Hiệu ứng này đã được mô tả khi xét sự phụ thuộc của hiệu ứng nhiệt độ vào nồng độ axit boric. Khi thay đổi nhiệt độ chất tải nhiệt trong vùng làm việc 20^0C – độ hiệu dụng định mức của điều chỉnh bor cũng giảm đi khoảng 20%. Độ hiệu dụng của các СУЗ cơ khí và axit boric đối với nhiệt độ 20 và 280^0C được đưa ra trong bảng 10.6.

Bảng 10.6. Độ hiệu dụng của các hệ thống điều chỉnh mẻ liệu đầu của tổ máy số 1 NMĐHN Rovenski và tổ máy số 4 NMĐHN Novovoronhet

Đặc tính	WWER-1000	WWER-440 (73 OP СУЗ)
Độ hiệu dụng OP СУЗ, %:		
20^0C	5,4	14,6
280^0C	6,9	20,8
Độ hiệu dụng điều chỉnh bor, %:		
20^0C	2,6	2,2
280^0C	2,1	1,9

Các câu hỏi cho mục "Điều chỉnh"

1. Các hệ thống điều chỉnh thực hiện các chức năng nào? Các chức năng đó được các hệ thống cơ khí và hệ thống lỏng thực hiện như thế nào?
2. Việc duy trì tự động công suất và chuyển từ mức công suất này sang mức khác được thực hiện như thế nào?
3. Những chế độ giảm tải tự động nào tồn tại? Trong các trường hợp như thế nào thì nó bắt đầu hoạt động?
4. APM và POM hoạt động như thế nào?
5. Độ hiệu dụng A3 là như thế nào?
6. Độ hiệu dụng của các hệ thống điều chỉnh phụ thuộc vào nhiệt độ như thế nào?

11. CÁC PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN CÁC ĐẶC TÍNH VẬT LÝ-NƠTRON CỦA CÁC MẺ NHIÊN LIỆU

Ngày nay, chương trình ứng dụng chủ yếu được sử dụng để tính toán các đặc tính vật lý-nơtron của các mẻ nhiên liệu lò phản ứng là chương trình БИПР-7A, nó cho phép tiến hành tính toán 16 chế độ sau đây:

mô phỏng quá trình cháy nhiên liệu;
mô phỏng quá trình thay đảo nhiên liệu với khả năng chọn BNL từ thiết bị mô phỏng của kho lưu giữ nhiên liệu;
tính toán trạng thái đặc thù của lò phản ứng;

tính toán các hiệu ứng độ phản ứng;
tính toán các hệ số độ phản ứng;
tìm OP СУЗ hiệu quả nhất;
độ hiệu dụng của các OP СУЗ riêng biệt;
độ hiệu dụng của nhóm OP СУЗ riêng biệt;
độ hiệu dụng của các nhóm OP СУЗ khi chuyển động theo trình tự bình thường;
độ hiệu dụng của hệ thống khẩn cấp;
xác định nhiệt độ tới hạn lặp;
xác định nồng độ dừng của axit boric;
bảo đảm chế độ giảm tải cấp tốc của tổ máy đối với WWER-1000;
mô phỏng các quá trình chuyển tiếp cho xenon và samari;
tính toán mô phỏng quá trình cháy nhiên liệu cho chương trình ПИР-А;
tính toán các hàm ảnh hưởng cho chương trình ПИР-А.

Trong tất cả các chế độ nêu trên, việc tính toán đều quy về việc đánh giá các trạng thái riêng biệt của vùng hoạt, các trạng thái này khác nhau tùy thuộc vào chế độ chọn loại BNL, độ cháy, các thông số công nghệ, vị trí của OP СУЗ,…Mục đích tính toán là nhận được các giá trị $k_{эф}$ và phân bố tỏa năng lượng đối với trạng thái đã cho. Để làm ví dụ, ta tính độ hiệu dụng của nhóm OP СУЗ khi nó chuyển động theo trình tự bình thường và ta chọn mẻ nhiên liệu.

Khi tính toán độ hiệu dụng của nhóm OP СУЗ, trong các số liệu ban đầu của chế độ đó ta cố định các thông số cần thiết cho tính toán: nhiệt độ, công suất, độ cháy, vị trí các OP СУЗ khác,…Chỉ có vị trí của nhóm OP là thay đổi. Sau khi tính $k_{эф}$ và ρ cho các trạng thái có nhóm các thanh hấp thụ được kéo ra và nhúng vào, và khi lấy giá trị thứ nhất của ρ trừ đi giá trị thứ hai, ta sẽ nhận được độ hiệu dụng tổng cần tìm.

Khi chọn mẻ nhiên liệu, biểu đồ sắp xếp các BNL chưa sử dụng và các BNL đã cháy trong vùng hoạt sẽ được xây dựng, biểu đồ này ở dạng các số liệu đầu vào theo chủng loại và độ cháy BNL sẽ được sử dụng khi tính toán. Trong các số liệu đầu vào, các thông số công nghệ phù hợp với việc vận hành lò phản ứng ở công suất định mức sẽ được cho trước và trạng thái vùng hoạt sẽ được tính toán. Sau đó, sự phân bố tỏa năng lượng vừa nhận được sẽ được phân tích. Nếu các hệ số không đồng đều phân bố tỏa năng lượng vượt quá mức cho phép, thì trong biểu đồ vùng hoạt sẽ sắp xếp lại các BNL, theo hướng làm giảm độ không đồng đều. Tiếp theo, việc tính toán sẽ được lặp lại. Cả giá trị $k_{эф}$ cũng sẽ được phân tích khi chọn mẻ nhiên liệu, bởi vì nó quyết định độ dài thời gian hoạt động của mẻ nhiên liệu.

Tính toán cho các chế độ khác cũng được tiến hành tương tự. Khi tính toán, việc chuyển từ trạng thái này sang trạng thái khác, đa phần đã được lập sẵn trong chương trình và được thực hiện tự động. Cả việc xử lý các kết quả tính toán cũng được lập sẵn trong chương trình.

Để giải quyết nhiệm vụ đặt ra, nghĩa là, để xác định $k_{эф}$ và phân bố tỏa năng lượng trong vùng hoạt, sẽ sử dụng phép gần đúng giả tới hạn hai nhóm để mô tả các quá trình làm chậm và khuếch tán nơtron.

Hệ phương trình hai nhóm ban đầu trong phép gần đúng khuếch tán để xác định dòng nơtron trễ Φ và nơtron nhiệt Φ_T có dạng

$$\begin{cases} -D\Delta\Phi + \Sigma_R\Phi = \dfrac{1}{k_{эф}}\left[(\nu\Sigma_f)\Phi + (\nu\Sigma_f)_T\Phi_T\right]; \\ -D\Delta\Phi_T + \Sigma_{aT}\Phi_T = \Sigma_{УВ}\Phi, \end{cases} \qquad (11.1)$$

ở đây, hàm Φ dành cho nhóm các nơtron trễ, Φ_T –dành cho nhóm các nơtron nhiệt. Các ký hiệu còn lại đã được đề cập (xem phần I). Trong phần đang được xem xét của vùng hoạt, các phương trình được bổ sung các điều kiện về tính liên tục của dòng nơtron và dòng khuếch tán các nơtron trễ và nơtron nhiệt, cũng như các điều kiện biên có liên quan đến dòng khuếch tán và dòng nơtron ở biên giới vùng hoạt:

$$\left.\frac{d\Phi_T}{d\vec{n}}\right|_s = \frac{\Phi}{d},$$

$$\left.\frac{d\Phi_T}{d\vec{n}}\right|_s = \frac{\Phi_T}{d_T}. \qquad (11.2)$$

Nghiệm chung của hệ (11.1) có thể được viết ở dạng

$$\Phi(\vec{r}) = X(\vec{r}) + Y(\vec{r}),$$

$$\Phi_T(\vec{r}) = RX(\vec{r}) + TY(\vec{r}). \qquad (11.3)$$

ở đây, $X(\vec{r})$, $Y(\vec{r})$ – các nghiệm nào đó của các phương trình Hemhols:

$$\Delta X + \mu^2 X = 0;$$

$$\Delta Y + \nu^2 Y = 0. \qquad (11.4)$$

Ở đây, μ^2, v^2 – các thông số vật liệu của bài toán hai nhóm thể hiện thông qua các tiết diện nằm trong các phương trình (11.1); R, T – các hệ số liên kết trong bài toán hai nhóm không đổi theo thể tích từng BNL. Đại lượng μ^2 có thể lớn hơn hoặc nhỏ hơn 0, đại lượng v^2 luôn lớn hơn 0. Đối với các lò phản ứng nước-nước $L^2 << T$, cả hệ thức sau cũng luôn đúng

$$\left|\mu^2\right| << \left|v^2\right|; \qquad \mu^2 \cong \frac{k_\infty - 1}{M^2}; \qquad v^2 = \frac{1}{L^2} + \frac{1}{\tau} + \mu^2, \tag{11.5}$$

ở đây, $M^2 = \tau + L^2$.

Đối với R và T trong trường hợp các mạng WWER, có các tính toán sau đây:

$$R = \frac{\Sigma_{\text{УВ}}}{\Sigma_{aT}}; \qquad T = -\frac{D}{D_T}; \qquad \frac{R}{T} = -\frac{L^2}{\tau}. \tag{11.6}$$

Do vùng hoạt không đồng nhất về các tính chất vật lý-nơtron, nên nói chung, hệ không có nghiệm giải tích và hệ được giải bằng phương pháp số. Mỗi BNL được chia theo chiều cao, một cách ước lệ, thành 10 phần thể tích, mỗi phần trong số đó đều được coi là đồng nhất về các tính chất vật lý-nơtron. Các điểm giữa của các phần thể tích đó chính là các trung tâm của mạng những sai khác hữu hạn phân bố nơtron nhiệt và nơtron trễ. Hệ phương trình nhận được được giải bằng phương pháp lặp, khi đó $k_{\text{эф}}$ tìm được như một giá trị riêng.

Trên cơ sở phân bố nơtron nhận được, bằng phương pháp lý thuyết nhiễu sẽ tính được các hệ số vi phân của độ phản ứng theo nhiệt độ chất tải nhiệt, khối lượng riêng chất tải nhiệt, công suất lò phản ứng. Để sử dụng thuật toán БИПР-7А cần có các thông số sau:

các hệ số tái sinh k_∞;
diện tích vận chuyển của các nơtron M^2;
độ dài khuếch tán của các nơtron nhiệt L^2;
số nơtron phân hạch v_f;
tỷ phần phân hạch trong vùng nhiệt α_F;
độ dài ngoại suy cho phương thức tiệm cận d;
độ dài ngoại suy cho các nơtron nhiệt d_T;
lượng năng lượng tỏa ra khi phân hạch E;
hệ số khuếch tán của các nơtron nhanh D;
tiết diện hiệu dụng của xenon và samari.

Tất cả các đại lượng kể trên đều được cho trước từ bên ngoài trên cơ sở tính toán theo chương trình TBC-M.

Chương trình TBC-M tính toán các sự phụ thuộc của các đặc tính vật lý-nơtron trên đây vào các thông số công nghệ: nhiệt độ, áp suất, công suất, nồng độ axit boric, cũng như độ cháy, nồng độ xenon và samari cho các mạng đồng nhất, nghĩa là, các mạng gồm có các BNL cùng một dạng. Các sự phụ thuộc đó được sử dụng cả trong chương trình БИПР-7А ở dạng các công thức gần đúng, theo đó các đặc tính được tính riêng cho mỗi phần thể tích ước lệ của BNL – cho mỗi trung tâm sai khác hữu hạn.

Khi đưa ra các kết quả tính toán nhận được theo chương trình БИПР-7А, trên bản in sử dụng các ký hiệu ước lệ, danh mục các ký hiệu đó được đưa ra trong bảng 11.1.

Bởi vì trong thuật toán БИПР-7А, mạng sai khác hữu hạn trong BNL chỉ có một trung tâm trong sơ đồ, nên không thể tính toán độ không đồng đều tỏa năng lượng theo các thanh nhiên liệu. Để tính toán phân bố đối với mạng chia sai khác nhỏ hơn, đối với các trung tâm mạng trong từng thanh nhiên liệu, đã nghiên cứu và sử dụng chương trình ПЕРМАК-1, mô hình toán học của chương trình này gần giống БИПР-7А. Nó được sử dụng để phân tích tính toán và lập luận chứng an toàn.

