

ĐÁNH GIÁ MỘT SỐ THIẾT KẾ THANH NHIÊN LIỆU Lò PHẢN ỨNG VVER1000 SỬ DỤNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN MVP

PHẠM TUẤN NAM, LÊ THỊ THU, NGUYỄN THỊ TÚ OANH

*Viện Khoa Học và Kỹ Thuật Hạt Nhân
179 Hoàng Quốc Việt, Nghĩa Đô- Cầu Giấy-Hà Nội
Email: ptn2910@gmail.com*

Tóm tắt: Trong quá trình phát triển, các lò phản ứng (LPU) hạt nhân luôn được chú trọng cải tiến hiệu suất sử dụng nhiên liệu, tăng mức độ an toàn của các bộ phận trong nhà máy, và đảm bảo hiệu quả kinh tế. Do đó, những nghiên cứu gần đây tập trung vào việc tìm ra cấu trúc nhiên liệu tối ưu, vừa đảm bảo hiệu quả kinh tế mà vẫn an toàn trong các điều kiện làm việc của nhà máy. Bài báo này trình bày những kết quả tính toán neutron để đánh giá một số thiết kế thanh nhiên liệu LPU VVER1000 sử dụng chương trình tính toán MVP.

Khác biệt cơ bản trong cấu trúc viên nhiên liệu của LPU VVER1000 so với thiết kế viên nhiên liệu LPU PWR là có một khe hình trụ rỗng ở tâm để giảm sự gãy vỡ của nhiên liệu do dẫn nở nhiệt trong quá trình hoạt động. Điều này làm phức tạp quá trình gia công chế tạo nhiên liệu, do đó có những ý tưởng loại bỏ hoặc giảm kích thước khe rỗng và bề dày vỏ bọc. Những kết quả tính toán chỉ ra rằng hệ số nhân hiệu dụng (k -eff) tăng lên sau khi thực hiện những cải tiến này, vì đã đưa thêm vào trong cơ cấu một lượng nhiên liệu hạt nhân. Hệ số nhân hiệu dụng tăng lên khoảng 2% trong 1 bó nhiên liệu, để điều khiển và vận hành an toàn thì cần có thêm những thành phần hấp thụ nhằm duy trì trạng thái tới hạn, cải tiến này có thể giúp tăng độ sâu cháy của nhiên liệu và công suất nhiệt, tăng độ dự trữ phản ứng; độ dày vỏ bọc cũng được tăng lên nhằm đảm bảo tính nguyên vẹn của thanh nhiên liệu, nâng cao mức độ an toàn.

Key word: VVER1000, thanh nhiên liệu, k -eff, MVP.

Abstract: During development progressing of nuclear reactor, exports focus to: (1) Improving productivity of nuclear fuel cycle; (2) Increasing of safety level in nuclear power plant (NPP) system; (3) Ensuring economic advantage. Thus, research programs often find best structures of fuel, best of material and conditions where system behaviors stably and safely. In this report, effective neutron reactivity factor (k -eff) calculations were carried to estimate difference fuel pellet structures in VVER1000 fuel rod and assembly by MVP code.

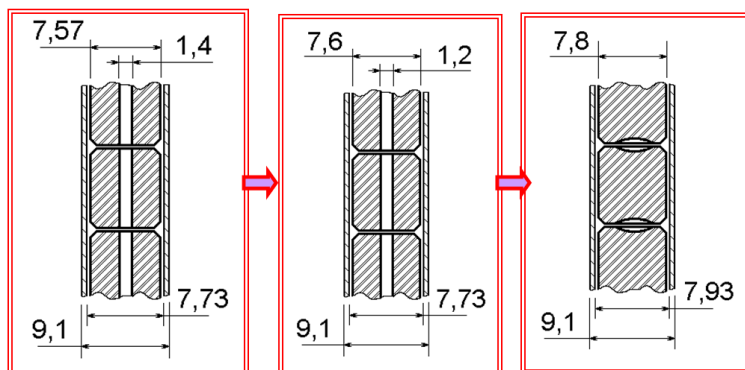
Important difference in VVER1000 fuel pellet structure is central hold that help decreasing breaking of fuel pellet when NPP operates. The central hold causes difficulties in fuel rod manufacture, thus experts want to removed this central hold and increasing thickness of cladding. Results of calculations indicate that k -eff increases because amount of fuel material was added in. Increasing level is small, about 2%, but have to add in absorbed material to keep critical state. Increasing of k -eff do to increasing reactivity margin, can help to increase NPP power but have to ensure safely for elements in core, such as increasing thickness of cladding.

