

TIÊU CHUẨN QUỐC GIA

TCVN 9104:2011

ISO 10645:1992

NĂNG LƯỢNG HẠT NHÂN - Lò phản ứng nước nhẹ - Tính toán công suất nhiệt phân rã trong nhiên liệu hạt nhân

Nuclear energy - Light water reactors - Calculation of the decay heat power in nuclear fuels

Lời nói đầu

TCVN 9104:2011 hoàn toàn tương đương với ISO 10645:1992;

TCVN 9104:2011 do Ban kỹ thuật Tiêu chuẩn quốc gia TCVN/TC 85 Năng lượng hạt nhân biên soạn, Tổng cục Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng đề nghị, Bộ Khoa học và Công nghệ công bố.

Lời giới thiệu

Công suất nhiệt phân rã của nhiên liệu hạt nhân là công suất nhiệt được tạo ra do phân rã phóng xạ của các sản phẩm phân hạch và kích hoạt của nhiên liệu hạt nhân sau khi dừng lò. Công suất nhiệt phân rã là một đại lượng vật lý quan trọng trong việc thiết kế các hệ thống trong đó công suất nhiệt phân rã phải được coi là một nguồn nhiệt.

Tiêu chuẩn này đưa ra giá trị công suất nhiệt phân rã sinh ra cục bộ theo một hàm của công suất nhiệt của nhiên liệu trong quá trình vận hành. Sự phân bố không gian của quá trình chuyển hóa năng lượng thành nhiệt, ví dụ như bức xạ gamma, là không được xét đến. Nếu cần thiết, việc đánh giá này dành cho người sử dụng.

Quy trình tính toán được sử dụng có lợi thế là cho phép tính công suất nhiệt phân rã với một độ chính xác có thể so sánh việc tính tổng bằng chương trình máy tính nhưng không cần các phép tính phức tạp.

Để tính toán công suất nhiệt phân rã hoặc các thành phần riêng của nó, người sử dụng có thể dùng các phương pháp và cơ sở dữ liệu của riêng mình, với điều kiện là tính đúng đắn của chúng được thiết lập. Khi tính các đóng góp của các sản phẩm phân hạch thì các giá trị tính toán đòi hỏi phải so sánh với tiêu chuẩn này.

Công suất chiếu xạ sinh ra bởi các neutron trễ và các vật liệu của cấu trúc bị kích hoạt không được xem xét trong tiêu chuẩn này.

NĂNG LƯỢNG HẠT NHÂN - Lò phản ứng nước nhẹ - Tính toán công suất nhiệt phân rã trong nhiên liệu hạt nhân

Nuclear energy - Light water reactors - Calculation of the decay heat power in nuclear fuels

1. Phạm vi áp dụng

Tiêu chuẩn này đưa ra cơ sở để tính toán công suất nhiệt phân rã của nhiên liệu hạt nhân không tái chế của các lò phản ứng nước nhẹ. Với mục đích này, phải xét đến các thành phần sau đây:

- đóng góp của các sản phẩm phân hạch từ quá trình phân hạch hạt nhân;
- đóng góp của các actinid;
- đóng góp của các đồng vị do các sản phẩm phân hạch bắt các neutron.

Tiêu chuẩn này áp dụng đối với lò phản ứng nước nhẹ (lò phản ứng nước áp lực và lò nước sôi) được nạp với một hỗn hợp nhiên liệu hạt nhân của ^{235}U và ^{238}U . Tiêu chuẩn này không được phép áp dụng cho quy trình tái chế nhiên liệu hạt nhân.

Quy trình tính toán áp dụng cho chu kỳ nhiệt phân rã trong khoảng thời gian từ 0 s đến 10^9 s.

2. Thuật ngữ và định nghĩa

Trong chuẩn này, áp dụng các thuật ngữ và định nghĩa sau

2.1. Công suất nhiệt phân rã của nhiên liệu hạt nhân (decay heat power of nuclear fuels)

Công suất nhiệt sinh ra từ sự phân rã phóng xạ của các sản phẩm phân hạch và kích hoạt của nhiên liệu hạt nhân, sau khi dừng lò.

2.2. Thời gian vận hành (operating time)

Toàn bộ thời gian kể từ lần nạp nhiên liệu đầu tiên cho lò phản ứng cho đến khi dừng lò lần cuối.

2.3. Thời gian phân rã (decay time)

Thời gian trôi qua sau thời gian vận hành

2.4. Biểu đồ công suất (power histogram)

Biểu đồ biểu thị gần đúng sự biến đổi thực của công suất theo thời gian, được chia thành các khoảng có công suất và thành phần nhiên liệu không đổi.