Bảng 11.1. Các ký hiệu ước lệ khi đưa các kết quả tính toán trên bản in

Tên thông số	Đơn vị đo	Ghi chú
W	MW	Công suất nhiệt của lò phản ứng
$t_{вх}$	^{0}C	Nhiệt độ chất tải nhiệt ở đầu vào vùng hoạt
$C_в$	g H_3BO_3/kg H_2O	Nồng độ axit boric trong chất tải nhiệt
G	m^3/h, kg/s	Lưu lượng chất tải nhiệt qua vùng hoạt có tính đến chảy cạnh bộ phận phản xạ
T	ngày hiệu dụng	Thời điểm hiện tại của thời hạn sử dụng
ROAKT	MW ngày/kg U	Độ cháy trung bình của nhiên liệu trong mẻ nhiên liệu ở thời điểm hiện tại của thời hạn sử dụng
RO	%	Độ phản ứng của trạng thái
SIM	độ	Góc đối xứng của mẻ nhiên liệu được xét ở thời điểm hiện tại của thời hạn sử dụng
NXE		Ký hiệu tính đến ảnh hưởng của Xe-135
NSM		Ký hiệu tính đến ảnh hưởng của Sm-149
DRO	%	Sai lệc độ phản ứng của trạng thái hiện tại so với trạng thái ban đầu
N		Số hiệu trạng thái, phương án
KAMP		Số hiệu mẻ nhiên liệu, thời hạn sử dụng

MAP		Số hiệu ước lệ để ký hiệu loại BNL
IND		Ký hiệu điều chỉnh
OFSET	%	Giá trị ophset dọc trục
H	cm	Vị trí của OP, các nhóm OP СУЗ nào đó
MZAS		Số hiệu BNL có chất hấp thụ (đánh số BNL ở góc đối xứng 360^0)
K_q		Công suất tương đối cực đại của BNL
K_v		Công suất tương đối cực đại của một đoạn BNL
NK		Số hiệu BNL
NZ		Số hiệu của vùng tính toán theo chiều cao
NGR		Số hiệu của nhóm OP СУЗ
HO	cm	Vị trí ban đầu của OP СУЗ
HE	cm	Vị trí cuối cùng của OP СУЗ
DRODH	%/cm	Sự thay đổi độ phản ứng trên một đơn vị khoảng chuyển động của OP СУЗ
TXE	h	Thời điểm hiện tại của quá trình chuyển tiếp xenon
TSM	ngày hiệu dụng	Thời điểm hiện tại của quá trình chuyển tiếp samari
SHLAKI	MW ngày/kg U	Trường độ cháy sâu BNL theo chiều cao
Xe	$1/cm^3$	Phân bố theo chiều cao của Xe-135
Sm	$1/cm^3$	Phân bố theo chiều cao của Sm-149
PSI	Đơn vị tương đối	Trường tỏa năng lượng theo chiều cao
F	$1/(cm^3.s)$	Phân bố các dòng nơtron trễ theo chiều cao
GAMMA	g/cm^3	Phân bố khối lượng riêng chất tải nhiệt theo chiều cao
TEM	^0C	Phân bố nhiệt độ chất tải nhiệt theo chiều cao
DRODG	$1/ g/cm^3$	Hệ số độ phản ứng theo khối lượng riêng chất tải nhiệt
DRODT	$1/^0C$	Hệ số độ phản ứng theo nhiệt độ chất tải nhiệt
DRODTU	$1/^0C$	Hệ số độ phản ứng theo nhiệt độ phân bố của nhiên liệu
DRODTU*	$1/^0C$	Hệ số độ phản ứng theo nhiệt độ trung bình của nhiên liệu
DRODNU	1/MW	Hệ số độ phản ứng theo công suất lò phản ứng không tính đến gia nhiệt sơ bộ chất tải nhiệt
DRODNB	1/MW	Hệ số độ phản ứng theo công suất lò phản ứng có tính đến gia nhiệt sơ bộ chất tải nhiệt khi nhiệt độ ở đầu vào lò phản ứng không thay đổi
DRODNKB	1/MW	Hệ số độ phản ứng theo công suất lò phản ứng có tính đến gia nhiệt sơ bộ chất tải nhiệt khi nhiệt độ trung bình trong vùng hoạt không thay đổi
DRODC	1/(g/kg)	Hệ số độ phản ứng theo nồng độ axit boric
BEF		Tỷ phần hiệu dụng của các nơtron trễ
SL	s	Thời gian sống trung bình của các nơtron tức thời

Câu hỏi cho mục
"Các phương pháp tính toán các đặc tính vật lý-nơtron của các mẻ nhiên liệu"

1. Các thông số nào trong bảng 11.1 được kiểm soát một cách linh hoạt? Các thông số nào được đưa vào các đặc tính vật lý-nơtron?

12. CÁC VẤN ĐỀ VẬN HÀNH

12.1. Điều khiển và kiểm soát việc điều khiển vùng hoạt khi đưa lò phản ứng vào trạng thái phát công suất

Trong quá trình công nghệ đưa lò phản ứng vào công suất định mức có thể chia thành hai giai đoạn:

- đưa lò phản ứng vào mức công suất tối thiểu kiểm soát được (МКУ), nghĩa là, vùng hoạt đạt đến trạng thái tới hạn, được АКНП cố định;
- chọn trực tiếp công suất.

Đưa lò phản ứng vào МКУđược thực hiện sau khi đạt đến các thông số công nghệ định mức hoặc gần định mức của vòng sơ cấp khi các ГЦН hoạt động.

Cần nâng nhiệt độ chất tải nhiệt để giảm nồng độ khởi động của axit boric, nghĩa là, để bảo đảm $d\rho/dt$ âm khi lò phản ứng ở trạng thái tới hạn. Vòng sơ cấp được gia nhiệt nhờ quá trình tỏa năng lượng dư của nhiên liệu, nếu trong vùng hoạt có nhiên liệu đã cháy, và năng lượng của ГЦН, tiêu hao để vượt qua sức cản thủy lực của ГЦК (W). Hợp phần cuối cùng vừa nói là hợp phần chính và được tính bằng công thức

$$W = \sum_i \Delta P_i G_i, \qquad (11.6)$$

ở đây, i – số ГЦН hoạt động; ΔP_i – sụt giảm áp suất ở ГЦН thứ i; G_i – lưu lượng của ГЦН thứ i.

Ở nhiệt độ vòng sơ cấp $\geq 200^0$C $W = \sim 20$ MW đối với WWER-1000, trong khi đó đối với WWER-440 chỉ lớn hơn 10 MW một chút. Tổn thất nhiệt của vòng sơ cấp khi nhiệt độ trên 200^0C đạt đến 7 – 8 MW, điều này dẫn đến suy giảm tốc độ gia nhiệt nó ở WWER-440 đến 4 – 5^0C/h.

Bởi vì quá trình công nghệ gia nhiệt nhờ ГЦН của WWER-440 có tính kéo dài, nên đối với phần được cải tiến hơn của chúng – thiết kế B-213 (các tổ máy số 3 và

4 của NMĐHN Kolski) cho phép đưa vào MKУ ở nhiệt độ thấp hơn định mức trong điều kiện $d\rho / dt < 0$.

Trạng thái ban đầu của vùng hoạt trước khi đưa vào MKУ và nâng công suất như sau:

nhiệt độ chất tải nhiệt:

WWER-1000 $\geq 260^0$C,
WWER-440 (B-230) $\geq 260^0$C,
WWER-440 (B-213) $> 190^0$C;

áp suất chất tải nhiệt:

WWER-1000 – 160 kG/cm^2.
WWER-440 – 125 kG/cm^2;

nồng độ axit boric trong chất tải nhiệt – cực đại hoặc nồng độ dừng;

OP СУЗ – ở khóa ngắt đầu dưới;

АКНП – hoạt động, các buồng ion hóa của dải nguồn (ДИ) và dải trung gian (ДП) được đưa vào vùng dòng nơtron cực đại. Đưa ra các mức đặt theo giới hạn công suất trong cả hai dải;

СВРК – hoạt động;

nồng độ khởi động của axit boric được tính toán.

Tiến hành kiểm soát:

dòng nơtron theo АКНП;

nồng độ axit boric trong chất tải nhiệt theo bomer kế và phương pháp phòng thí nghiệm;

nhiệt độ trong vùng hoạt theo СВРК.

Đưa lò phản ứng vào MKУ theo cách sau:

đưa lần lượt các nhóm OP СУЗ ra khỏi vùng hoạt với tốc độ làm việc, theo từng bước (WWER-440 – 25 cm, WWER-1000 – 35 cm), kèm theo giữ 60 s;

cố định vị trí các nhóm công tác ОР СУЗ ở mức ~ 140 cm cách phía dưới vùng hoạt WWER-1000, ~ 100 cm – WWER-440;

giảm nồng độ axit boric bằng trao đổi nước trong vòng sơ cấp với lưu lượng nước khử khoáng "sạch" ~ 50 tấn/h;

ngừng trao đổi nước khi đạt được khoảng nồng độ khởi động, nồng độ axit boric trong vòng sơ cấp và trong hệ thống bù cân bằng. Thể tích hệ thống bù vào khoảng gần 10% thể tích vòng sơ cấp. Sau khi trộn đều, nồng độ axit boric giảm theo tỷ lệ;

tiếp tục trao đổi nước để rút axit boric ra khỏi vòng sơ cấp. Lưu lượng bù nước khử khoáng sạch khi đó giảm đến 10 tấn/h (WWER-1000), 6 tấn/h (WWER-440);

cố định quá trình chuyển sang МКУ theo các chỉ số ổn định của АКНП: công suất nơtron $10^{-7} – 10^{-6}$ N và chu kỳ ~ 60 s;

chấm dứt trao đổi nước khi đạt МКУ, nồng độ axit boric được cân bằng, trạng thái vùng hoạt được cố định ở mức công suất ~ $10^{-3} – 10^{-2}$ $N_{ном}$;

kiểm tra nối kết các dẫn động СУЗ bằng việc nâng từng ОР một, đồng thời kiểm tra các chỉ số АКНП. Trong WWER-1000, do độ hiệu dụng ОР thấp, cho phép tiến hành kiểm tra ở công suất không quá 40% $N_{ном}$;

trong WWER-440 (В-213), công suất được nâng lên nhờ nhóm các thanh điều chỉnh đến $N_{max} \sim N_{ном}$. Với tốc độ quy định, vòng sơ cấp được gia nhiệt đến $\geq 260^0$C;

khi khởi động sau quá trình thay đảo nhiên liệu, đo:

- hệ số nhiệt độ vi phân của độ phản ứng;
- độ hiệu dụng vi phân và tích phân của nhóm các thanh hấp thụ;
- độ hiệu dụng điều chỉnh bằng axit boric;
- độ hiệu dụng АЗ không có một bộ phận điều chỉnh hiệu quả nhất theo tính toán.

Công suất lò phản ứng được nâng lên theo tốc độ quy định nhờ nhóm điều chỉnh ОР СУЗ ở chế độ bằng tay. Theo tiến trình xuất hiện các hiệu ứng âm – hiệu ứng công suất và nhiễm độc xenon, tiến hành tái điều hòa nhóm điều chỉnh bằng hệ thống điều chỉnh bor với lưu lượng đủ nhỏ để vị trí của nhóm không ở ngoài giới hạn của khoảng chiều cao được phép.

Cân bằng công suất giữa lò phản ứng và vòng thứ cấp (sinh nhiệt và tải nhiệt) được duy trì tự động theo áp suất hơi trực tiếp trong vòng thứ cấp: lúc đầu, nâng công suất đến 10% $N_{ном}$ WWER-440, ~ 40% WWER-1000 bằng thiết bị điều chỉnh tác động lên БРУ-К, sau đó, bằng thiết bị điều chỉnh của tuabin, sau khi nối máy phát tuabin vào mạng. Trong WWER-440, được phép nâng công suất bằng phụ tải của máy phát tuabin, theo chế độ bằng tay. Cân bằng tự động công suất trong trường hợp này là nhờ APM, vốn được đóng ở chế độ *T*, chế độ này tự động tăng tải cho lò phản ứng theo phụ tải của tuabin, trong khi vẫn giám sát áp suất hơi trong vòng thứ cấp.

Trong suốt thời gian nâng công suất, mức công suất được kiểm soát theo АКНП và СВРК, chu kỳ tăng tốc, các hệ số không đồng đều tỏa năng lượng đều được kiểm soát. Khi công suất lò phản ứng ~ 10% $N_{ном}$ tiến hành hiệu chỉnh АКНП lần đầu theo các chỉ số của СВРК, tiếp sau đó, cân bằng công suất nơtron và công suất nhiệt được kiểm soát. Khi xuất hiện mất cân bằng do thay đổi nồng độ axit boric hoặc thay đổi vị trí nhóm điều chỉnh của các thanh hấp thụ thì lại hiệu chỉnh lại.

Khi đạt công suất định mức, người ta cố định nhóm điều chỉnh của các thanh hấp thụ ở vị trí tối ưu bằng cách tái điều chỉnh bor, tuần tự kiểm tra cân bằng công suất nơtron và công suất nhiệt, APM vào hoạt động ở chế độ *N*. Cố định phân bố tỏa năng lượng trong vùng hoạt. Trong những ngày đầu sau khởi động cần tăng cường kiểm soát vùng hoạt, bởi vì trong giai đoạn này diễn ra quá trình nhiễm độc xenon, do đó cần tái điều hòa định kỳ nhóm điều chỉnh.

Các câu hỏi cho mục
“Điều khiển và kiểm soát vùng hoạt khi đưa lò phản ứng vào phát công suất”

1. Có thể chia thành các giai đoạn nào khi đưa lò phản ứng vào phát công suất?
2. Lò phản ứng được đưa vào công suất МКУ ở những thông số nào và tại sao?
3. Khi đưa vào МКУ, những điều kiện nào được coi là cần quan tâm nhất?
4. Lưu lượng nước khoáng “sạch” thay đổi như thế nào và tại sao khi đưa lò phản ứng vào МКУ?
5. Những thí nghiệm vật lý nào được thực hiện khi khởi động sau quá trình thay đảo nhiên liệu?

12.2. Điều khiển và kiểm soát vùng hoạt khi lò phản ứng phát công suất

WWER, cũng như các lò phản ứng năng lượng khác, được vận hành ở chế độ duy trì công suất nhiệt không đổi. Thông thường, mức công suất đó – mức tối đa cho phép, mức định mức. Công suất lò phản ứng ở mức đã cho được duy trì nhờ APM, thường đóng ở chế độ *N*, chế độ *T* khi đó giám sát các dao động áp suất trong vòng thứ cấp, sau khi đã ghi cho mình áp suất sau khi đóng chế độ *N* làm áp suất ban

đầu. Cân bằng công suất vòng sơ cấp và công suất vòng thứ cấp được duy trì nhờ thiết bị điều chỉnh của tuabin, vốn đóng ở chế độ duy trì áp suất trước các van điều chỉnh.

Hoạt động của vùng hoạt trong chế độ này khá ổn định và không cần một can thiệp vận hành nào, ngoài việc

> hiệu chỉnh vị trí nhóm điều chỉnh của các thanh hấp thụ, nhóm này được kéo ra nhờ APM theo tiến trình cháy nhiên liệu. Có thể hiệu chỉnh bằng việc cấp nước khử khoáng sạch với lưu lượng nhỏ, và APM tự động hạ các thanh của nhóm điều chỉnh vào vùng hoạt để duy trì công suất;
>
> hiệu chỉnh các chỉ số của АКНП, các chỉ số này lệch khỏi các giá trị thực của công suất nhiệt theo tiến trình giảm nồng độ axit boric trong chất tải nhiệt và thay đổi phân bố tỏa năng lượng trong vùng hoạt do quá trình cháy nhiên liệu.

Các thay đổi phụ tải được thực hiện trong chế độ điều chỉnh bằng tay công suất lò phản ứng hoặc tuabin. Trong trường hợp thứ nhất, APM được ngắt, và nhờ điều khiển bằng tay các thanh của nhóm điều chỉnh mà công suất lò phản ứng tăng lên hoặc giảm đi. Thiết bị điều chỉnh tua bin, trong khi giám sát áp suất trước các van, đóng hoặc mở chúng một cách tương ứng, làm thay đổi phụ tải tuabin, và bằng cách đó, duy trì cân bằng công suất vòng sơ cấp và công suất vòng thứ cấp. Trong trường hợp thứ hai, phụ tải tuabin thay đổi khi điều khiển bằng tay các van điều chỉnh. APM chuyển sang chế độ *T* và, trong khi giám sát áp suất trong vòng thứ cấp, vẫn duy trì cân bằng công suất sinh nhiệt và tải nhiệt. Khi giảm phụ tải bằng tuabin, việc chuyển APM từ chế độ *N* sang chế độ *T* có thể là tự động, theo tín hiệu tăng áp suất vượt quá mức đã đặt 1,5 kG/cm^2.