1. MỞ ĐẦU

Lò phản ứng VVER hay viết tắt bằng tiếng Anh là WWER (Water-Water Energetic Reactor), được thiết kế và xây dựng bởi các chuyên gia Nga, bắt đầu nghiên cứu và phát triển từ đầu những năm 50 của thế kỷ XX. Trong suốt lịch sử xây dựng và phát triển, số lượng lò VVER đã lên tới khoảng 59 tổ máy đang vận hành tại: Nga, Ukraina, Ấn Độ, Iran, Cộng Hòa Séc, Slovakia, Trung Quốc, Hungary, Đức, Phần Lan,... Trong thời gian đó, cấu trúc và các thành phần của VVER không ngừng được nghiên cứu cải tiến, với mục đích:

- Tối ưu việc chuyển hóa năng lượng hạt nhân thành năng lượng điện.
- Giảm giá thành của hệ thống.
- Nâng cao độ an toàn của nhà máy trong quá trình hoạt động.

Với những tiêu chí đó, có rất nhiều những cái tiến đã được nghiên cứu, triển khai thực hiện, trong bài báo này chỉ tập trung đánh giá sự thay đổi của hệ số nhân hiệu dụng khi co hẹp và loại bỏ khe rỗng ở tâm viên nhiên liệu, đồng thời tăng độ dày của vỏ bọc nhiên liệu [1]. Cụ thể:



Hình 1: Thay đổi hình học của viên nhiên liệu [1]

Mục đích của cái tiến trên là tối ưu chu trình nhiên liệu, tăng thời gian hoạt động ở mức công suất danh định do đưa thêm vào trong lò phản ứng một lượng nhiên liệu, tăng độ an toàn trong quá trình vận hành lò phản ứng khi vỏ bọc nhiên liệu đã được tăng cường, hạn chế sự hư hại xuất hiện trong vỏ bọc [1].

Những tính toán neutron được thực hiện dựa trên việc sử dụng chương trình tính toán vật lý lò phản ứng MVP, thư viện số liệu hạt nhân JENDL-3.3 (Kí hiệu J33), chạy trong hệ điều hành WINDOW trên máy tính cá nhân, tính toán cho thanh nhiên liệu và bó nhiên liệu trước và sau cải tiến, tìm hiểu và đánh giá những thay đổi xuất hiện do cải tiến.

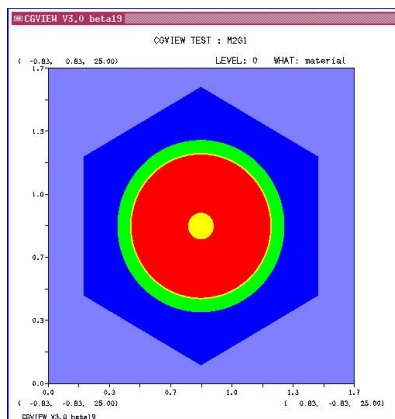
2. TÍNH TOÁN HỆ SỐ NHÂN HIỆU DỤNG VỚI NHỮNG THIẾT KẾ THANH NHIÊN LIỆU KHÁC NHAU

Để so sánh ảnh hưởng khi thay đổi hình học viên nhiên liệu, các thông số của các thành phần nhiên vật liệu, như: độ giàu Uran-235 trong nhiên liệu là 3.3%, các thành phần vật liệu vỏ bọc, chất làm mát và khí Heli được giữ cố định, bảng 1 dưới đây mô tả các thông số nhiên vật liệu được sử dụng trong tính toán.

