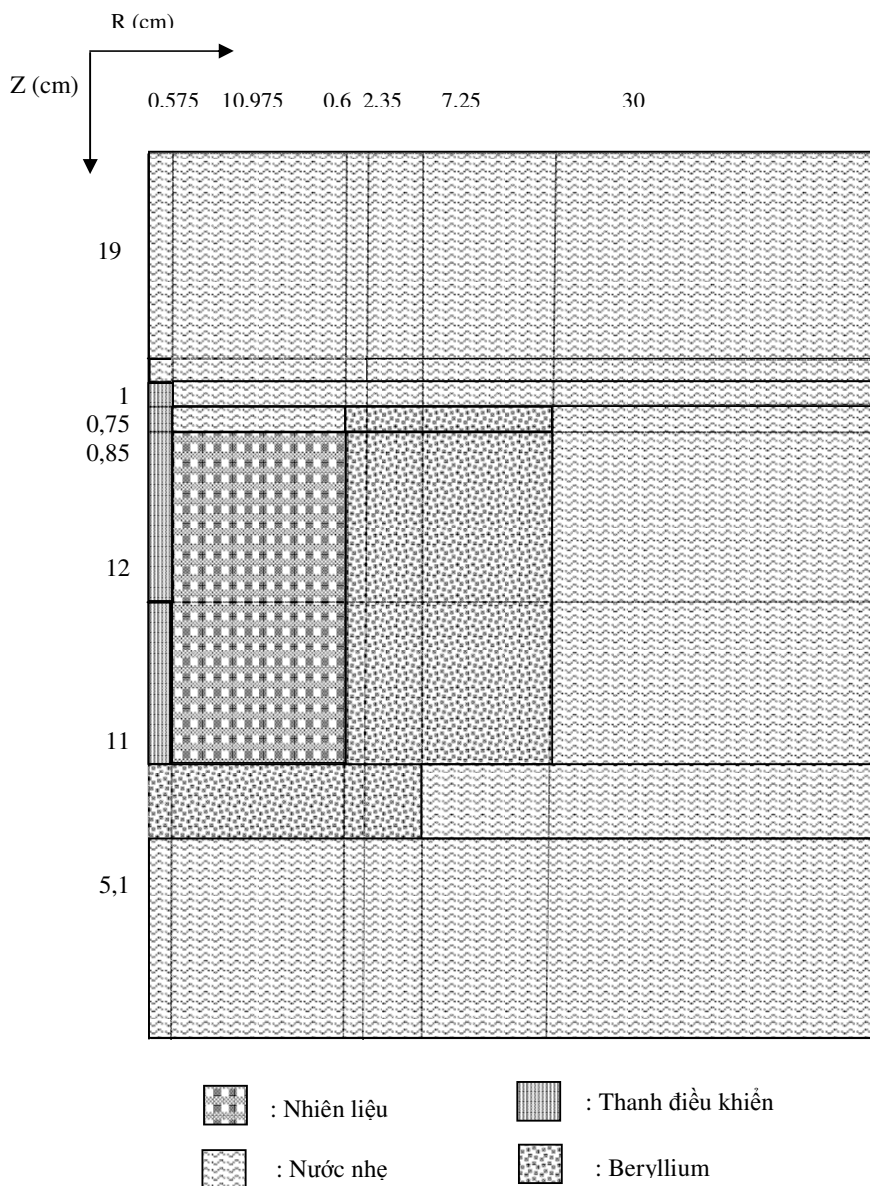
Chương trình CITATION được xây dựng để giải phương trình (2) bằng phương pháp sai phân hữu hạn trong hình học tổng quát. Trong

nghiên cứu này, hình học được sử dụng trong bài toán toàn lò là hình học hai chiều (R, Z). Điều kiện biên phản xạ được sử dụng theo chiều cao Z tại đường trung tâm của vùng hoạt còn tại các mặt biên khác là điều kiện biên ngoại suy.