Công suất thay đổi với tốc độ không vượt quá tốc độ quy định, khi đó, tốc độ càng thấp thì càng ít các nhiễu loạn có liên quan đến nhiễm độc xenon không ổn định, kể cả các dao động xenon có thể có trong WWER-1000.

Trong trường hợp cần thiết, giảm tải cấp tốc được thực hiện cũng theo trình tự như theo kế hoạch, nhưng với tốc độ tối đa – tác động liên tục lên bộ phận điều chỉnh. Nhiệm vụ chủ yếu của việc điều khiển linh hoạt trong quá trình chuyển tiếp là kiểm soát hoạt động của thiết bị điều chỉnh trung tâm để duy trì cân bằng các công suất và sau đó ổn định các thông số công suất ở mức được phép. Khi giảm tải do các tác động của các thiết bị tự động phù hợp với bảng 10.4, nhiệm vụ chủ yếu là phục hồi cân bằng công suất ở mức được phép và tiếp tục ổn định các thông số.

Câu hỏi cho mục
“Điều khiển và kiểm soát vùng hoạt khi hoạt động phát công suất”

1. Cân bằng các công suất vòng sơ cấp và vòng thứ cấp trong các chế độ tĩnh và chuyển tiếp được duy trì như thế nào?

12.3. Điều khiển và kiểm soát vùng hoạt khi dừng lò theo kế hoạch

Khi dừng lò theo kế hoạch, việc giảm tải tổ máy được tiến hành theo chế độ đã mô tả về điều khiển công suất đến ~ 30 – 40% $N_{\text{ном}}$ cho WWER-1000 và ~ 10% cho WWER-440. Công suất lò phản ứng được ổn định, máy phát tuabin được giảm tải và ngắt khỏi mạng. Trong quá trình giảm tải máy phát tuabin, БРУ-К được đưa vào hoạt động, nó duy trì cân bằng các công suất.

Sau khi ngắt máy phát tuabin, lò phản ứng được giảm tải đến МКУ nhờ điều khiển СУЗ bằng tay, áp suất và nhiệt độ được ổn định gần với các giá trị định mức. Lò phản ứng được chuyển vào trạng thái dưới tới hạn nhờ điều chỉnh bor. Nồng độ axit boric tăng lên đến các giá trị tương ứng với quy định công nghệ cho trạng thái dừng (xem mục “Điều chỉnh”), sau đó, các thanh ОР СУЗ được hạ xuống vùng hoạt. Thực ra đến lúc này, vùng hoạt đã sẵn sàng cho các công đoạn công nghệ dừng lò. Tiếp sau đó, trạng thái của vùng hoạt được АКНП và СВРК kiểm soát.

12.4. Rút axit boric nhờ các phin lọc trao đổi ion

Khi nồng độ axit boric nhỏ, độ hiệu dụng trao đổi nước giảm đi, điều này làm tăng đáng kể mất cân bằng nước. Vì vậy khi nồng độ axit boric dưới 0,5 g/kg, rút axit boric hiệu quả hơn, khi làm lắng các ion của nó trên các phin lọc đã được tái sinh sơ bộ của thiết bị làm sạch nước đặc biệt.

Mô tả toán học của quá trình rút axit boric trên các phin lọc trao đổi ion giống như mô tả quá trình rút ra nhờ trao đổi nước. Giả sử, sau các phin lọc nồng độ bằng 0, ta có:

$$c(t) = c_0 e^{-\frac{q}{m}t}, \qquad (12.4.1)$$

ở đây, c_0 – nồng độ axit boric ở thời điểm cho các phin lọc hoạt động; q – lưu lượng chất tải nhiệt.

Lấy c_0 = 0,5 g/kg, q = 20 tấn/h, m = 300 tấn, có thể tính tốc độ tối đa đưa độ phản ứng dương vào WWER-1000 (xem mục “Điều chỉnh bor”):

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dc}{dt}\frac{\partial\rho}{\partial c} = 2.10^{-5}\%/\text{s}.$$

Câu hỏi cho mục "Rút axit boric nhờ các phin lọc trao đổi ion"

1. Trong các trường hợp nào cần rút axit boric nhờ thiết bị làm sạch nước đặc biệt?

12.5. Bảo đảm trạng thái dưới tới hạn vùng hoạt của lò phản ứng đã dừng

Các nguồn nơtron tự nhiên để kích hoạt phản ứng dây chuyền trong WWER không được sử dụng. Khi khởi động lần đầu, các nguồn đầu tiên là các nơtron của bức xạ vũ trụ và của quá trình phân rã urani tự phát. Trong những mẻ nhiên liệu tiếp sau xuất hiện các nguồn nơtron bổ sung, các actinit (các đồng vị U, Pu, Cm, Cf,… – các sản phẩm tương tác không đàn hồi của các nơtron với các hạt nhân nhiên liệu và các chuỗi chuyển hóa hạt nhân tiếp sau), vốn được tạo ra trong lò phản ứng ở những mẻ nhiên liệu trước đó.

Do không có các nguồn định chuẩn, nên không thể đo trực tiếp mức dưới tới hạn của lò phản ứng đã dừng theo dòng nơtron. Trong trường hợp đó, tính an toàn được bảo đảm bằng cách tiếp cận bảo toàn khi tính toán nồng độ axit boric, ở nồng độ đó đạt được độ dưới tới hạn cho trước (xem mục "Điều chỉnh"). Có trọng lượng hơn cả trong số các giả định bảo toàn là kéo tất cả các OP СУЗ ra khỏi vùng hoạt một cách ước lệ.

Câu hỏi cho mục "Bảo đảm trạng thái dưới tới hạn vùng hoạt của lò phản ứng đã dừng"

1. Tầm quan trọng đặc biệt của việc kiểm soát nồng độ axit boric của lò phản ứng đã dừng là gì?

12.6. Ảnh hưởng của xenon và samari đến việc điều chỉnh trong các chế độ chuyển tiếp.

Khi thay đổi phụ tải, độ phản ứng vốn có liên quan đến nhiễm độc và giải nhiễm xenon và samari được điều hòa bằng điều chỉnh bor. Khi điều chỉnh, nồng độ samari thay đổi không đáng kể bởi vì thời gian kéo dài của quá trình được tính bằng ngày, còn các hiệu ứng độ phản ứng liên quan đến nhiễm độc không ổn định là không lớn – không quá ~ 0,7%. Khác với samari, sự thay đổi nồng độ xenon có ảnh hưởng rõ ràng đến động học quá trình điều chỉnh bởi vì các quá trình chuyển

tiếp xenon xảy ra nhanh – thời gian kéo dài của chúng tính bằng giờ, và ảnh hưởng của xenon đến độ phản ứng là lớn hơn rất nhiều.

Trong các chế độ nâng công suất thực tế, tốc độ đưa độ phản ứng âm vào, vốn có liên quan đến việc chuyển sang mức nhiễm độc tĩnh của xenon, không quá 0,2 %/h, lượng này được điều hòa bằng cách rút axit boric ra. Không xuất hiện quá trình giải nhiễm không ổn định khi chuyển từ mức công suất tĩnh sang mức cao hơn, bởi vì tốc độ nâng công suất bị hạn chế và đương lượng độ phản ứng của quá trình giải nhiễm là không lớn.

Khi giảm tải sâu đến 30% $N_{\text{ном}}$ và thấp hơn, tốc độ đưa độ phản ứng âm trung bình vào vốn có liên quan đến hố iốt, vào khoảng 0,3 – 0,5%/h, độ sâu hố iốt có thể đạt đến 3 – 4%.

Rõ ràng là ở cuối thời gian hoạt động của mẻ nhiên liệu, khi mà không còn dự trữ vận hành của độ phản ứng vốn có thể được sử dụng để điều hòa hố iốt, thì chỉ có thể duy trì lò phản ứng ở trạng thái tới hạn sau khi giảm công suất trong trường hợp phục hồi phụ tải cấp tốc. Nếu điều đó là không thể được về mặt công nghệ, thì cần phải giữ lò phản ứng ở trạng thái dưới tới hạn trong khoảng ~ 20 h, khoảng thời gian cần thiết để phân rã xenon đến mức nhiễm độc tĩnh.

Khi cần có thể tính toán tối ưu chế độ giảm tải, nhưng trong thực tế vận hành nó thường không cần thiết, bởi vì việc giảm tải sâu theo kế hoạch chủ yếu liên quan đến việc dừng lò phản ứng trên 20 h.

Các câu hỏi cho mục
“Ảnh hưởng của xenon và samari đến việc điều chỉnh trong các chế độ chuyển tiếp”

1. Các chế độ thay đổi phụ tải nào nhạy nhất theo quan điểm điều khiển vận hành công suất?
2. Khi cần thì làm dịu ảnh hưởng của hố iốt như thế nào trong trường hợp giảm phụ tải?

12.7. Khử các dao động xenon

Sự cần thiết phải khử các dao động xenon có liên quan đến việc chúng làm tăng độ không đồng đều phân bố tỏa năng lượng, chẳng hạn như làm tăng K_v, điều có thể dẫn đến cần giảm tải lò phản ứng. Việc kiểm soát sự có mặt các dao động và biên độ các dao động được thực hiện theo ophset. Ophset thực chất là mức chênh lệch tỏa năng lượng tương đối của phần trên và phần dưới vùng hoạt. Ở giai đoạn đầu của mẻ nhiên liệu, trong chế độ tĩnh, mức chênh lệch đó - ophset - có thể đạt đến

10%. Điều đó có liên quan đến nhiệt độ thấp hơn của nhiên liệu trong phần dưới của vùng hoạt cũng như sự có mặt của các chất hấp thụ ở phần trên. Trong quá trình vận hành của mẻ nhiên liệu, giá trị này giảm đi do quá trình cháy nhiên liệu ở phần dưới vùng hoạt mạnh hơn.

Việc ophset vượt ra ngoài khoảng 0 – 10% và sự thay đổi hàng giờ của nó theo thời gian chứng tỏ sự có mặt của các dao động. Nguyên tắc cơ bản của các thuật toán khử dao động – đó là tác động lên các sai lệch đang tăng trong thời điểm đã cho. Trong WWER-1000 tác động đó được thực hiện bằng nhóm công tác và nhóm số năm, gồm bốn thanh OP, một trong số đó là thanh trung tâm. Trong những trường hợp đặc biệt, người ta sử dụng cả các nhóm OP khác.

Các tác động trong trường hợp ophset âm và khi nó tăng về giá trị tuyệt đối nghĩa là khi dịch chuyển điểm tỏa năng lượng cực đại lên phần trên vùng hoạt, rõ ràng là cần nhúng nhóm OP vào vùng hoạt ở mức 50 – 60% và sau đó kéo chúng ra theo tiến trình chuyển dịch xuống dưới của điểm tỏa năng lượng cực đại. Khi ophset dương và khi nó tăng, các tác động sẽ ngược lại – nhóm điều chỉnh OP СУЗ được kéo lên đến mức giới hạn trên. Nếu tác động trên chưa đủ hiệu quả, thì OP СУЗ trung tâm được hạ xuống đến trụ đỡ dưới. Ở phía dưới, trong vùng dòng nơtron cực đại, độ hiệu dụng của nó dường như lớn hơn so với ở phần trên và yếu tố đó tác động làm dịu độ tăng ophset trong khi vẫn làm tắt dần các dao động. Khi cần có thể sử dụng cả các OP khác của nhóm số năm.

Câu hỏi cho mục
“Khử các dao động xenon”

1. Nguyên tắc cơ bản nào có trong các thuật toán khử dao động?

13. CÁC VẤN ĐỀ AN TOÀN

13.1. Các rối loạn hạt nhân

Kinh nghiệm vận hành cho thấy WWER là một trong những lò phản ứng an toàn nhất, nhưng rủi ro hạt nhân có liên quan đến vận hành thì không nên coi là không có. Xác suất các hư hại nặng vượt ra ngoài khuôn khổ thiết kế của vùng hoạt được đánh giá 10^{-4} – 10^{-5} 1/năm tùy thuộc vào dạng thiết kế, năm đưa vào sử dụng và mức độ hiện đại hóa tổ máy.

Các rối loạn hạt nhân, vốn có thể dẫn đến những hậu quả phóng xạ nghiêm trọng ngoài thiết kế, theo nguyên nhân có nguồn gốc từ ban đầu, có thể chia làm ba dạng: hình thành khối lượng tới hạn cục bộ, mất điều khiển phản ứng dây chuyền,

sai phạm dẫn thoát nhiệt khỏi vùng hoạt. Trong các thiết kế WWER đã tính trước các giải pháp tổ chức và kỹ thuật để giảm đến tối thiểu rủi ro xảy ra các biến cố nói trên. Việc hiểu rõ các rủi ro là một phần của các giải pháp đó. Tiếp theo, xem xét các nguyên tắc kỹ thuật cơ bản đã được đặt ra trong thiết kế hướng tới loại trừ các biến cố nói trên và các vị trí dễ tổn thương nhất.

13.2. Khối lượng tới hạn cục bộ

Để hiểu toàn diện vấn đề, ta đánh giá bán kính tới hạn của một mạng đồng nhất gồm các BNL WWER-1000 có độ làm giàu nhiên liệu 4,4%, đầy nước sạch 20^0C. Có thể đánh giá từ đẳng thức của các thông số hình học và vật liệu.

$$\varkappa^2 = B^2; \qquad \frac{k_\infty - 1}{M^2} = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R}\right)^2. \qquad (13.2.1)$$

Từ hệ thức trên đây suy ra chỉ mới 3 – 4 BNL có độ làm giàu nói trên trong nước lạnh không chứa axit boric cũng đạt đến các thông số tới hạn, với tất cả các hậu quả xảy ra. Đánh giá tương tự cho WWER-440 cho thấy, ~ 7 BNL có độ làm giàu nhiên liệu như vậy cũng tạo ra khối lượng tới hạn cục bộ.