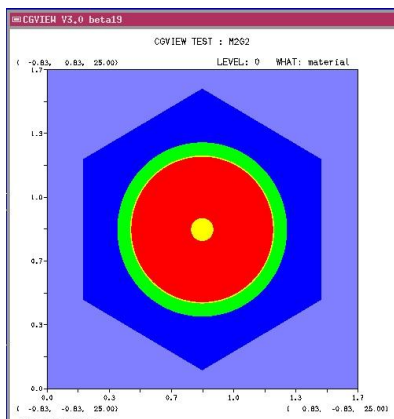
Bảng 1. Các thông số vật liệu (mật độ, nhiệt độ và áp suất) trong thiết kế nhiên liệu lò phản ứng VVER1000

Nhiên liệu (Oxit Urani UO ₂)	Độ giàu	3.3 wt.%
	Nhiệt độ	1005 K
Vật liệu vỏ bọc (Hợp kim Zirconium)	Đồng vị: kí hiệu (Mật độ) (10 ²⁴ Hạt nhân trên cm ³)	Uran-235: U02350J33 (7.6886E-4) Uran-238: U02380J33 (2.2293E-2) Oxi-16: O00160J33 (4.6297E-2)
	Đồng vị: kí hiệu (mật độ) (10 ²⁴ Hạt nhân trên cm ³)	Zirconi-91: ZR091ZJ33 (4.2141E-2) Nb-93: NB0930J33 (4.1808E-4) Hf-174: HF1740J33 (6.5285E-6)
	Helium	Nhiệt độ 600 K Đồng vị: kí hiệu (mật độ) Heli-2: HE0030J33 (2.6700E-2)

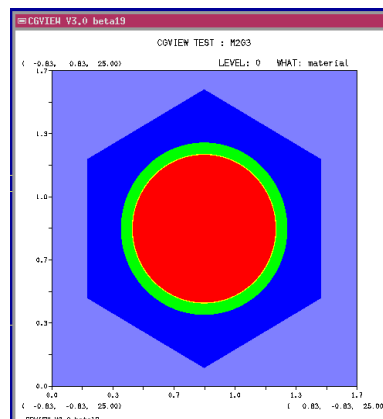
	(10^{24} Hạt nhân trên cm^3)	
Vật liệu làm chậm (H_2O)	Nhiệt độ	578 K
	Áp suất	15.6 MPa
	Đồng vị: kí hiệu (mật độ) (10^{24} Hạt nhân trên cm^3)	Hydro-2: H0001HJ33 (4.7508E-2) Oxi-16: O00160J33 (2.3754E-2)



(1) Hiện tại.



(2) Giảm kích thước khe rỗng; Tăng bán kính ngoài của viên nhiên liệu; Giữ nguyên bề dày vỏ bọc.



(3) Bỏ khe rỗng ở tâm; Tăng bán kính ngoài của viên nhiên liệu; Tăng bề dày vỏ bọc nhiên liệu.

Hình 2. Mô phỏng thanh nhiên liệu trong chương trình tính toán MVP

Việc tính toán hệ số nhân neutron hiệu dụng đánh giá ảnh hưởng hình học viên nhiên liệu tới thanh nhiên liệu và cả bó nhiên liệu. Kết hợp các thông số vật liệu và hình học trình bày ở trên, sử dụng chương trình tính toán MVP, mô hình thanh nhiên liệu được mô phỏng như hình 2, và kết quả tính toán trình bày trong bảng 3.