Theo chiều bán kính R, lò được chia làm sáu vùng với kích thước lần lượt là: 0,575 cm; 10,975 cm; 0,6 cm; 2,35 cm; 7,25 cm và 30 cm. Theo chiều cao Z, lò được chia làm tám vùng với kích thước lần lượt là 19 cm; 1 cm; 0,75 cm; 0,85 cm; 12 cm; 11 cm; 5,1 cm và 20 cm. Hình 3 mô tả sự phân vùng lò phản ứng trong

tính toán toàn lò. Vùng thứ hai từ trên xuống dưới theo chiều Z dành cho beryllium tại đỉnh vùng hoạt. Vùng thứ năm và vùng thứ sáu từ trên xuống theo chiều Z dùng để khảo sát hiệu dụng của thanh điều khiển. Kích thước của vùng thứ năm được thay đổi tương ứng với

chiều dài phần thanh điều khiển được đưa vào vùng hoạt, đồng thời kích thước vùng thứ sáu sẽ thay đổi tương ứng, sao cho tổng kích thước vùng thứ năm và thứ sáu luôn bằng chiều cao vùng hoạt (23 cm).



Hình 3. Mô hình cho tính toán toàn lò bằng chương trình CITATION

KẾT QUẢ

Kết quả bài toán ô mạng

Kết quả của bài toán ô mạng được trình bày ở đây là hằng số nhóm của các loại vật liệu đối với 4 nhóm năng lượng. Kết quả này được sử dụng cho bài toán toàn lò. Bảng 2 và 3 trình

bày kết quả tính hằng số nhóm của các loại ô mạng của lò phản ứng MNSR tại nhiệt độ 20 °C. Trong đó, D_g là hệ số khuếch tán nhóm g; $\Sigma_{a,g}$ là hệ số hấp thụ nhóm g; $v\Sigma_{f,g}$ là tiết diện sản sinh neutron nhóm g và $\Sigma_{s,g \rightarrow 1}$, $\Sigma_{s,g \rightarrow 2}$, $\Sigma_{s,g \rightarrow 3}$, $\Sigma_{s,g \rightarrow 4}$ lần lượt là tiết diện tán xạ từ nhóm g đến nhóm 1, 2, 3 và 4.

Bảng 2. Hằng số nhóm của các loại vật liệu

Loại ô mạng	Nhóm năng lượng g	$D_g(\text{cm})$	$\Sigma_{a,g} (\text{cm}^{-1})$	$v\Sigma_{f,g} (\text{cm}^{-1})$
Nhiên liệu	1	2,248100	$7,77622.10^{-4}$	$1,06855.10^{-3}$
	2	1,188900	$6,65789.10^{-4}$	$1,21476.10^{-3}$
	3	0,684209	$1,08263.10^{-2}$	$1,49489.10^{-2}$
	4	0,210507	$1,11783.10^{-1}$	$2,00513.10^{-1}$
Thanh điều khiển	1	1,984330	$6,12168.10^{-4}$	0
	2	1,095480	$1,27875.10^{-3}$	0
	3	0,598309	$1,38115.10^{-2}$	0
	4	0,213999	$3,62198.10^{-1}$	0
Beryllium	1	1,523790	0	0
	2	0,615631	$9,21669.10^{-8}$	0
	3	0,484121	$2,80964.10^{-5}$	0
	4	0,445616	$5,55273.10^{-4}$	0
Nước nhẹ	1	2,133560	$4,04460.10^{-4}$	0
	2	1,075340	$9,27828.10^{-6}$	0
	3	0,580353	$9,34747.10^{-4}$	0
	4	0,157778	$1,87768.10^{-2}$	0