3. Ký hiệu và chỉ số

3.1. Ký hiệu

Kí hiệu	Đại lượng	Đơn vị
$A_{(t)}$	Hệ số được áp dụng cho công suất nhiệt phân rã của sản phẩm phân hạch P_s để tính công suất đóng góp P_A của các actinit (ngoại trừ ^{239}U và ^{239}Np)	-
$f_i(t)$	Công suất nhiệt phân rã của sản phẩm phân hạch tại thời điểm t sau khi phân hạch đơn của nhân phân hạch i	MeV/s
		do phân hạch
$f_i(t)$	Độ lệch chuẩn của $f_{i(t)}$	MeV/s
		do phân hạch
$F_i(t_k, T_k)$	Công suất nhiệt phân rã của sản phẩm phân hạch của nhân phân hạch i tại thời điểm t_k sau thời gian chiếu xạ T_k được tham chiếu đến một phân hạch trong một giây	MeV/s
		do phân hạch/s
$F_i(t_k, T_k)$	Độ lệch chuẩn của $F_{i(t_k, T_k)}$	MeV/s
		do phân hạch/s
$H(t)$	Hệ số được áp dụng cho công suất nhiệt phân rã của sản phẩm phân hạch P_s để tính công suất đóng góp P_E từ quá trình bắt neutron có mặt trong sản phẩm phân hạch (ngoại trừ quá trình bắt ^{133}Cs)	
P_k	Tổng công suất nhiệt của nhiên liệu trong khoảng thời gian k được ký hiệu là T_k	1)
P_{ik}	Công suất đóng góp của nhân phân hạch i tới công suất nhiệt của nhiên liệu trong khoảng thời gian k được ký hiệu là T_k	2)
$P_N(t, T)$	Tổng công suất nhiệt phân rã tại thời điểm t sau thời gian vận hành T	2)
$P_s(t, T)$	Tổng công suất nhiệt phân rã trên cơ sở tính toán phân rã từ các sản phẩm phân hạch	2)
$P_s(t, T)$	Độ lệch chuẩn của $P_s(t, T)$	2)
$P_{Si}(t, T)$	Phần công suất đóng góp của nhân phân hạch i vào công suất	2)

	nhiệt phân rã $P_s(t, T)$	
$P_{Si}(t, T)$	Độ lệch chuẩn của $P_{Si}(t, T)$	2)
$P_E(t, T)$	Phần công suất nhiệt phân rã đóng góp thông qua quá trình bắt neutron trong các sản phẩm phân hạch) (trừ quá trình bắt ^{133}Cs)	2)
$P_B(t, T)$	Công suất đóng góp của actinit ^{239}U và ^{239}Np vào công suất nhiệt phân rã	2)
$P_A(t, T)$	Công suất đóng góp của actinit (ngoại trừ ^{239}U và ^{239}Np) vào công suất nhiệt phân rã	2)
$P_{Cs}(t, T)$	Công suất đóng góp của ^{134}Cs vào công suất nhiệt phân rã	2)
Q_i	Tổng nhiệt năng được giải phóng từ một phân hạch hạt nhân của nhân phân hạch i	
Q	Độ lệch chuẩn của nhiệt năng được giải phóng từ phân hạch hạt nhân của nhân phân hạch i	
t	Thời gian phân rã (xem 2.3 và Hình 1)	s
t_k	Thời gian từ thời điểm kết thúc khoảng thời gian k được ký hiệu là T_k trên biểu đồ công suất (xem Hình 1)	s
T	Thời gian vận hành (xem 2.2 và Hình 1)	s
T_k	Toàn bộ thời gian của khoảng thời gian k trên biểu đồ công suất (xem Hình 1)	s
T_{eff}	Thời gian vận hành trừ đi các khoảng thời gian dừng lò	s
$_{ij}$	Hệ số đặc trưng cho công suất nhiệt phân rã của các sản phẩm phân hạch được coi như là tổng của 24 hàm số mũ	
$_{ij}$	Hệ số đặc trưng cho độ lệch chuẩn ³⁾ của công suất nhiệt phân rã của các sản phẩm phân hạch được coi như là tổng của 24 hàm số mũ	
$_{ij}$	Số mũ được đặc trưng cho công suất nhiệt phân rã của các sản phẩm phân hạch và độ lệch chuẩn của nó được coi như là tổng của 24 hàm số mũ	s^{-1}
¹⁾ Bất kỳ đơn vị công suất nào cũng có thể được sử dụng ²⁾ Cùng đơn vị với P_k ³⁾ Đối với ^{241}Pu giá trị được giả định là 5 %		

3.2. Chỉ số

i chỉ số biểu thị cho các phân hạch hạt nhân ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu

j chỉ số tổng được sử dụng để miêu tả công suất nhiệt phân rã bằng tổng cộng các hàm số mũ

k chỉ số được đánh số cho các khoảng thời gian riêng trong biểu đồ công suất m số các khoảng thời gian T_k , trong biểu đồ công suất.