Hệ số nhân hiệu dụng trong 3 mô hình thanh nhiên liệu lần lượt là 1.24515, 1.24902, 1.25888. Hệ số nhân hiệu dụng tăng dần lên là do một lượng nhiên liệu hạt nhân đã được đưa vào trong thanh nhiên liệu, làm tăng khả năng phân hạch và tạo ra nhiều neutron hơn sau mỗi thế hệ.

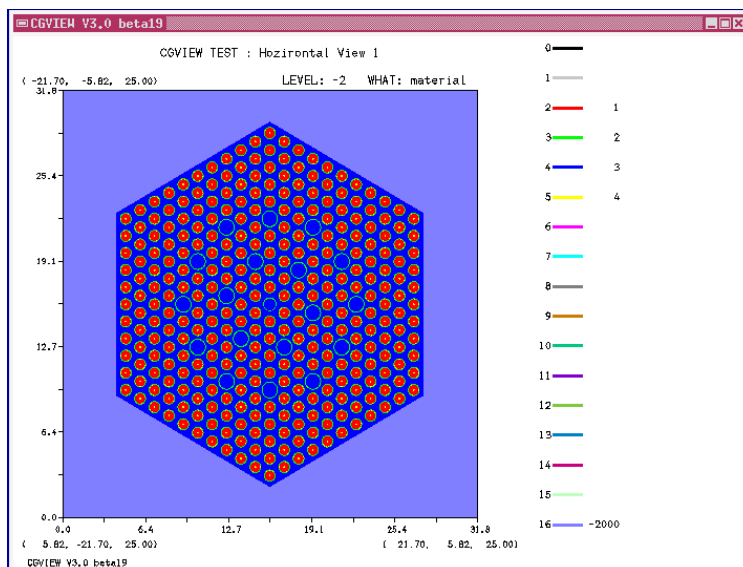
Sau khi thực hiện tính toán hệ số nhân hiệu dụng $k\text{-eff}$ cho thanh nhiên liệu, những tính toán tiếp thực thực hiện đối với bó nhiên liệu nhằm đánh giá đầy đủ hơn ảnh hưởng mà sự cải tiến cấu trúc thanh nhiên liệu gây ra. Các thông số mô tả hình học bó nhiên liệu được trình bày trong bảng 2, các thành vật liệu sử dụng trong bó nhiên liệu tương tự như trong thanh nhiên liệu, đã được trình bày trong bảng 1.

Bảng 2. Các thông số hình học của thanh và bó nhiên liệu lò phản ứng VVER-1000 [2]

Thông số	Giá trị
Nhiệt độ trung bình chất làm mát, $^{\circ}\text{C}$	315,000
Core FA pitch, m	0,236
Số lượng thanh nhiên liệu trong mỗi bó	312,000
Khoảng cách giữa các thanh nhiên liệu trong bó, m	$12,75 \times 10^{-3}$
Chiều cao thanh nhiên liệu, m	3,530
Ống dẫn thanh điều khiển	
Số ống dẫn thanh điều khiển trong 1 bó	18
Đường kính ngoài, m	$13,0 \times 10^{-3}$
Đường kính trong, m	$11,0 \times 10^{-3}$

Ống trung tâm	
Số lượng	1
Đường kính ngoài, m	$13,0 \times 10^{-3}$
Đường kính trong, m	$11,0 \times 10^{-3}$

Kết quả mô phỏng bố nhiên liệu LPU VVER1000 trong chương trình tính toán MVP được thể hiện trong hình 3 dưới đây.



Hình 3. Hình dạng bố nhiên liệu lò phản ứng VVER1000 mô phỏng trong MVP.