Bảng 3. Tiết diện tán xạ của các loại vật liệu

Loại ô mạng	Nhóm năng lượng g	$\Sigma_{s,g \rightarrow 1} (\text{cm}^{-1})$	$\Sigma_{s,g \rightarrow 2} (\text{cm}^{-1})$	$\Sigma_{s,g \rightarrow 3} (\text{cm}^{-1})$	$\Sigma_{s,g \rightarrow 4} (\text{cm}^{-1})$
Nhiên liệu	1	0	$9,35398.10^{-2}$	$5,55658.10^{-4}$	0
	2	0	0	$1,06761.10^{-1}$	$1,03303.10^{-5}$
	3	0	0	0	$1,01535.10^{-1}$
	4	0	0	$4,91624.10^{-4}$	0
Thanh điều khiển	1	0	$9,74437.10^{-2}$	$5,92169.10^{-4}$	0
	2	0	0	$1,05260.10^{-1}$	$1,01094.10^{-5}$
	3	0	0	0	$8,83936.10^{-2}$
	4	0	0	$1,39438.10^{-3}$	0
Beryllium	1	0	$6,89230.10^{-2}$	0	0
	2	0	0	$1,57782.10^{-2}$	0
	3	0	0	0	$1,23376.10^{-2}$
	4	0	0	$2,95701.10^{-4}$	0

Nước nhẹ	1	0	$1,13048.10^{-1}$	$7,02058.10^{-4}$	0
	2	0	0	$1,40484.10^{-1}$	$1,36645.10^{-5}$
	3	0	0	0	$1,37015.10^{-1}$
	4	0	0	$1,28207.10^{-4}$	0

Thừa số nhân hiệu dụng của lò phản ứng

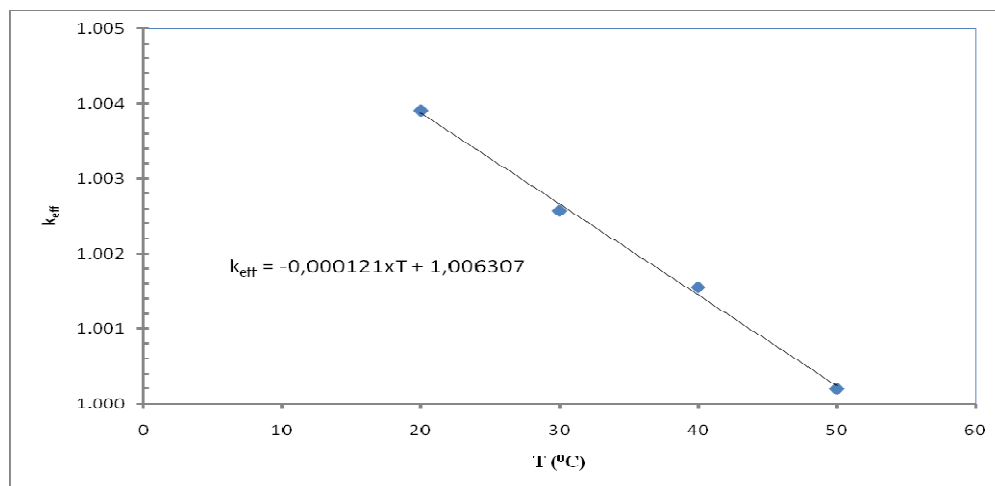
Kết quả của bài toán ô mạng được sử dụng để giải bài toán toàn lò được thực hiện bằng chương trình CITATION. Trong các tính toán thừa số nhân hiệu dụng được thực hiện ở đây, thanh điều khiển trung tâm được rút hoàn toàn khỏi vùng hoạt lò phản ứng và các tấm phân xạ beryllium phía trên vùng hoạt được thay bằng nước. Kết quả tính thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} tương ứng với nhiệt độ chất làm chậm khác

nhau được trình bày trên bảng 4. Hình 4 biểu diễn bằng đồ thị sự biến đổi của thừa số nhân hiệu dụng theo nhiệt độ chất làm chậm. Có thể nhận thấy rằng thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} giảm tuyến tính theo nhiệt độ T của chất làm chậm. Sự phụ thuộc này có thể được biểu diễn bởi hàm khớp bình phương tối thiểu dạng tuyến tính như sau:

$$k_{eff} = -0,000121 \times T + 1,006307 \quad (3)$$

Bảng 4. Sự phụ thuộc của hệ số nhân hiệu dụng là hệ số nhiệt độ của độ phản ứng vào nhiệt độ chất làm chậm