4. Tính công suất nhiệt phân rã

4.1. Khái quát

Để tính toán công suất nhiệt phân rã, các thành phần sau đây phải được xem xét:

- Đóng góp của các sản phẩm phân hạch từ phân hạch hạt nhân của bốn nhân phân hạch ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu và ^{241}Pu (các nhân phân hạch khác được xem như là ^{235}U);

- Đóng góp của actinit;

- Đóng góp của các nhân phân hạch tạo ra từ quá trình bắt neutron trong các sản phẩm phân hạch.

Quy trình tính toán phải được áp dụng đối với thời gian phân rã từ 0 s đến 10^9 s.

Công suất nhiệt phân rã sinh ra do phân hạch và kích hoạt bởi các neutron trễ trong vật liệu cấu trúc không được đề cập trong tiêu chuẩn này, phải được đánh giá bởi người sử dụng và tính đến một cách thích hợp trong mọi phép phân tích về công suất nhiệt phân rã.

4.2. Biểu đồ công suất

Nói chung, thành phần và công suất phát ra của nhiên liệu được xem xét là lệ thuộc vào các thay đổi trong suốt thời gian vận hành. Điều này cần được lưu ý khi tính công suất nhiệt phân rã, bằng cách chia thời gian vận hành thành các khoảng thời gian có công suất và số nhân phân hạch cố định (thành phần tính gần đúng xem Hình 1 và A.1). Phải đảm bảo rằng các sai số hệ thống được sinh ra do các phép tính gần đúng này là nhỏ hơn so với các sai số thống kê khi tính công suất nhiệt phân rã. Điều này có thể đạt được bằng các phép tính gần đúng tốt nhất có thể được trong biểu đồ công suất nhiên liệu ở cuối thời gian vận hành. Các sai số do các phép tính gần đúng công suất trong biểu đồ công suất giảm rất nhanh khi thời gian phân rã tăng, độ chính xác của phép tính gần đúng trong các khoảng riêng biệt có thể giảm khi tăng thời gian t_k của khoảng k ngay khi phân rã được xem xét. Vì sự biến thiên về công suất đóng góp tương đối của các nhân phân hạch là ít quan trọng cho nên lập thang đo thô là đủ để tính công suất phân rã trong quá trình vận hành.

Điều quan trọng đối với công suất nhiệt phân rã là phải đảm bảo rằng, trong mỗi khoảng thời gian của biểu đồ, tích phân theo thời gian của tổng công suất và công suất đóng góp của mỗi nhân phân hạch là phù hợp với giá trị tương ứng trong biểu đồ công suất thực tế.

4.3. Công suất đóng góp của các sản phẩm phân hạch

Công suất đóng góp $P_{Si}(t, T)$ của các sản phẩm phân hạch trong công suất nhiệt phân rã được tính từ các công suất đóng góp riêng $P_{Si}(t, T)$ của bốn đồng vị phân hạch bằng công thức

$$P_S(t, T) = \sum_{i=1}^4 P_{Si}(t, T) \quad (1)$$

Đối với công suất đóng góp $P_{Si}(t, T)$ thì tính lần lượt bằng tổng công suất nhiệt phân rã của m khoảng thời gian trên biểu đồ công suất và như sau

$$P_{Si}(t, T) = \sum_{k=1}^m P_{Si}(t_k, T_k) = \sum_{k=1}^m \frac{P_{ik}}{Q_i} F_i(t_k, T_k) \quad (2)$$

Trong đó

P_{ik} là công suất nhiệt được giải phóng do phân hạch

Q_i là tổng số nhiệt năng giải phóng do một phân hạch

P_{ik}/Q_i cho biết tốc độ phân hạch của nhân phân hạch thứ i

$F_i(t_k, T_k)$ là công suất nhiệt phân rã của nhân phân hạch i được tính cho một phân hạch hạt nhân trong thời gian một giây, với khoảng thời gian có độ dài là T_k và thời gian phân rã t_k . Đại lượng này được tính từ năng lượng giải phóng $f_{i(t)}$ của sản phẩm phân hạch trong phân hạch đơn tại thời điểm t sau quá trình phân hạch và như sau:

$$F_i(t_k, T_k) = \int_0^{T_k} f_i(T_k - T' + t_k) dT' \quad (3)$$

$f_{i(t)}$ được tính bằng cách sử dụng các hệ số β_{ij} , λ_{ij} cho trong bảng 2.