Để loại trừ khả năng xuất hiện phản ứng dây chuyền tự phát ở các giai đoạn vận chuyển, mọi phương tiện công nghệ vận chuyển đều được thiết kế sao cho cố định được một cách chắc chắn các BNL với bước xếp bảo đảm $k_\infty \leq 0,95$ khi đầy nước sạch 20^0C. Cả kết cấu bể chứa cũng thỏa mãn điều kiện đó. Và, đương nhiên, trước khi xếp thùng chứa có BNL vào bể thay đảo nhiên liệu, về công nghệ, loại trừ sự tiếp xúc của nó với nước. Khi thay đảo, các BNL được xếp sát nhau trong vùng hoạt. Bởi vì trạng thái dưới tới hạn WWER không kiểm soát được, vùng hoạt đầy nước sạch lạnh có các BNL chưa sử dụng là trên tới hạn, cả khi tất cả các OP СУЗ được hạ xuống. Đối với tất cả các WWER, kể cả các lò phản ứng có 73 OP СУЗ, nồng độ axit boric cần thiết trong chất tải nhiệt là rào cản duy nhất, ngăn cản sự hình thành khối lượng tới hạn trong suốt thời gian thay đảo nhiên liệu và khi gia nhiệt lò phản ứng. Cần đặc biệt quan tâm đến việc kiểm soát nồng độ axit boric trong giai đoạn này. Trong giai đoạn thay đảo nhiên liệu trước thời điểm đưa lò phản ứng vào МКУ, mọi mối liên hệ của các hệ thống vòng sơ cấp và nước khử khoáng sạch đều được ngắt, đồng thời kiểm soát chặt chẽ tình trạng của các thiết bị ngắt dòng. Một trong số các công đoạn công nghệ bất lợi nhất trong phương án này là việc đổ đầy thể tích vòng thứ cấp bởi nước của các bình sinh hơi bị hở thông với vòng sơ cấp. Trong trường hợp cần thiết, công đoạn trên được tiến hành

khi tăng cường kiểm soát để loại trừ khả năng trào nước của vòng thứ cấp vào vòng sơ cấp.

Điều chỉnh bor để làm giảm nồng độ axit boric chỉ được tiến hành khi các ГЦН hoạt động, như vậy mới loại trừ được khả năng đưa nước khử khoáng vào vùng hoạt mà không được trộn đều.

Khi đã hiểu rõ vấn đề và hiểu rõ các biện pháp tổ chức-kỹ thuật được áp dụng, trong thực tế vận hành vẫn có thể có các hành động sai lầm của nhân viên, dẫn đến khả năng chảy nước khử khoáng sạch vào vòng sơ cấp khi lò phản ứng đã dừng, trong đó có trường hợp chảy qua bình sinh hơi bị hở. Trong mọi trường hợp, các biện pháp đã quy định cần được áp dụng kịp thời.

Các câu hỏi cho mục
"Khối lượng tới hạn cục bộ"

1. Bao nhiêu BNL được làm giàu 4,4% tạo ra khối lượng tới hạn trong nước lạnh sạch?
2. Vào thời điểm vận hành nào tồn tại xác suất cao nhất tạo ra khối lượng tới hạn do các tác động sai lầm?
3. Các công đoạn công nghệ nào là nguy hiểm theo quan điểm có thể chảy nước khử khoáng sạch vào vùng hoạt?
4. Tại sao việc kiểm soát nồng độ axit boric khi thay đảo nhiên liệu lại có ý nghĩa hàng đầu trong việc bảo đảm an toàn?

13.3. Mất điều khiển phản ứng dây chuyền

Mất điều khiển kèm theo tăng tốc lò phản ứng sau đó dẫn đến những rối loạn với các hậu quả nghiêm trọng. Việc tăng tốc tự phát được loại trừ nhờ khả năng tự bảo vệ bên trong WWER-1000 – các hiệu ứng công suất và hiệu ứng nhiệt độ âm. Để loại trừ khả năng mất điều khiển công suất do các hỏng hóc trong hệ thống điều khiển hoặc do các tác động sai lầm của nhân viên, trong các thiết kế WWER-1000 đã tính trước tác động bảo vệ tự động (bảng 13.1).

Trong thực tế vận hành WWER, không cố định một trường hợp tăng công suất nào khi lò phản ứng hoạt động ở mức định mức trước khi khởi động các thiết bị А3 (А3-I). Có thể có những trường hợp cá biệt dừng lò khẩn cấp theo tín hiệu đạt đến chu kỳ các mức đặt khẩn cấp. Đó là trường hợp do vi phạm quy định ở phần thời gian lưu sau khi đưa độ phản ứng dương vào mà phải đưa lò phản ứng vào МКУ.

Bảng 13.1. Các mức đặt khởi động thiết bị bảo vệ khẩn cấp theo mức công suất và chu kỳ tăng công suất cho mức công suất định mức

Lò phản ứng	N		Chu kỳ tăng công suất e lần	
			T ≤ 10 s	T ≤ 20 s
WWER-1000	АЗ khi $N \geq 107\% N_{ном}$	ПЗ-I khi $N \geq 104\% N_{ном}$	АЗ	ПЗ-I
WWER-440	АЗ-I khi $N \geq 110\% N_{ном}$	АЗ-III khi $N \geq 105\% N_{ном}$	АЗ-I	АЗ-III

Chế độ khẩn cấp kèm theo làm nguội vòng sơ cấp nhanh và sâu, ví dụ do vỡ đường dẫn hơi trong phần không ngắt khỏi bình sinh hơi, là chế độ nguy hiểm tiềm ẩn của WWER về khả năng mất điều khiển công suất nhất thời có thể có. Trong trường hợp xuất hiện chế độ này ở cuối thời hạn sử dụng WWER-1000, khi mà hệ số nhiệt độ của độ phản ứng cực đại, khi vòng sơ cấp được làm nguội đến 220^0C thì ~ 5,5% độ phản ứng được giải phóng, lượng này gần tương đương với độ hiệu dụng АЗ có hỏng hóc một OP. Như vậy, ở nhiệt độ đã cho trong chế độ công nghệ đó có thể có việc chuyển trở lại vào trạng thái tới hạn. Đối với WWER-440 có 37 OP СУЗ, chế độ đó diễn ra êm hơn bởi vì độ hiệu dụng АЗ-I hơn 6%, nhiệt độ tới hạn lặp dưới 100^0C.

Khi các hệ thống an toàn hoạt động theo thiết kế, trong trường hợp có tới hạn lặp thì giới hạn định mức hư hại các thanh nhiên liệu không bị vi phạm. Lò phản ứng chuyển sang trạng thái dưới tới hạn nhờ đưa axit boric vào vòng sơ cấp. Trong khi đó, chế độ sẽ nguy hiểm khi trở thành chế độ ngoài thiết kế trong trường hợp có thêm những hỏng hóc thiết bị.

Cho đến nay đã có 4 – 5 trường hợp làm nguội tương đối nhanh và sâu đến 220^0C của vòng sơ cấp WWER-1000. Tất cả các trường hợp đó đều có liên quan đến việc các van bảo hiểm không đóng khi tăng áp suất vòng thứ cấp, các van này đã khởi động khi sụt phụ tải máy phát tuabin. Trong tất cả các trường hợp hỏng hóc OP đã nói khi khởi động АЗ, chưa từng có trường hợp nào chế độ làm nguội kéo dài mươi phút – thời gian đủ để tăng độ dưới tới hạn bằng việc đưa axit boric vào.

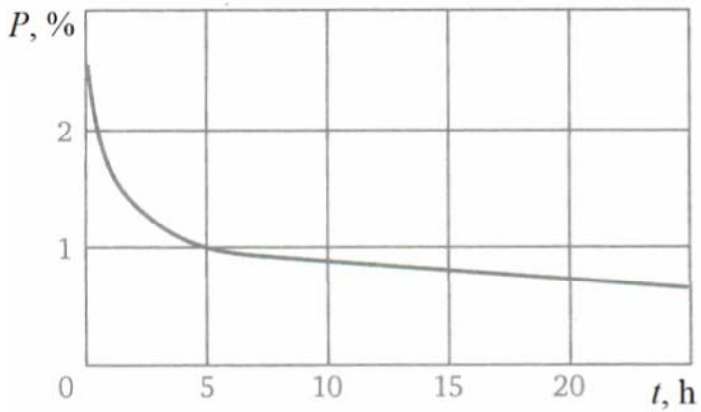
Các câu hỏi cho mục "Mất điều khiển phản ứng dây chuyền"

1. Tự bảo vệ bên trong là gì?
2. Các tín hiệu khẩn cấp nào gây ra khởi động АЗ mà ngăn cản tăng tốc lò phản ứng do các tác động sai lầm? Các mức đặt khởi động АЗ và ПЗ là như thế nào?
3. Trong chế độ công nghệ nào có thể có việc chuyển vào trạng thái tới hạn lặp?

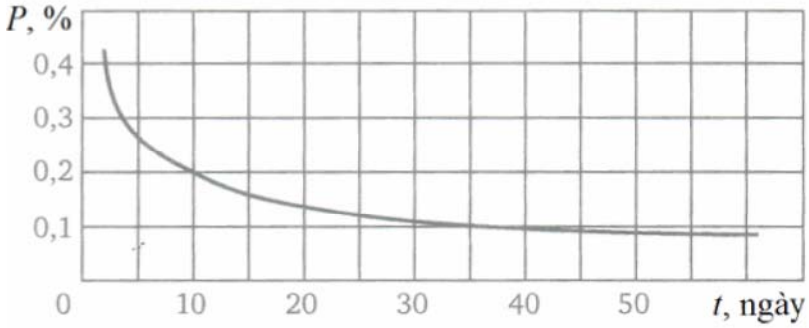
13.4. Sai phạm dẫn thoát nhiệt khỏi vùng hoạt

Theo các đánh giá xác suất, sai phạm dẫn thoát nhiệt kèm theo hư hại vùng hoạt – sự cố dễ xảy ra nhất trong số các sự cố nghiêm trọng.

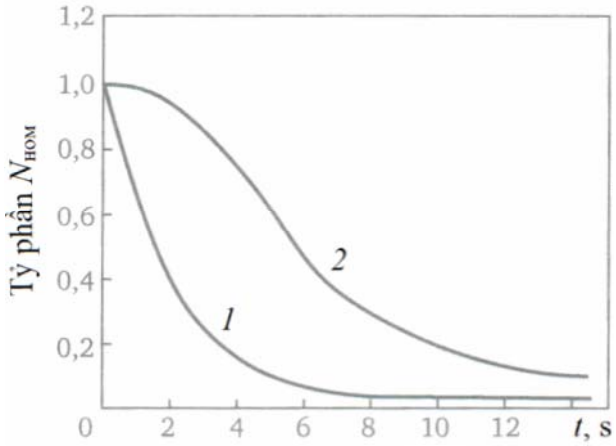
Thiết kế đã tính trước các biện pháp kỹ thuật để loại trừ hư hại các thanh nhiên liệu vượt quá định mức đối với các chế độ giới hạn có sai phạm dẫn thoát nhiệt sau đây: mất điện tức thời ГЦН và rò rỉ vòng sơ cấp khi đứt vỡ đường ống tuần hoàn chính (trong thiết kế đầu tiên WWER-440 (tổ máy số 3, 4 NMĐHN Novovoronhet, hai tổ máy đầu tiên NMĐHN Kolski), đã xem xét các rò rỉ khi đứt vỡ các đường ống đường kính nhỏ hơn.)



Hình 13.1. Sự thay đổi mức tỏa nhiệt dư tương đối của vùng hoạt WWER của những ngày đầu sau dừng lò.



Hình 13.2. Sự thay đổi mức tỏa nhiệt dư tương đối của vùng hoạt WWER trong 60 ngày đầu sau dừng lò.



Hình 13.3. Sự thay đổi công suất nơtron (1) và công suất nhiệt (2) của vùng hoạt WWER khi dừng lò khẩn cấp kèm theo hạ tất cả OP СУЗ (bắt đầu rơi t = 0)

Trong trường hợp thứ nhất, việc làm nguội tin cậy các thanh nhiên liệu được bảo đảm bằng việc dừng khẩn cấp lò phản ứng đồng thời ngắt ГЦН và sử dụng các ГЦН có quán tính, mà khi chúng chạy theo đà sẽ tạo dòng chảy qua vùng hoạt, đủ để dẫn thoát nhiệt dư khi xả công suất. (Trong các thiết kế đầu tiên WWER-440 đã sử dụng các ГЦН kín, không có quán tính. Các máy phát tự tiêu, hoạt động khi tuabin chạy theo đà bảo đảm cho các ГЦН này chạy theo đà khi mất điện tổ máy). Việc dẫn thoát công suất sau khi dừng hẳn ГЦН được thực hiện trong chế độ tuần hoàn tự nhiên. Những hư hại các thanh nhiên liệu trong chế độ này không làm tăng các giới hạn vận hành, nghĩa là chế độ đã cho không phải là sự cố. Trong trường hợp thứ hai, thậm chí khi các hệ thống an toàn, vốn bảo đảm việc dừng lò khẩn cấp và cấp đầy nước cho vùng hoạt, hoạt động theo thiết kế thì những hư hại các thanh nhiên liệu tới mức định mức cực đại cũng có thể xảy ra. Nhưng các BNL sẽ không thể bị hư hại về kết cấu, điều này bảo đảm khả năng tháo dỡ an toàn vùng hoạt.

Việc tỏa năng lượng dư lớn trong vùng hoạt sau khi dừng lò, vốn liên quan đến quá trình phân rã các sản phẩm phân hạch không bền (xem mục 2.12) là yếu tố làm tăng khả năng chuyển các rối loạn khẩn cấp thành sự cố nghiêm trọng kèm theo hư hại vùng hoạt. Trong những giờ đầu sau khi dừng lò, mức tỏa năng lượng dư vào khoảng ~ 1% $N_{ном}$, nghĩa là ~ 30 MW đối với WWER-1000 và ~ 14 MW đối với WWER-440. Sự thay đổi công suất tương đối sau khi dừng lò được đưa ra trên các hình 13.1 – 13.3. Công suất đó cần được dẫn thoát, trong trường hợp ngược lại trong khoảng 2 – 3 h sẽ xảy ra hiện tượng bốc hơi chất tải nhiệt của vùng hoạt, tăng nhiệt độ nhiên liệu và các vật liệu kết cấu đến nhiệt độ nóng chảy

và sau đó khoảng 7 – 8 h thì khối nóng chảy (lớp đệm) làm nóng chảy vỏ lò. Các thiết kế tổ máy sử dụng WWER, loại tiếp sau B-320, đã tính trước trường hợp đó bằng việc thiết kế thùng thu hồi đặc biệt nằm ngay dưới lò phản ứng.