T (°C)	k_{eff}	α_T (mk/°C)
20	1,003908	-0,125
30	1,002576	-0,129
40	1,001557	-0,132
50	1,000204	-0,135



Hình 4. Biến đổi của thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} vào nhiệt độ chất làm chậm T

Hệ số nhiệt độ của độ phản ứng

Dựa trên hàm biểu diễn sự phụ thuộc k_{eff} vào T đã thu được trên đây, theo công thức (1) có thể xác định hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng α_T như sau:

$$\alpha_T = \frac{-0,000121}{k_{eff}^2(T)} = \frac{-0,000121}{(-0,000121 \times T + 1,006307)^2} \quad (4)$$

Kết quả tính toán hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng α_T theo nhiệt độ được

$$\bar{\alpha}_T = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \alpha_T dT = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{k_{eff}(T_1)}^{k_{eff}(T_2)} \frac{1}{k_{eff}^2} dk_{eff} = \frac{1}{T_2 - T_1} \left[\frac{1}{k_{eff}(T_1)} - \frac{1}{k_{eff}(T_2)} \right] \quad (5)$$

Sử dụng phương trình (3) sẽ thu được biểu thức:

$$\bar{\alpha}_T = \frac{-0,000121}{(-0,000121 \times T_1 + 1,006307)(-0,000121 \times T_2 + 1,006307)} \quad (6)$$

Đối với khoảng nhiệt độ làm việc của chất làm chậm lò phản ứng MNSR từ 20 °C đến 50 °C giá trị trung bình của hệ số nhiệt độ của độ phản ứng xác định từ công thức (6) là $\bar{\alpha}_T = -0,121 \text{ mk}^0\text{C}$. Kết quả này phù hợp tốt với báo cáo phân tích an toàn SAR như được trích dẫn trong công trình của I. Khamis và I. Sulieman [6] khi hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng được đánh giá đối với khoảng biến thiên nhiệt độ từ 20 °C đến 45 °C là $\bar{\alpha}_T \approx -0,1 \text{ mk}^0\text{C}$ và với kết quả tính toán của A. Hainoun và các cộng sự [7] bằng chương trình Monte Carlo MCNP cho thấy trong khoảng nhiệt độ từ 20 °C đến 50 °C hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng là $\bar{\alpha}_T = -0,11233 \text{ mk}^0\text{C}$. Giá trị âm của hệ số này cho thấy loại lò phản ứng

trình bày trên cột 3 bảng 4. Kết quả cho thấy hệ số nhiệt độ của độ phản ứng tăng nhẹ theo nhiệt độ chất làm chậm.

Trong vận hành và tính toán phân tích an toàn, giá trị trung bình của hệ số nhiệt độ của độ phản ứng α_T trong vùng nhiệt độ vận hành của lò phản ứng thường được quan tâm. Giá trị trung bình của α_T trong khoảng nhiệt độ từ T_1 đến T_2 có thể được xác định bởi phương trình sau:

MNSR có đặc tính an toàn nội tại. Đây là một trong những ưu điểm của loại lò MNSR.

KẾT LUẬN

Kết quả tính toán đã cho thấy thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} của lò phản ứng MNSR giảm dần khi nhiệt độ chất làm chậm tăng lên và hệ số nhiệt độ của độ phản ứng có độ lớn tăng nhẹ theo nhiệt độ chất làm chậm. Giá trị trung bình của hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng xác định đối với khoảng nhiệt độ làm việc của chất làm chậm từ 20 °C đến 50 °C là $\bar{\alpha}_T = -0,121 \text{ mk}^0\text{C}$. Kết quả này phù hợp tốt với kết quả tính toán của tác giả khác trong các công trình [6, 7] đối với loại lò phản ứng MNSR, và có giá trị cùng bậc với kết quả tính toán và thực nghiệm đối với lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt sử dụng nhiên liệu loại VVR-M2 [8] ($\alpha_T \approx -0,15 \div$

-0,45 mk/ $^{\circ}$ C). Giá trị âm của hệ số này cho thấy loại lò MNSR có tính an toàn nội tại. Kết quả tính toán cũng cho thấy phương pháp đánh giá hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng, kết quả và mô hình tính toán của bài toán ô mạng và bài toán toàn lò đối với lò MNSR đã xây dựng trong công trình này là phù hợp và tin cậy.