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^{24} \alpha_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} \quad (4)$$

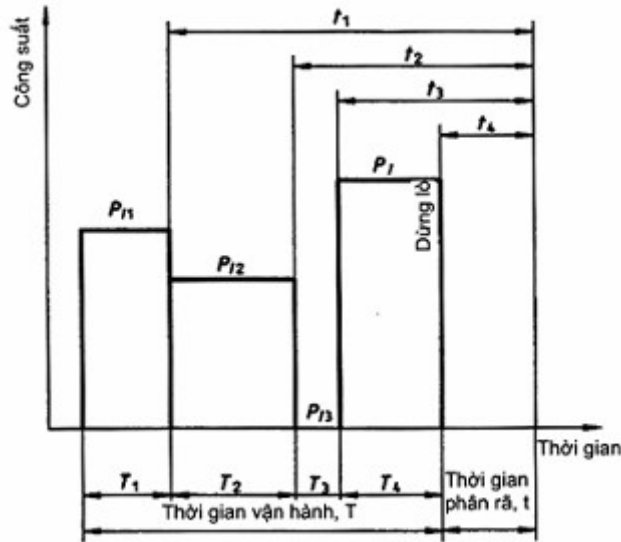
Như vậy nhận được công thức sau

$$F_i(t_k, T_k) = \sum_{j=1}^{24} \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} T_k}) e^{-\lambda_{ij} t_k} \quad (5)$$

Do vậy, công suất đóng góp $P_s(t, T)$ của các sản phẩm phân hạch trong công suất nhiệt phân rã được tính bằng công thức

$$P_S(t, T) = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^m \left\{ \frac{P_{ik}}{Q_i} \sum_{j=1}^{24} \left[\frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} T_k}) e^{-\lambda_{ij} t_k} \right] \right\} \quad (6)$$

Hình 1 minh họa một biểu đồ công suất với bốn khoảng thời gian công suất biến đổi khác nhau đối với nhân phân hạch thứ i.



Hình 1 Biểu đồ công suất

Như vậy, đối với các công suất nhiệt phân rã đóng góp $P_{Si}(t, T)$, thời gian riêng t_k được tính bằng công thức

$$t_m = t$$

$$t_{m-1} = t + T_m.$$

$$t_1 \quad t \quad \sum_{k=2}^m T_k \quad (7)$$

Độ lệch chuẩn tương đối của công suất nhiệt phân rã P_{Si}/P_{Si} của các sản phẩm phân hạch được tính từ độ lệch chuẩn của $F_i(t_k, T_k)$ và độ lệch chuẩn tương đối Q_i/Q_i .

Sự đóng góp của phân hạch hạt nhân i được tính bằng công thức

$$\left(\frac{\Delta P_{Si}}{P_{Si}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta Q_i}{Q_i}\right)^2 + \left[\frac{\sum_{k=1}^m \frac{P_{ik}}{Q_i} \Delta F_{i(t_k, T_k)}}{P_{Si}}\right]^2 \quad (8)$$

Các giá trị của Q_i và P_{Si} được cho trong Bảng 1.

Đối với thời gian phân rã $t_k = 1$, độ lệch tiêu chuẩn $F_i(t_k, T_k)$ được tính bằng công thức

$$\Delta F_{i(t_k, T_k)} = \int_0^{T_k} \Delta f_i(T_k - T') dT' \quad (9)$$

Tính $F_i(t)$ tương tự như công thức (4) được biểu diễn như sau. (Các giá trị của hệ số β_{ij} , và λ_{ij} được cho trong bảng 2.)

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^{24} \beta_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} \quad (10)$$

Do đó

$$\Delta F_i(t_k, T_k) = \sum_{j=1}^{24} \frac{\beta_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} T_k}) e^{-\lambda_{ij} t_k} \quad (11)$$

Với thời gian phân rã $t_k < 1$ s, độ lệch chuẩn của $F_i(t_k, T_k)$ được tính bằng công thức

$$\Delta F_i(t_k, T_k) = \frac{F_i(t_k, T_k)}{F_i(t_k = 1 \text{ s}, T_k)} \Delta F_i(t_k = 1 \text{ s}, T_k) \quad (12)$$