Trong lịch sử vận hành các lò phản ứng nước nhẹ (tương tự WWER) đã có những sự cố kèm theo sai phạm dẫn thoát nhiệt và phát triển các biến cố không tính đến trong thiết kế. Ta xem xét ba sự cố tiêu biểu nhất theo quan điểm công nghệ.

Sự cố NMĐHN "Three Mile Island-2" (Mỹ)

Đây là sự cố nghiêm trọng nhất trong số các sự cố đã xảy ra trong các lò phản ứng nước áp suất có vỏ. Lò công suất đã xảy ra sự cố này được đưa vào hoạt động năm 1978. Về các thông số, nó rất gần với WWER-1000. Sơ đồ bố trí các thiết bị cơ bản trong nhà lò kín NMĐHN "Three Mile Island-2" được trình bày trên hình 13.4. Công suất định mức của tổ máy 2853 MW, công suất điện 956 MW. Tuần hoàn chất tải nhiệt trong vòng sơ cấp được bảo đảm bằng bốn ГЦН. Nhiệt từ vòng sơ cấp được dẫn ra bằng hai bình sinh hơi đứng. Thiết bị điều áp được nối với một trong số hai mạng nóng của các đường ống vòng sơ cấp. Vùng hoạt lò phản ứng có 177 BNL, mỗi BNL chứa 208 thanh nhiên liệu đường kính ngoài 10,9 mm. Dùng urani dioxit dạng viên đường kính 9,4 mm, làm giàu tối đa 2,96%, làm nhiên liệu.

Sự cố xảy ra ngày 29 tháng ba năm 1979. Tổ máy đang hoạt động ở mức 97% công suất (2772 MW). Biến cố khởi nguồn là biến cố hiếm thấy nhưng bình thường: mất cấp nước khử khoáng của tuabin do các máy bơm cấp nước cấp, sau đó là máy phát tuabin bị ngắt. Trong mô tả tiếp sau, thời điểm ngắt máy phát tuabin sẽ được lấy làm thời điểm đầu để tính thời gian.

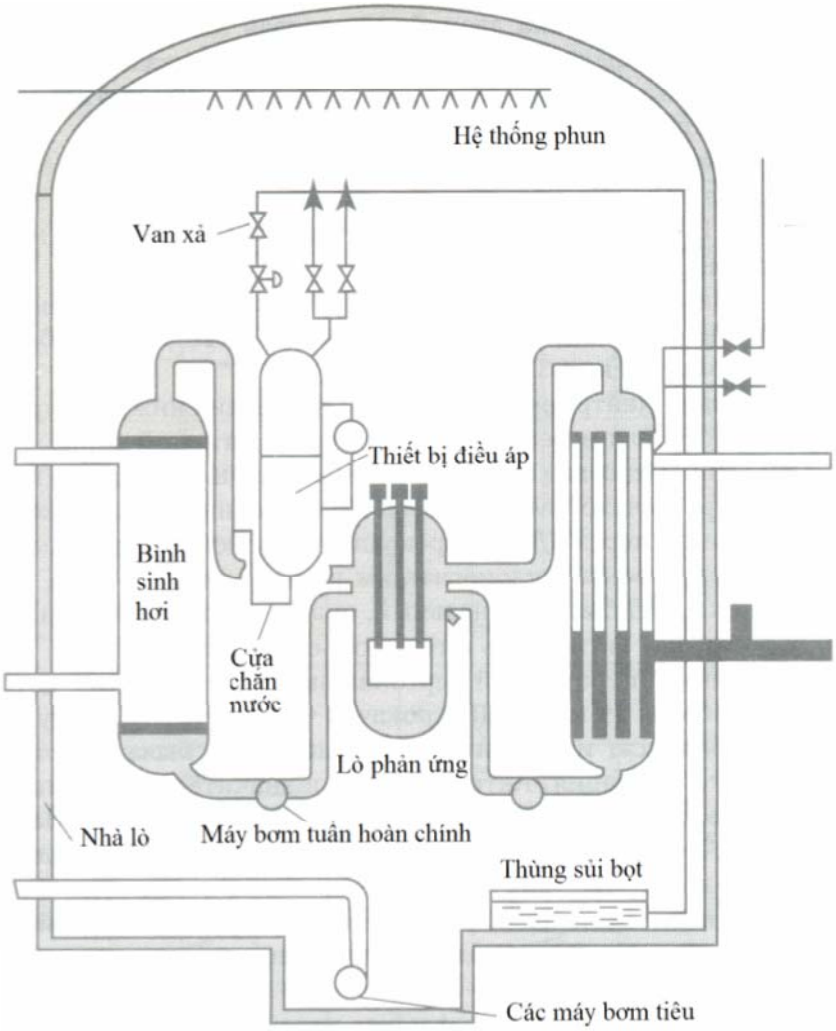
0 phút 00 s. Do ngắt máy phát tuabin, cân bằng sinh nhiệt và tải nhiệt bị phá hủy và bắt đầu tăng đột ngột các thông số vòng sơ cấp: áp suất và nhiệt độ. Song song với việc ngắt các máy bơm cấp, mức chất tải nhiệt trong các bình sinh hơi đã giảm đột ngột. Lưu ý rằng, tổ máy đã được trang bị những bình sinh hơi dạng đứng, dự trữ nước của vòng thứ cấp trong đó là tối thiểu, điều này làm cho tổ máy nói chung ít quán tính trong các quá trình chuyển tiếp.

0 phút 03 s. Áp suất trong vòng sơ cấp tức thì đạt đến mức đặt khởi động van xả 15,6 MPa. Van mở, bảo đảm xả hơi vào thùng sủi bọt với lưu lượng 60 tấn/h.

0 phút 08 s. Bởi vì mất cân bằng công suất của hai vòng tuần hoàn không được khắc phục, nên áp suất vòng sơ cấp tiếp tục tăng, ở giây thứ tám đạt đến mức đặt dừng lò khẩn cấp 16,3 MPa và lò phản ứng đã dừng.

0 phút 12 s. Áp suất vòng sơ cấp hạ xuống 15,3 MPa – mức đặt đóng van xả, nhưng van không đóng. Bởi vì nguồn cấp cho xolenoit điều khiển đã được truyền đi mà không có những nhận xét về điều mà thiết bị phát tín hiệu trên bảng điều khiển nói đến, nên nhân viên coi là van đã đóng (nguyên nhân của việc van không đóng, nhiều khả năng là kẹt cơ học, bởi vì sau đó khi đập vào thì nó đóng). Sau khi giảm công suất lò phản ứng, do dòng qua van xả không đầy nên mức nước trong thiết bị điều áp (КД) bắt đầu hạ xuống. Nhân viên vận hành đã ngắt hệ thống thổi của vòng sơ cấp và đóng máy bơm bù dự trữ.

0 phút 30 s. Khởi động hệ thống phát tín hiệu tăng nhiệt độ chất thải từ van xả (~ 115^0C) và một trong số các van bảo hiểm, nhưng nhân viên không coi trọng điều đó, sau khi cho rằng đó là tăng quán tính sau khi khởi động van. Mức nước trong lòng chảo của các bình sinh hơi hạ xuống tới mức đặt khẩn cấp. Các máy bơm bù khẩn cấp tự động đóng, nhưng nước vẫn không cấp được vào các bình sinh hơi: các van ngắt hình như bị đóng, các van này đã không được mở do sai lầm của nhân viên khi bảo dưỡng kỹ thuật các máy bơm. Mực nước trong các bình sinh hơi hạ xuống nhanh chóng.



Hình 13.4. Bố trí thiết bị cơ bản trong nhà lò NMĐHN "Three Mile Island-2" (Mỹ)

0 phút 48 s. Rò rỉ hơi từ КД đã được điều hòa nhờ hai máy bơm bù hoạt động. Mực nước trong КД bắt đầu tăng lên.

1 phút 00 s. Khởi động hệ thống phát tín hiệu tăng nhiệt độ chất xả ra từ van bảo hiểm số hai КД (145^0C), bởi vì các chất xả ra từ tất cả các van đều được dẫn về thùng góp chung. Cũng giống như trường hợp trước, hoạt động của hệ thống phát tín hiệu không được để ý. Rõ ràng, ở thời điểm này nhân viên hoàn toàn bị thu hút vào việc khôi phục nước bù cho các bình sinh hơi.

1 phút 45 s. Các bình sinh hơi bị khô cạn (hơi đã xả hết vào khí quyển), việc dẫn thoát nhiệt dư chấm dứt, công suất nhiệt dư khoảng ~ 30 MW. Trong chất tải nhiệt đang tuần hoàn trong vòng sơ cấp xuất hiện và bắt đầu tăng hàm lượng hơi. Dưới

nắp lò phản ứng đã sinh ra bọt hơi có các thông số lớn hơn so với trong КД. Chất tải nhiệt từ lò phản ứng bắt đầu tràn vào КД.

2 phút 01 s. Áp suất trong vòng sơ cấp tiếp tục giảm do làm nguội КД qua van xả mở. Ở áp suất 11,4 MPa, máy bơm bù khẩn cấp của vòng sơ cấp áp suất cao tự động mở với lưu lượng ~ 200 tấn/giờ, cấp nước vào các nhánh lạnh. Một trong số hai máy bơm bù đang hoạt động theo chế độ làm việc bình thường khi đó đã tự động dừng theo chương trình hoạt động của thiết bị tự động.

3 phút 13 s. Trong tình huống đã trở nên phức tạp, lưu lượng bù đã vượt quá rò rỉ, và mức nước trong КД bắt đầu tăng lên, hơn nữa quá trình chảy chất tải nhiệt từ lò phản ứng vào КД lại không dừng. Lưu lượng bù khẩn cấp đã bị giảm bớt do mở tái tuần hoàn máy bơm.

3 phút 26 s – 3 phút 28 s. Lần lượt khởi động hệ thống phát tín hiệu: tăng nhiệt độ trong thùng sủi bọt và tăng mức nước trong КД. Tín hiệu đầu bị dừng mà không để ý.

4 phút 38 s. Mặc dù nhiệt độ và áp suất vòng sơ cấp tương ứng với trạng thái bão hòa, giống như báo hiệu có rò rỉ, nhân viên vận hành đã dừng máy bơm bù khẩn cấp và tăng lưu lượng thổi. Hành động như vậy, nhân viên định làm tăng mức nước КД.

Trong chế độ công nghệ đã trở nên phức tạp, quá trình bốc hơi chất tải nhiệt vòng sơ cấp đã bắt đầu mạnh lên. Bọt hơi dưới nắp lò phản ứng đã tăng lên tới mức đẩy chất tải nhiệt ra khỏi lò phản ứng, nhưng các ГЦН đang hoạt động vẫn làm mát vùng hoạt. Tỏa nhiệt dư một phần được dẫn thoát qua КД.

Lưu ý rằng, các đường ống nối КД với các đường ống vòng sơ cấp có điểm đặc biệt trong kết cấu là không cho thông – cửa chắn nước (hình 13.4). Ở giai đoạn đầu sự cố nó làm khó dẫn thoát nhiệt qua КД, bởi vì sự suy giảm nhiệt độ và gia tăng tỷ trọng chất tải nhiệt đã được cân bằng nhờ tăng áp suất trong lò phản ứng, sau đó khi giảm mức nước trong lò phản ứng xuống dưới các đoạn ống nóng thì cửa chắn nước không cho chất tải nhiệt chảy từ КД vào lò phản ứng. Điều đó không cho phép nhân viên vận hành kịp thời sửa chữa sai lầm.

8 phút 00 s. Nhân viên vận hành xác định được nguyên nhân không cấp được nước cấp vào các bình sinh hơi và bắt đầu cấp nước vào.

10 phút 48 s. Khởi động hệ thống phát tín hiệu tăng mức nước trong thùng sủi bọt. Bởi vì chất tải nhiệt vẫn tiếp tục chảy vào thùng, màng bảo hiểm bị vỡ. Chất tải nhiệt bắt đầu chảy vào nhà lò, áp suất và nhiệt độ trong nhà lò bắt đầu tăng.

14 phút 50 s. Khởi động hệ thống phát tín hiệu không cho phép các ГЦН hoạt động. Xuất hiện rung mạnh các ГЦН do hàm lượng hơi trong chất tải nhiệt khá lớn.

20 phút 00 s. Do giảm mật độ chất tải nhiệt, các chỉ số dòng nơtron theo АКНП trong dải nguồn bắt đầu tăng. Việc đó sau này đã thu hút sự chú ý của nhân viên vận hành.

22 phút 44 s. Các bình sinh hơi đã đầy đến mức cho phép bắt đầu dẫn thoát nhiệt qua vòng thứ cấp, nhưng thuật toán cho hệ thống tự động lại duy trì áp suất trong bình sinh hơi bằng với áp suất bão hòa vòng sơ cấp, nghĩa là không làm nguội vòng sơ cấp.

29 phút 23 s. Nhiệt độ và áp suất trong nhà lò tăng nhanh. Nhân viên vận hành mở máy bơm phun.

0 h 40 phút. Các chỉ số dòng nơtron theo АКНП tiếp tục tăng do mật độ chất tải nhiệt tiếp tục giảm.

1 h 13 phút. Đã ngắt hai ГЦН do tăng độ rung.

1 h 15 phút. Hoạt độ khí trong nhà lò đạt mức sự cố. Rõ ràng, vì tăng áp suất trong lòng thanh nhiên liệu do tăng nhiệt độ nên vỏ bọc các thanh nhiên liệu bắt đầu bị vỡ.

1 h 40 phút. Do rung mà các ГЦН còn đang hoạt động cũng bị ngắt. Quá trình làm nguội cưỡng bức vùng hoạt cũng chấm dứt. Các bộ phận trong kết cấu vùng hoạt bắt đầu bị nóng lên nhanh chóng.

2 h 1 phút. Trong thời gian đó đã thấy hoạt độ gamma của chất tải nhiệt tăng lên đáng kể. Rõ ràng đó là các BNLbắt đầu bị phá hủy.