Riêng đối với loại lò MNSR, khi sự biến đổi của thừa số nhân hiệu dụng k_{eff} theo nhiệt độ

chất làm chậm có dạng tuyến tính, việc sử dụng biểu diễn toán học dạng (4) và (6) cho phép đánh giá hệ số nhiệt độ chất làm chậm của độ phản ứng α_T tại từng nhiệt độ xác định và tính toán giá trị trung bình $\bar{\alpha}_T$ trong một khoảng nhiệt độ nhất định trực tiếp thông qua giá trị nhiệt độ đầu và cuối. Kết quả này cung cấp một biểu diễn toán học thuận lợi cho các tính toán động học và tính toán đánh giá an toàn lò phản ứng.

CALCULATION OF THE MODERATOR TEMPERATURE COEFFICIENT OF REACTIVITY FOR MINIATURE NEUTRON SOURCE REACTORS

Do Quang Binh⁽¹⁾, Nguyen Hoang Hai⁽²⁾

(1) University of Technical Education Ho Chi Minh City

(2) Research and Development Center for Radiation Technology, Ho Chi Minh city

This paper presents results of the evaluated group constants for fuel and other important materials of the Miniature Neutron Source Reactor (MNSR) and the moderator temperature coefficient of reactivity through global reactor calculation. In this study, the group constants were calculated with the WIMSD code and the global reactor calculation is accomplished by the CITATION code. This work also presents a method for evaluation of the moderator temperature coefficient of reactivity at different temperatures and it's average value in a range of temperatures directly through the values of moderator temperature for MNSRs. This method provides simple analytical representation convenient for reactor kinetics calculation and reactor safety assessment.

Keywords: nuclear reactor, MNSR, group constants, moderator temperature coefficient of reactivity, WIMSD, CITATION.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. A. Hainoun, S. Alissa, Full-scale modelling of the MNSR reactor to simulate normal operation, transients and reactivity insertion accidents under

natural circulation conditions using the thermal hydraulic code ATHLET, *Nuclear Engineering and Design*, 235, 33 - 52 (2005).

- [2]. T. B. Fowler, D. R. Vondy, F. B. Kemshell, *Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION. ORNL-TM-2496*, RSICC (1971).
- [3]. AEA Technology, *WIMSD – A neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis*, ANSWERS Software Service (1997).
- [4]. G. I. Bell, S. Glasstone, *Nuclear Reactor Theory*, Van Nostrand Reinhold Company, New York (1970).
- [5]. J. J. Duderstadt, L. J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons, New York (1976).
- [6]. I. Khamis, I. Sulieman, Monte Carlo simulation of a conceptual thermal column in the Syrian miniature neutron source reactor using MCNP – 4C, *Annals of Nuclear Energy*, 33, 622 – 626 (2006).
- [7]. A. Hainoun, H. Haj Hassan, N. Ghazi, Determination of major kinetic parameters of the Syrian MNSR for different fuel loading using Monte Carlo technique, *Annals of Nuclear Energy*, 36, 1663 – 1667 (2009).
- [8]. Đ. Q. Bình, N. P. Lân, N. K. Cường, Đánh giá lý thuyết các đặc trưng vật lý neutron của ô mạng nhiên liệu lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt, *Tuyển tập báo cáo khoa học Hội nghị toàn quốc lần thứ IV về Khoa học và Công nghệ hạt nhân, 26-27/4/2001, Hà Nội*, NXB KH&KT Hà Nội, 68–72 (2002).