Bảng 3. Kết quả tính toán sự thay đổi hệ số nhân khi thay đổi hình dạng viên nhiên liệu lò phản ứng VVER1000

Loại hình học	Tính toán cho thanh nhiên liệu			Tính toán cho bó nhiên liệu		
	k-eff	Sai số	Thay đổi	k-eff	Sai số	Thay đổi
1	1.24515	0.0084%		1.11767	0.0082%	
2	1.24902	0.0083%	0.311%	1.12414	0.0086%	0.579%
3	1.25888	0.0088%	1.103%	1.14268	0.0084%	2.238%
Trung bình		0.0085%			0.0084%	

Kết quả tính toán k-eff cho bố nhiên liệu tương đồng với kết quả tính toán cho thanh nhiên liệu, khi lượng nhiên liệu đưa vào cơ cấu càng nhiều, xác suất xảy ra phản ứng phân hạch càng lớn, hệ số nhân hiệu dụng càng cao.

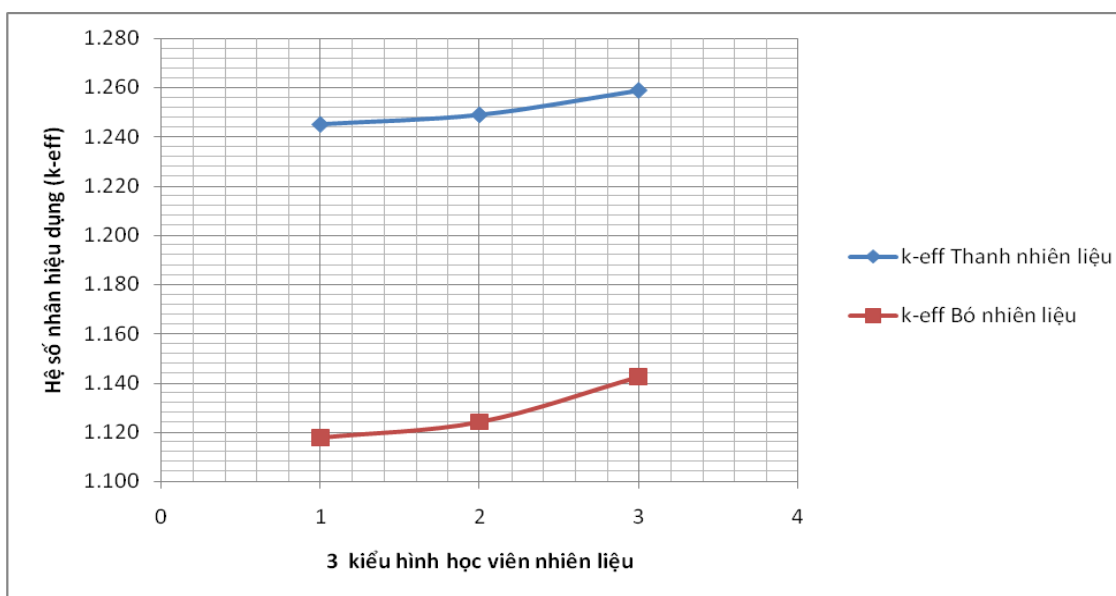
3. NHẬN XÉT

Kết quả tính toán hệ số nhân hiệu dụng k-eff trong các hình học khác nhau của thanh nhiên liệu và bó nhiên liệu sử dụng chương trình tính toán MVP có sai số thấp, sai số trung bình trong tính toán cho thanh nhiên liệu là 0,0085%, trong tính toán cho bó nhiên liệu là 0,0084%, kết quả tính toán đáng tin cậy.

Các cải tiến trong cấu trúc viên nhiên liệu đều làm tăng hệ số nhân hiệu dụng k-eff vì trong cả 2 trường hợp đều tăng kích thước viên nhiên liệu, nghĩa là đưa vào thêm một lượng nhiên liệu hạt nhân làm cơ cấu tăng khả năng đạt tới hạn hơn. Cụ thể, cải tiến thứ nhất, giảm bán kính khe rỗng ở tâm, tăng bán kính ngoài của viên nhiên liệu (hình học nhiên liệu số 2) thì lượng nhiên liệu thêm vào ít hơn, tỉ lệ tăng hệ số nhân hiệu dụng k-eff thấp hơn, tăng 0,311% cho tính toán thanh, và 0,579% cho tính toán bó nhiên liệu. Sự thay đổi này rất nhỏ so

với cải tiến thứ 2 (hình học nhiên liệu số 3), bỏ hẳn khe khí ở tâm viên nhiên liệu, hệ số nhân hiệu dụng tăng lên 1,103% trong thanh, và 2,238% trong bó nhiên liệu.