2 h 14 phút. Các detector nơtron cho thấy mức chất tải nhiệt trong lò phản ứng đã hạ xuống dưới phần trên vùng hoạt.

2 h 22 phút. Nhân viên đã đóng van xả. Áp suất trong vòng sơ cấp bắt đầu tăng, còn trong nhà lò thì giảm. Bởi vì quá trình dẫn thoát nhiệt qua КД đã chấm dứt, và không có biện pháp nào được áp dụng để cấp chất tải nhiệt vào vùng hoạt, do mức

nước trong КД ở mức định mức, nên vùng hoạt tiếp tục bị phá hủy. Hoạt tính son khí trong nhà lò tăng nhanh.

2 h 45 phút. Nhân viên vận hành đóng một ГЦН, nó hoạt động được 19 phút. ГЦН bơm chuyển nước khử khoáng lạnh từ nhánh vào vùng hoạt và lại thấy rung mạnh. Vùng hoạt nguội đi nhiều, mặc dù nó vẫn tiếp tục bị phá hủy. Các thông số bọt hơi trong lò phản ứng giảm xuống, mức nước trong КД hạ thấp xuống.

3 h 23 phút. Nước bù được cấp tối đa, lò phản ứng đầy và quá trình phá hủy vùng hoạt bắt đầu dừng.

Trong khoảng 4 h tiếp theo đã cho dẫn thoát nhiệt dư qua van xả КД (nó vẫn được điều khiển bình thường). Sau đó, trong khoảng 7 đến 14 h sau lúc bắt đầu sự cố, các bình sinh hơi đã được cấp đầy nước, hai ГЦН hoạt động, và quá trình làm nguội lò phản ứng được phục hồi theo sơ đồ chung. Sau khoảng gần một tháng, các ГЦН bị dừng, và lò phản ứng sau đó được làm nguội trong chế độ tuần hoàn tự nhiên qua các bình sinh hơi.

Bản sao băng tự ghi có ghi chép mức nước trong КД và áp suất trong vòng sơ cấp ở giai đoạn sự cố được đưa ra trên hình 13.5.

Việc phân tích mức độ hư hại vùng hoạt chỉ có thể bắt đầu vào năm 1982. Kết quả tháo dỡ lò phản ứng đã xác định rằng, ~ 40% vật liệu đã nóng chảy, hơn nữa 1,5 m phần trên đã không còn. Quan trọng là vỏ lò không bị hư hại nhiều. Các hư hỏng nặng nhất trên vỏ lò là các vết nứt dài dưới 150 mm, chứa đầy kim loại nóng chảy trong mối hàn.

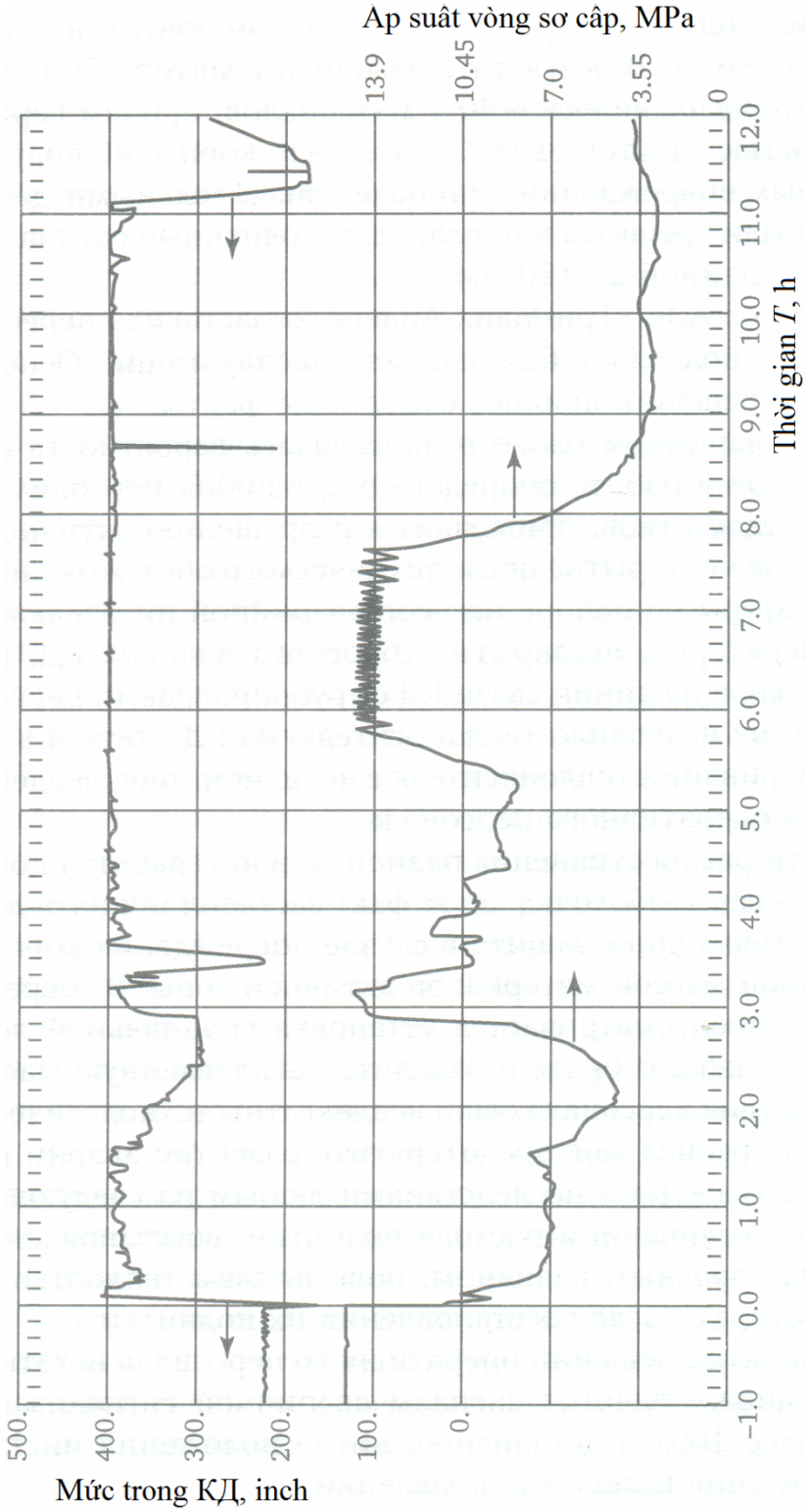
Sự cố ở NMĐHN “Three Mile Island-2” buộc phải xem xét lại một số cách tiếp cận an toàn vận hành. Cơ sở để áp dụng các giải pháp là các yếu tố sau đây:

1) Trong tổ máy có sự cố đã trùng hợp các hỏng hóc thiết bị khi chúng hoạt động, các sai lầm của nhân viên khi vận hành và các khiếm khuyết thiết kế dẫn đến phá hủy vùng hoạt: sai là không mở thiết bị ngắt dòng cho cột áp các máy bơm nước cấp khẩn cấp vào bình sinh hơi sau khi bảo dưỡng kỹ thuật, không đóng van xả КД, sự có mặt của cửa chắn nước trên đường nối КД với các đường ống vòng sơ cấp, điều này không cho phép chất tải nhiệt chảy từ КД vào lò phản ứng khi chất tải nhiệt trong vùng hoạt bốc hơi, các tác động không thích hợp của nhân viên vận hành;

   Đã khởi động rào cản cuối cùng trên đường lan truyền các nuclit phóng xạ – nhà lò. Điều đó buộc phải áp dụng các biện pháp bổ sung để bảo vệ khỏi

khối nóng chảy các vật liệu vùng hoạt, trong trường hợp hư hại vỏ lò. Trong các thiết kế hiện đại, đã tính trước việc lắp đặt một thùng đặc biệt để thu gom và làm nguội khối nóng chảy.

2) Các tác động của nhân viên không hợp với tình huống công nghệ. Nhân viên có thể ngăn cản sự cố phát triển thành sự cố ngoài thiết kế với những hậu quả nghiêm trọng, bằng bất kỳ một trong những tác động sau đây: tăng lưu lượng nước bù, phục hồi điều khiển van xả, tăng dẫn thoát nhiệt trong các bình sinh hơi sau khi phục hồi nước bù cho chúng.



Hình 13.5. Sự thay đổi mức chất tải nhiệt trong KД và áp suất trong vòng sơ cấp trong những giờ đầu sự cố ở NMĐHN "Three Mile Island" (Mỹ)

Nhiều tín hiệu của hệ thống phát tín hiệu khẩn cấp (khoảng hơn 100) và các tình huống cụ thể của các hướng dẫn vận hành có ảnh hưởng đến việc áp dụng các giải pháp của nhân viên vận hành. Để tách các hướng tác động chủ yếu của nhân viên trong các tình huống công nghệ phức tạp tương tự, đã bắt đầu phát triển các quy trình định hướng theo triệu chứng, trong đó có các tác động hướng đến việc thực hiện chức năng an toàn của các thiết bị;

3) Đã nhận thức rõ sự cần thiết nâng cấp an toàn quá trình công nghệ. Các hướng chủ yếu cải tiến các hệ thống an toàn: bảo đảm việc tái hợp hydro trong nhà lò, đo đạc mức chất tải nhiệt trong lò phản ứng ở các thông số định mức, xây dựng hệ thống loại bỏ khí khẩn cấp khỏi lò phản ứng.
Ngày nay, những hệ thống nói trên đã có trong các thiết kế lò phản ứng WWER.

Hở các ống góp bình sinh hơi của tổ máy số 1 NMĐHN Rovenski. Sự cố đã xảy ra ngày 22 tháng 1 năm 1981. Tổ máy được đưa vào hoạt động năm 1980. Nhà máy được trang bị lò phản ứng WWER-440 và các thiết bị theo thiết kế gần nhất B-213, nghĩa là được trang bị các hệ thống an toàn hiệu quả. Trước sự cố, tổ máy được vận hành ở công suất 90% định mức. Theo trạng thái kỹ thuật của các bình sinh hơi, đã có một ghi nhận quan trọng: trong khoảng không gian giữa các tấm đệm bịt kín các ống góp nóng, đã thấy có sự gia tăng áp suất trong khoảng 45 – 125 kG/cm^2, điều đó cho thấy có rò rỉ từ vòng sơ cấp sang vòng thứ cấp, xuyên qua đệm kín. Sau này, khi xem xét các mặt cắt của những vít cấy đã bị đứt, thấy rằng chúng đã bị hư hại đã từ lâu, trước khi xảy ra sự cố. Những hư hại cũng được phát hiện cả ở các mặt bích của các ống góp: các lỗ cấy vít có nhiều vết nứt.

Sự cố bắt đầu từ việc tự rơi của một OP СУЗ do trục trặc về kỹ thuật điện. Lò phản ứng đã được giảm tải bằng tay đến 75% $N_{ном}$, phù hợp với các yêu cầu hướng dẫn. Sau đó, OP đã được đưa ra khỏi vùng hoạt và quá trình phục hồi phụ tải bắt đầu. Các dao động không đáng kể của nhiệt độ chất tải nhiệt và các ứng suất cơ học bổ sung tương ứng có liên quan đến quá trình chuyển tiếp nói trên, là yếu tố kích thích cuối cùng làm hư hại các vít cấy vốn còn giữ được nắp các ống góp nóng của các bình sinh hơi số ba và số năm. Các nắp đó bị bật ra và tạo ra dòng chảy từ vòng sơ cấp vào vòng thứ cấp, đường kính khoảng ~ 150 mm. Ngay trước khi hở bình sinh hơi, lò phản ứng có các thông số sau đây: N_T = 1120 MW, $T_{cp.1K}$ = 290^{0}C, P_{1K} = 125 kG/cm^2.

Sau đó, quá trình công nghệ tiếp diễn như sau (có tính đến rò rỉ):

0 s – АЗ-2 theo sụt giảm áp suất vòng sơ cấp đến 115 kG/cm^2;

12 s – АЗ-2 theo tín hiệu "rò rỉ nhỏ";

30 s – САОЗ tiến diễn theo tín hiệu "rò rỉ lớn" kèm theo bù vòng sơ cấp với lưu lượng ~ 150 tấn/h;

50 s – hạ các van chặn của tuabin;

60 s – giảm áp suất vòng sơ cấp xuống dưới 60 kG/cm^2, cấp dung dịch bor từ các bể chứa vào vòng sơ cấp;

180 s – cân bằng áp suất các vòng sơ cấp và thứ cấp ở mức 40 kG/cm^2. Nhiệt độ vòng sơ cấp hạ xuống đến 240^{0}C. Mức nước trong КД được phục hồi và được kiểm soát.

Nhân viên vận hành áp dụng các biện pháp để ổn định các thông số. Theo tiến trình tăng mức nước, các bình sinh hơi có hỏng hóc được coi như đã phục hồi, các ГЦН đã được dừng, các van chặn chính (ГЗЗ) của các nhánh số ba và số năm được đóng. Sau khi hoàn thành khởi động theo bậc, СБ đã hủy tín hiệu cấm điều khiển bằng tay các cơ cấu làm việc bình thường và việc điều khiển các máy bơm bù vòng sơ cấp được phục hồi. Do van chặn chính vào mạng "lạnh" nhánh số ba không đóng kín được, các bình sinh hơi có hỏng hóc đã không thể được ngắt hoàn toàn. Nhưng rò rỉ chất tải nhiệt từ vòng sơ cấp vào vòng thứ cấp cũng đã giảm đáng kể. Mức nước trong КД và áp suất trong vòng sơ cấp bắt đầu tăng nhờ hoạt động của các hệ thống bù khẩn cấp và bù bình thường. Ở phút thứ 39, khi áp suất trong vòng sơ cấp 105 kG/cm^2 thì bình sinh hơi số một bị hở. Áp suất vòng sơ cấp giảm xuống đến 40 kG/cm^2 trong vòng 1 phút. Bình sinh hơi số một cũng được ngắt. Sau này, áp suất vòng sơ cấp không tăng lên được quá 58 kG/cm^2. Tổ máy được làm nguội theo sơ đồ bình thường có sử dụng các nhánh số hai, bốn và sáu. Qua chỗ hở của các ГЗЗ và các bình sinh hơi có hỏng hóc, chất tải nhiệt chảy từ vòng sơ cấp vào vòng thứ cấp. Rò rỉ được điều hòa nhờ hệ thống bù bình thường và bù khẩn cấp của vòng sơ cấp. Do ống góp hơi chính được điền đầy chất tải nhiệt và áp suất tăng lên đến 55 kG/cm^2, các van bảo hiểm của bình sinh hơi bị "vỡ ngầm" và phun chất tải nhiệt lên nắp gian máy.