Độ lệch chuẩn P công suất nhiệt phân rã của tất cả các sản phẩm phân hạch được tính bằng công thức

$$|\Delta P_S| = \sum_{i=1}^4 |\Delta P_{Si}| \quad (13)$$

4.4. Đóng góp của actinit

4.4.1. Đóng góp của ^{239}U và ^{239}Np

Công suất nhiệt phân rã $P_B(t, T)$ từ ^{239}U và ^{239}Np được tính bằng công thức

$$P_B(t, T) = \sum_{k=1}^m \frac{P_k}{Q} [F_{U(t_k, T_k)} + F_{Np(t_k, T_k)}] \quad (14)$$

P_k/Q là tổng tốc độ phân hạch trong khoảng thời gian k và được thay thế trong Công thức (14) như sau:

$$\frac{P_k}{Q} = \sum_{i=1}^4 \frac{P_{ik}}{Q_i} \quad (15)$$

Đối với việc tính tổng trong Công thức (14), chỉ cần xem xét trong 20 ngày cuối cùng của biểu đồ công suất. Các giá trị $F_U(t_k, T_k)$ và $F_{Np}(t_k, T_k)$ trong Công thức (14) được tính bằng Công thức (16) và (17) tương ứng.

$$F_{U(t_k, T_k)} = E_U R (1 - e^{-\lambda_U T_k}) e^{-\lambda_U t_k} \quad (16)$$

$$F_{Np(t_k, T_k)} = E_{Np} R \left[\frac{\lambda_U}{\lambda_U - \lambda_{Np}} (1 - e^{-\lambda_{Np} T_k}) e^{-\lambda_{Np} t_k} - \frac{\lambda_{Np}}{\lambda_U - \lambda_{Np}} (1 - e^{-\lambda_U T_k}) e^{-\lambda_U t_k} \right] \quad (17)$$

Trong đó

E_U ($= 0,474$ MeV) là năng lượng phân rã trung bình của ^{239}U ;

E_{Np} ($= 0,419$ MeV) là năng lượng phân rã trung bình của ^{239}Np ;

λ_U ($= 4,91 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) là hằng số phân rã của ^{239}U ;

λ_{Np} ($= 3,41 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) là hằng số phân rã của ^{239}Np ;

R là tỉ số giữa tốc độ bắt neutron của ^{238}U với tốc độ phân hạch tổng ở thời gian kết thúc vận hành.

Nếu người sử dụng không có bất kỳ giá trị nào của R , thì có thể sử dụng phép tính xấp xỉ như sau:

$$R = 1,18e^{-141a_0} - 0,2 + 6,2 \times 10^{-3} BU \quad (18)$$

trong đó:

a_0 độ giàu ban đầu của ^{235}U (tính bằng phần trăm khối lượng);

BU độ cháy của nhiên liệu, tính bằng MW ngày trên mỗi kg urani.

Công thức (18) được xây dựng cho một phổ của lò phản ứng nước nhẹ điển hình (LWR) áp dụng cho độ giàu ban đầu nằm trong khoảng 1,9% và 4,1 %. Công thức này cho kết quả cao vừa phải.

4.4.2. Đóng góp của actinit khác

Đóng góp $P_A(t, T)$ của actinit khác do việc bắt neutron (Ngoại trừ ^{239}U và ^{239}Np) được công bố bởi người sử dụng.

Công thức

$$P_A(t, T) = A(t) P_S(t, T) \quad (19)$$

Công thức trên cho kết quả cao vừa phải, khi sử dụng các hệ số $A(t)$ cho trong Bảng 3 công thức nên thỏa mãn các điều kiện biên dưới đây:

- Độ giàu làm giàu ban đầu, tính bằng phần trăm khối lượng, nằm trong khoảng $1,9 \% \leq a_0 \leq 4,1 \%$;

- Độ cháy, tính bằng mega oát ngày trên kilogam urani, $BU \leq 12,5a_0$;

- Mật độ công suất, tính bằng kilo oát trên một kilogam urani, $S \leq 5a_0$;

4.5. Đóng góp do bắt neutron trong các sản phẩm phân hạch

4.5.1. Đóng góp của ^{134}Cs

^{134}Cs được sinh ra bởi phản ứng $^{133}\text{Cs} + n$ có thể có đóng góp đáng kể vào công suất nhiệt phân rã, đặc biệt đối với thời gian phân rã trong khoảng 10^8s , và do đó được xử lý một cách rõ ràng.

Áp dụng công thức tính dưới đây

$$P_{Cs}(t, T) = \frac{P}{Q} F_{Cs}(t, T) \quad (20)$$

Trong đó