Việc tăng lượng nhiên liệu trong cơ cấu giúp tăng khả năng đạt tới hạn, có thể tăng độ cháy của nhiên liệu giúp lò phản ứng có thể đạt được công suất cao hơn, vấn đề tăng công suất làm tăng nhiệt độ và áp suất làm việc, vì vậy cần phải tăng khả năng chịu đựng của thanh nhiên liệu, đó là lý do của việc tăng kích thước vỏ bọc. Đồng thời, việc tăng lượng nhiên liệu trong cơ cấu làm tăng độ dự trữ phản ứng của các bó nhiên liệu, các bó nhiên liệu có thể được sử dụng lâu hơn, và tiết kiệm hơn về mặt kinh tế nếu đảm bảo được các thông số an toàn. Tác dụng của khe rỗng nhằm giảm thiểu hiện tượng nứt vỡ nhiên liệu do dẫn nở nhiệt trong quá trình hoạt động của lò phản ứng là không đáng kể, việc bỏ đi khe rỗng làm giảm mức độ phức tạp trong quá trình gia công viên nhiên liệu, giúp giảm giá thành nhiên liệu.



Hình 4. Sự thay đổi hệ số k-eff theo cấu trúc cải tiến của viên nhiên liệu trong thanh và trong bó nhiên liệu

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo, nhóm tác giả đã thực hiện mô phỏng và tính toán hệ số nhân hiệu dụng k-eff trong thanh nhiên liệu và bó nhiên liệu lò phản ứng VVER1000 đối với 1 số thiết kế khác nhau của viên nhiên liệu. Kết quả thu được thể hiện k-eff tăng lên khi lượng nhiên liệu hạt nhân trong cơ cấu tăng lên, đồng thời tăng bề dày vỏ bọc nhiên liệu để chống chịu được trạng thái làm việc có nhiệt độ, áp suất cao hơn, cũng như trong một thời gian dài hơn.

Mô hình nhiên liệu tối ưu giúp giảm giá thành của điện hạt nhân cũng như nâng cao mức độ an toàn. Cải tiến về mặt hình học được đưa ra bởi Semchenkov Y.M., Pavlovichev A.M., Pavlov V.I., Spirkin E.I., Styryn Y.A. và Kosourov E.K của viện nghiên cứu Kurchatov, Moscow, Nga thể hiện những kết quả tích cực và đang được đưa vào ứng dụng trong thực tế. Những tính toán thực hiện trong bài báo này nhằm hoàn thiện khả năng sử dụng chương trình toán, hiệu hơn về công nghệ lò phản ứng VVER1000 và những cải tiến đang được thực hiện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Semchenkov Y.M., Pavlovichev A.M., Pavlov V.I., Spirkin E.I., Styryn Y.A. and Kosourov E.K; *Advanced fuel cycles for VVER-1000 reactors*; RRC “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia.

- [2] A.A Timofeeva, K.Yu. Kurakin, “Calculation of isotope burn-up and change in efficiency of absorbing elements of WWER-1000 control and protection system during burn-up”, Podolsk, Russia.
- [3] Lê Đại Diễn, Báo cáo tổng kết đề tài khoa học công nghệ cấp cơ sở “Sử dụng chương trình MVP tính toán cho mô hình bó nhiên liệu HEU và LEU của lò phản ứng hạt nhân Đà Lạt”, Hà Nội(2007).