Trong quá trình sự cố, toàn bộ dự trữ dung dịch bor của САОЗ ~ 1200 tấn được bơm chuyển vào vòng thứ cấp qua vòng sơ cấp. Khối lượng đó không đủ để duy trì các thông số trong suốt khoảng thời gian làm nguội, vì vậy nhân viên đã vi phạm quy trình khi áp dụng giải pháp bù nước khử khoáng cho vòng sơ cấp. Nồng

độ cuối cùng của axit boric sau khi làm nguội khoảng 7 – 8 g/kg. Bởi vì sự cố diễn ra vào giai đoạn cuối thời hạn sử dụng và khi không có hỏng hóc trong ОР СУЗ ở АЗ-1, nên độ dưới tới hạn của vùng hoạt khoảng trên 10%.

Quá trình làm nguội nói chung phù hợp với điều kiện bình thường. Sự sụt giảm áp suất lần đầu tiên đến 40 kG/cm^2 là sai phạm nghiêm trọng nhất có liên quan đến quá trình dẫn thoát nhiệt. Trong thời gian đó, có thể đã sôi chất tải nhiệt ở những dòng nào đó trong vùng hoạt, và có thể, bọt hơi đã hình thành dưới nắp lò phản ứng, nhưng việc giảm nhiệt độ do bù khẩn cấp nước lạnh đã nhanh chóng chuyển nhiệt độ của vòng sơ cấp thành nhiệt độ thuộc vùng pha của nước. Đã không nhận ra những hư hại của các BNL vượt quá các giới hạn vận hành. Hoạt độ trung bình của chất tải nhiệt đã được bơm chuyển vào vòng thứ cấp, ở mức 10^{-7} – 10^{-8} Ci/lít, vì vậy những hậu quả phóng xạ nghiêm trọng đã không được lưu ý. Phần lớn chất tải nhiệt sau này đã được bơm ra ngoài.

Như đã xác định, nguyên nhân chủ yếu của việc đứt các vít cấy và hư hại lỗ cấy vít là:

xiết chúng quá căng khi làm kín các ống góp;

sử dụng mỡ sulfit molipden, do nó tương tác với hơi nước tạo thành axit sulfuric trong các lỗ cấy vít;

sai phạm chế độ hóa học của nước vòng thứ cấp, do có thể tích tụ clo khi nước rơi vào các vít cấy.

Nhờ sửa chữa tương đối nhanh, khả năng hoạt động của tổ máy được phục hồi. Mọi khiếm khuyết có liên quan đến vận hành bình sinh hơi sau này đều được tính đến.

Tuy nhiên, trong phân tích các hậu quả của sự cố chưa có sự quan tâm đầy đủ đến quá trình làm nguội. Như đã nói, khi làm nguội, đã sử dụng toàn bộ dự trữ dung dịch bor của САО3 và thêm nước khử khoáng sạch để bù. Khối lượng bù tổng cộng khó có thể tính chính xác, nhưng rõ ràng là trên 1500 tấn. Việc tính toán sự thay đổi các thông số vật lý-nhiệt trong trường hợp hở một ống góp của bình sinh hơi khi ngăn chặn rò rỉ ở van ngắt hãm tác động nhanh, được thực hiện theo chương trình RELAP-5 cho thấy, khi các hệ thống an toàn hoạt động theo thiết kế, chỉ có ~ 180 tấn chất tải nhiệt chảy vào ống góp hơi chính, trong đó ~ 130 tấn phun ra ngoài qua các van bảo hiểm của các bình sinh hơi. Khi so sánh các kết quả tính toán với thực tế, có thể đi đến kết luận rằng, ~ 1000 tấn chất tải nhiệt đã chảy

từ vòng sơ cấp vào vòng thứ cấp do không có sự chuẩn bị – trong hướng dẫn khắc phục sự cố không có mô tả các tác động của nhân viên khi có các tình huống khẩn cấp tương tự. Rò rỉ không được ngăn chặn trong ống góp hơi chính sau khi áp suất vòng sơ cấp giảm xuống đến 50 kG/cm^2.

Rõ ràng, trong trường hợp các sự cố tương tự ở WWER-1000, đặc biệt là thiết kế B-320, các tác động của nhân viên cần phải chính xác hơn nhiều, bởi vì:

không có các van khoá chính;

dự trữ dung dịch bor của CAO3 khoảng ~ 600 tấn;

ở mức độ lớn hơn so với WWER-440, các đặc tính vật lý-nơtron hạn chế khả năng sử dụng nước khử khoáng sạch để bù, trong những trường hợp tối cần thiết.

Vỡ màn chắn nhiệt lò phản ứng ở tổ máy số 1 NMĐHN Novovoronhet. Đây là tổ máy đầu tiên trong loạt tổ máy sử dụng WWER. Nó được đưa vào hoạt động năm 1964. Các thông số cơ bản của tổ máy như sau: N_T = 760 MWt, $N_{эл}$ = 210 MWe, $T_{ср.1к} = 265^0$C, $P_{1к}$ = 100 kG/cm^2.

Vòng sơ cấp của tổ máy có sáu nhánh, mỗi nhánh được trang bị các ГЦН và các bình sinh hơi, có nối КД vào một mạng nóng của một trong số các nhánh, nghĩa là, sơ đồ nhiệt giống như vòng sơ cấp WWER-440. Khác biệt có tính nguyên tắc trong thiết bị lò phản ứng là sự có mặt của màn chắn nhiệt, nó vốn là một ống trụ bằng thép được treo vào vỏ lò phía đối diện vùng hoạt để bảo vệ bổ sung, tránh bức xạ nơtron. Việc tổ chức dòng chất tải nhiệt giống như WWER-440. Trong khe hở giữa vỏ lò và giếng lò, dòng chất tải nhiệt chảy bao quanh tấm chắn. Công suất lò phản ứng chỉ được điều chỉnh bằng các СУЗ cơ khí, vì vậy độ không đồng đều tỏa năng lượng trong vùng hoạt có khả năng là tương đối lớn: $K_q > 2$, $K_v > 3$.

Sự cố xảy ra năm 1969. Đó là sự cố hư hại vùng hoạt nặng nhất trong lịch sử vận hành WWER Nga thiết kế.

Biến cố khởi nguồn của sự cố là vỡ màn chắn nhiệt. Sau khi rơi xuống đáy vỏ lò, màn chắn nhiệt đã làm tăng đáng kể sức cản thủy lực của dòng chất tải nhiệt lạnh trong vùng đáy giếng lò, bởi vì dòng chất tải nhiệt phía dưới vùng hoạt chỉ chảy giữa màn chắn nhiệt và giếng lò, nghĩa là, không phải trong toàn bộ khe hở giếng lò-vỏ lò.

Vùng hoạt đã được vận hành ngày ấy có cả những BNL thử nghiệm, chúng được dự kiến sẽ sử dụng trong WWER-440 sau này. Về kết cấu, nó chỉ khác với các BNL thông thường ở số lượng thanh nhiên liệu: 126 thay vì 90. Tỷ số urani-nước của chúng thấp hơn bình thường một chút, độ làm giàu cao hơn. Điều đó làm cho mức tỏa năng lượng tương đối cao hơn – K_q = 2,2 – 2,4, K_v = 3,5 – 3,4.

Sau khi rơi màn chắn, lò phản ứng đã không được dừng, bởi vì trong thiết kế đã không tính trước việc giảm tải tự động theo mức suy giảm lưu lượng vốn được đo trực tiếp, các thuật toán giảm tải bị giàng buộc với trạng thái ГЦН vốn vẫn đủ khả năng hoạt động. Kết quả là, ở những đoạn có cường độ tỏa năng lượng cao nhất đã phát triển khủng hoảng sôi, những BNL có cường độ tỏa năng lượng cao nhất đã nóng chảy, làm tăng hoạt độ chất tải nhiệt vòng sơ cấp. Ở hoạt độ chất tải nhiệt vòng sơ cấp 0,1 Ci/lít, lò phản ứng đã được dừng.

Sau sự cố, lò phản ứng đã không hoạt động khoảng 2 năm. Vùng hoạt đã được tháo dỡ. Các BNL sau này được khảo sát trong buồng nóng. Những BNL thí nghiệm bị hư hại nghiêm trọng hơn cả, có 12 bó: các BNL trong vùng tỏa năng lượng lớn nhất ở trung tâm vùng hoạt thấy có nóng chảy các thanh nhiên liệu và một phần các ống thùng chứa. Nhưng tất cả đều còn nguyên khối để vận chuyển. Không thấy có hư hại ở các BNL bình thường.

Việc đánh giá mức giảm lưu lượng trong chế độ sự cố có thể được thực hiện trên cơ sở đo mức sụt giảm áp suất ở ГЦН và trong vùng hoạt, nhưng không có các số liệu đánh giá đó. Tuy nhiên, suy theo các mảnh gia cố màn chắn nhiệt được phát hiện ở mạng dưới của các BNL, thấy rằng lưu lượng qua vùng hoạt còn đáng kể.

Theo kết quả khảo sát và kiểm tra độ kín, có tính đến mức độ cháy, hơn 100 BNL đã được nạp lại vào vùng hoạt để tiếp tục vận hành. Không thấy có sự phát thải đáng kể nào của các nuclit phóng xạ ngoài giới hạn của vòng sơ cấp. Các BNL bị hư hại được xếp vào các hộp kín của bể lưu giữ.

Các câu hỏi cho mục “Sai phạm dẫn thoát nhiệt khỏi vùng hoạt”

1. Các chế độ giới hạn kèm theo sai phạm dẫn thoát nhiệt nào, nghĩa là, không dẫn đến hư hại các thanh nhiên liệu quá giới hạn thiết kế, là chế độ thiết kế?
2. Tỏa năng lượng dư là gì? Ảnh hưởng của nó như thế nào?
3. Những hậu quả của việc mất toàn bộ dẫn thoát nhiệt khỏi vùng hoạt như thế nào? Trong khoảng thời gian nào diễn ra nóng chảy vùng hoạt, vỏ lò phản ứng?

4. Việc trùng hợp các yếu tố bất lợi nào là nguyên nhân phá hủy vùng hoạt NMĐHN “Three Mile Island”?
5. Có thể đặc trưng các tác động của nhân viên theo thời gian của sự cố đó như thế nào?
6. Những kinh nghiệm nào được rút ra từ sự cố?
7. Những kết luận nào có thể rút ra từ sự cố ở NMĐHN Rovenski?

Tài liệu tham khảo phần II

1. **Деницов В.П., Драгунов Ю.Г.** Реакторные установки ВВЭР для атомных станций. М., Издат, 2002.
2. **Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д. и др.** Эксплыатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. Атомиздат, 1977.
3. **Jacques Filman**. Elements of nuclear safty. October. 1996.
4. **Бартоломей Г.А., Бат- Г.А., Байдаков В.Д., Алхутов М.С.** Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. Под ред. Г.А. Батя; - М., Энергоиздат, 1982.
5. Комплекс программ КАСКАД. Программа БИПР-7а. Описание алгоритма. Описание применения. Отчет о научно-исследовательской работе РНЦ КИ, инв. N-32/1-52-402 от 28.11.02.

Phần III

ĐẶC ĐIỂM CỦA CÁC QUÁ TRÌNH VẬT LÝ VÀ VẬN HÀNH РБМК-1000

14. THIẾT BỊ РБМК-1000 (THIẾT KẾ ĐẦU)

14.1. Kết cấu kim loại của lò phản ứng và bảo vệ phóng xạ

Sơ đồ kết cấu РБМК-1000 được trình bày trên hình 14.1.

Các kết cấu kim loại là các kết cấu đỡ. Trên đó lắp đặt khối lát grafit và các kênh công nghệ của lò phản ứng. Các kết cấu kim loại có vai trò truyền tải trọng của các bộ phận vùng hoạt lên đế lò phản ứng và đồng thời là hệ thống bảo vệ phóng xạ.

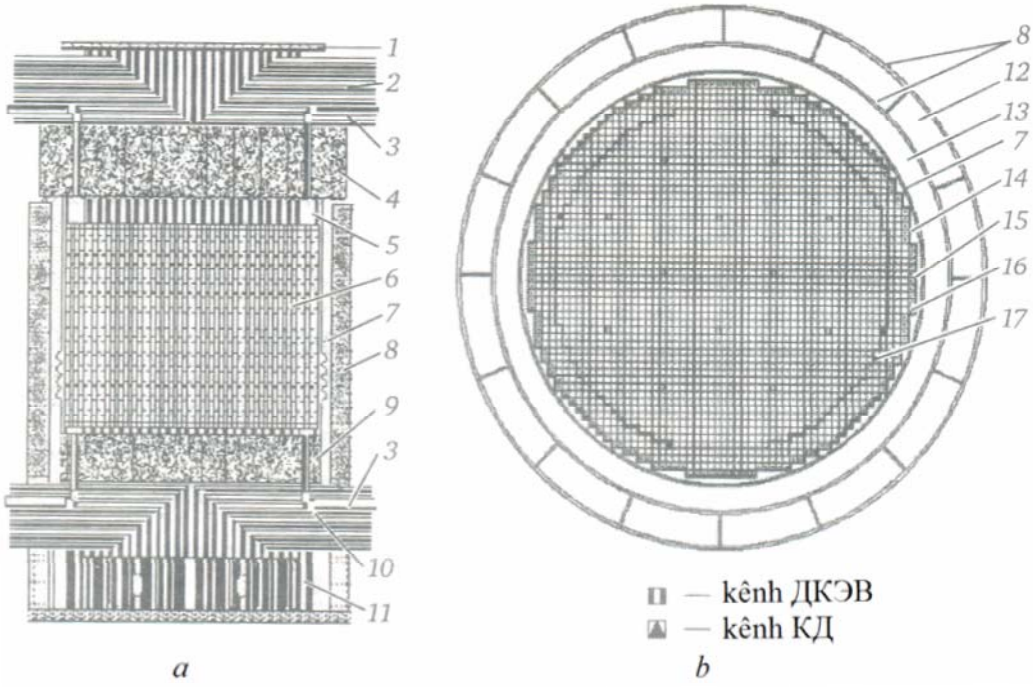
Thùng của hệ thống bảo vệ phóng xạ bên sườn (cơ cấu "Л") được chế tạo ở dạng thùng chứa hình trụ tiết diện dạng vòng tròn, đường kính ngoài 19 m, đường kính trong 16,6 m, bằng thép peclit 10ХСНД dày 30 mm. Bên trong thùng chứa được chia thành 16 khoang đứng, kín, chứa đầy nước, nhiệt từ đó được dẫn thoát nhờ hệ thống làm nguội.

Kết cấu kim loại phía trên (cơ cấu "Е") là ống trụ đường kính 17 m, cao 3 m. Các tấm trên và tấm dưới của ống trụ được chế tạo bằng thép 10ХН1М dày 40 mm và được nối kết với vành bên sườn bằng các mối hàn kín, nối kết với nhau bằng các xương cứng thẳng đứng. Các đường ống dành cho các kênh công nghệ СУЗ được hàn vào các miệng lỗ đã được khoét trên các tấm trên và tấm dưới. Khoảng không gian giữa các ống được điền đầy xecpentin. Kết cấu kim loại được lắp đặt trên 16 bệ đỡ con lăn, vốn gắn chặt trên gờ của thùng bảo vệ phóng xạ dạng vòng tròn bên sườn. Cơ cấu "Е" tiếp nhận tải trọng của các kênh chịu tải, của sàn lát gian trung tâm, của các đường ống dẫn hơi và dẫn nước phía trên của СУЗ.

Kết cấu kim loại phía dưới (cơ cấu "Р") đường kính 14,5 m, cao 2 m, về kết cấu giống như phần phía trên. Kết cấu kim loại giá đỡ (cơ cấu "С"), mà trên đó lắp đặt kết cấu kim loại cơ cấu "Р", là các tấm cao 5,3 m có xương cứng, chéo nhau qua tâm lò phản ứng và vuông góc với nhau.

Vỏ hình trụ (kết cấu kim loại cơ cấu "КЖ") là vòng hàn, đường kính ngoài 14,52 m, cao 9,75 m, được chế tạo bằng thép tấm 10ХН1М dày 16 mm. Vỏ cùng với các

kết cấu kim loại phía trên và phía dưới tạo nên vùng không gian lò phản ứng khép kín.



Hình 14.1. Sơ đồ kết cấu РБМК-1000 :

(*a* – mặt cắt đứng; *b* – mặt cắt ngang qua tâm vùng hoạt): 1 – tấm lát; 2 – các ống ПВК; 3 – các đường ống dẫn thoát СЗРП; 4 – tấm phía trên (cơ cấu "Е"); 5 – các kênh làm nguội bộ phận phản xạ; 6 – khối lát grafit của lò phản ứng; 7 – vành (cơ cấu "КЖ", thép 10ХН1М); 8 – các thùng chứa của hệ thống bảo vệ sinh học dạng nước (cơ cấu "Л", thép 10ХСНД); 9 – tấm phía dưới (cơ cấu "Р"); 10 – các đường ống của tuyến dẫn nước; 11 – kết cấu kim loại giá đỡ (cơ cấu "С"); 12 – nước; 13 – nitơ; 14 – hêli và nitơ; 15 – biên của bộ phận phản xạ; 16 – các kênh làm nguội của bộ phận phản xạ; 17 – biên của vùng hoạt.

Hệ thống bảo vệ phóng xạ ở hướng gian trung tâm bao gồm tấm phản xạ grafit cao 500 mm, các khối bảo vệ bằng thép cao 250 mm, kết cấu kim loại phía trên, điền đầy đá dăm và đá cuội xecpentin tỷ lệ trọng lượng 3 : 2, khối lượng riêng 1,7 tấn/m^3, cũng như sàn bảo vệ phía trên. Phần phủ trung tâm (tấm lát) cao 890 mm điền đầy đá xi măng xespentin sắt bari, phần xung quanh – các kết cấu dạng hộp bằng thép cao 700 mm, điền đầy hỗn hợp vụn gang và đá dăm xecpentin tỷ lệ trọng lượng 6 : 1, khối lượng riêng 3,8 tấn/m^3, và thép tấm dày 100 mm phủ bên trên.

Ở hướng sườn, hệ thống bảo vệ bao gồm tấm phản xạ grafit dày trung bình 880 mm, vỏ lò phản ứng là thùng hình vòng tròn bằng thép, chứa nước, cao 1200 mm (độ dày thành thùng 30 mm), cát có khối lượng riêng không dưới 1,3 tấn/m^3 điền vào không gian lắp giáp giữa thùng và các thành của giếng lò. Giếng lò được xây bằng bê tông thông thường khối lượng riêng 2,2 tấn/m^3 và dày 2000 mm.

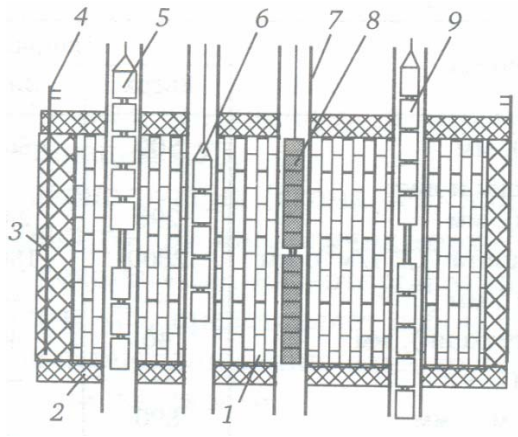
Độ dày và thành phần vật liệu bảo vệ ở các hướng chủ yếu từ vùng hoạt được đưa ra trong bảng 14.1.

Bảng 14.1. Bảo vệ phóng xạ РБМК-1000

Vật liệu	Hướng		
	Lên trên	Xuống dưới	Hướng tâm
Grafit (phản xạ), mm	500	500	880
Thép (các khối bảo vệ và tấm kết cấu kim loại), mm	290	240	46
Điền đầy bằng xecpentin (1,7 tấn/m^3), mm	2800	1800	–
	–	–	1140
Nước (thùng dạng vòng tròn), mm	40	40	30
Thép (kết cấu kim loại), mm	–	–	1300
Cát (1,3 tấn/m^3), mm	890	–	–
Bê tông nặng (4 tấn/m^3), mm	–	–	2000
Bê tông xây dựng (2,2 tấn/m^3), mm			

14.2. Vùng hoạt

Vùng hoạt РБМК-1000 có dạng hình trụ đứng có đường kính tương đương 11,8 m, cao 7 m. Nó được bao quanh bởi bộ phận phản xạ bên sườn dày 1 m và bộ phận phản xạ hai đầu mút dày 0,5 m. Trong vùng hoạt có các thanh nhiên liệu, chất làm chậm, chất tải nhiệt, các kênh công nghệ, các thanh hấp thụ nơtron (các thanh điều khiển) (hình 14.2).



Hình 14.2. Vùng hoạt РБМК-1000:

1 – tấm lát grafit; 2, 3 – tương ứng, bộ phận phản xạ đầu và sườn; 4 – kênh làm nguội bộ phận phản xạ; 5 – thanh hấp thụ rút ngắn; 6 – thanh điều chỉnh tự động; 7 – kênh công nghệ; 8 – BNL; 9 – thanh điều chỉnh bằng tay và bảo vệ khẩn cấp.

Tấm lát grafit là 2488 cột thẳng đứng được tập hợp từ các khối có tiết diện 250 x 250 mm khối lượng riêng 1,65 g/cm^3. Các khối này có lỗ xuyên dọc trục thẳng đứng đường kính 114 mm để bố trí các kênh công nghệ và các kênh kiểm tra và điều khiển. Trong lỗ của bốn hàng cột ngoài biên (bộ phận phản xạ sườn) lắp đặt các thanh grafit. Trong 1693 ô của mạng vuông vùng hoạt bố trí các kênh công nghệ. Phần kênh nằm trong vùng hoạt được chế tạo bằng hợp kim zirconi và là ống có đường kính 88 mm, độ dày thành 4 mm. Để bảo đảm tiếp xúc nhiệt với các khối tấm lát, trên ống lắp những vòng grafit. Bên trong kênh người ta lắp BNL, vốn là hai BNL mỗi bó dài 3,5 m nối tiếp với nhau. Khe hở giữa các BNL đó khoảng 20 mm. BNL gồm 18 thanh nhiên liệu, những thanh này được kẹp chặt nhờ các mạng định vị bằng thép trên ống trung tâm kích thước 15 x 1,25 mm, ống trung tâm được chế tạo bằng hợp kim zirconi. Bên trong có hoặc là thanh chịu tải đường kính 12 mm, hoặc là ống chịu tải kích thước 12 x 2,5 mm bằng hợp kim zirconi. Thanh nhiên liệu là một ống đường kính ngoài 13,5 mm, thành dày 0,9 mm bằng hợp kim zirconi, đựng các viên urani dioxit đường kính 11,5 mm, khối lượng riêng 10,5 g/cm^3, làm giàu 2, 2,4%, không có erbi, cũng như 2,6 và 2,8% ^{235}U chứa erbi tương ứng 0,41 và 0,6%. Khoang trong của thanh nhiên liệu được điền đầy khí argon và hêli trong lúc chế tạo và được hàn kín bằng kỹ thuật hàn chùm electron. Ngay từ đầu, người ta lắp các thanh hấp thụ bổ sung (ДП) trong một số kênh công nghệ.

Chất tải nhiệt chảy từ dưới lên vào các kênh công nghệ. Phần có bảo ôn của kênh, ở đó nước được gia nhiệt đến nhiệt độ bão hòa, có chiều cao gần 2,5 m kể từ đáy

vùng hoạt. Ở phần còn lại, có thể có hiện tượng sôi, hơn nữa hàm lượng hơi của chất tải nhiệt tăng lên theo hướng dòng chảy.

Các kênh của hệ thống kiểm soát và điều khiển được phân bố giống như các kênh công nghệ: trong các lỗ trung tâm của các cột grafit tấm lát. Các thanh СУЗ được chia ra thành các nhóm theo chức năng, bảo đảm điều chỉnh tỏa năng lượng theo hướng xuyên tâm (các thanh РР), tự động điều chỉnh mức công suất trung bình (АР), dừng khẩn cấp phản ứng dây chuyền (АЗ) và điều chỉnh tỏa năng lượng theo chiều cao (УСП). Các thanh của ba nhóm đầu được đưa ra khỏi vùng hoạt theo hướng lên phía trên, các thanh hấp thụ rút ngắn của nhóm thứ tư được đưa ra khỏi vùng hoạt theo hướng xuống phía dưới.

Để làm nguội các kênh và các thanh, sử dụng vòng tuần hoàn nước tự động (vòng tuần hoàn làm nguội СУЗ) kèm theo trạm bơm trao đổi nhiệt. Nước chảy trong các kênh từ trên xuống dưới và chảy bao quanh bề mặt vỏ bọc các thanh hấp thụ, và được gia nhiệt từ 40 đến 60^0C.

Trường nơtron trong toàn bộ vùng hoạt được kiểm soát nhờ hệ thống kiểm soát vật lý phân bố tỏa năng lượng (СФКРЭ). Để thực hiện điều đó, trong 12 kênh phân bố đều trong phần trung tâm vùng hoạt, người ta bố trí theo chiều cao các cảm biến phát xạ bêta, loại bảy ngăn. Để kiểm soát phân bố tỏa năng lượng theo hướng xuyên tâm lò phản ứng, người ta sử dụng các cảm biến bảy ngăn, các cảm biến này được lắp trong các khoang kín của các ống chịu tải trung tâm caset (BNL) của 130 kênh công nghệ.

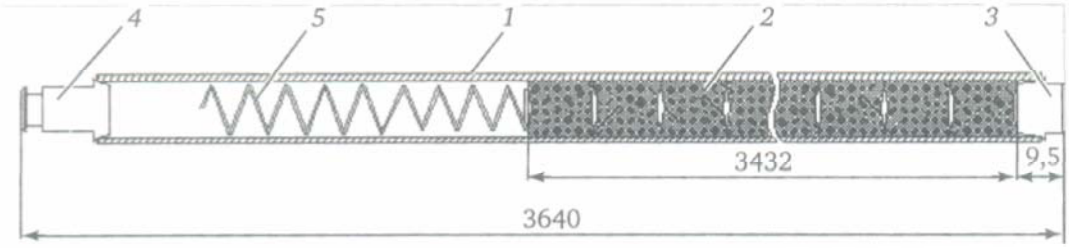
Trong tấm lát lò phản ứng, ở các đầu mối tiếp giáp các khối grafit có 20 lỗ thẳng đứng đường kính 45 mm, trong các lỗ đó lắp các kênh có các cặp nhiệt để kiểm soát nhiệt độ grafit. Để làm nguội bộ phận phản xạ, đã tính trước 156 kênh trong các lỗ trung tâm của dãy cột grafit ngoài biên. Chất làm nguội trong các kênh đó, cũng như trong 12 kênh có các cảm biến kiểm soát tỏa năng lượng theo chiều cao và trong bốn kênh có các buồng phân hạch, là nước của vòng tuần hoàn làm nguội СУЗ.

14.3. Thanh nhiên liệu sử dụng trong РБМК-1000

Thanh nhiên liệu bao gồm vỏ bọc *1*, cột nhiên liệu *2*, nắp *3*, đầu bịt đuôi *4* và chốt định vị dạng lò xo *5* (hình 14.3). Nhiên liệu là các viên urani đã được thiêu kết. Đường kính viên 11,48 mm, cao 15 mm. Để giảm dãn nở nhiệt của cột nhiên liệu, ở các đầu viên có chỗ lõm. Khe hở ngang giữa nhiên liệu và vỏ bọc ở trạng thái

nguội tối thiểu là 0,11 mm, tối đa là 0,195 mm. Các viên nhiên liệu urani-erbi làm giàu 2,6 và 2,8% có lỗ dọc ở giữa đường kính 2mm.

Vỏ bọc thanh nhiên liệu là ống, được chế tạo bằng hợp kim zirconi Э110 (Zr + 1% Nb), đường kính ngoài 13,58 mm, đường kính trong 11,7 mm. Môi trường ban đầu trong thanh nhiên liệu – khí có tỷ phần thể tích hêli không dưới 99% và áp suất không dưới $(5 – 7).10^5$ Pa.



Hình 14.3. Thanh nhiên liệu РБМК-1000

14.4. Bó nhiên liệu

Những đặc tính cơ bản của BNL như sau

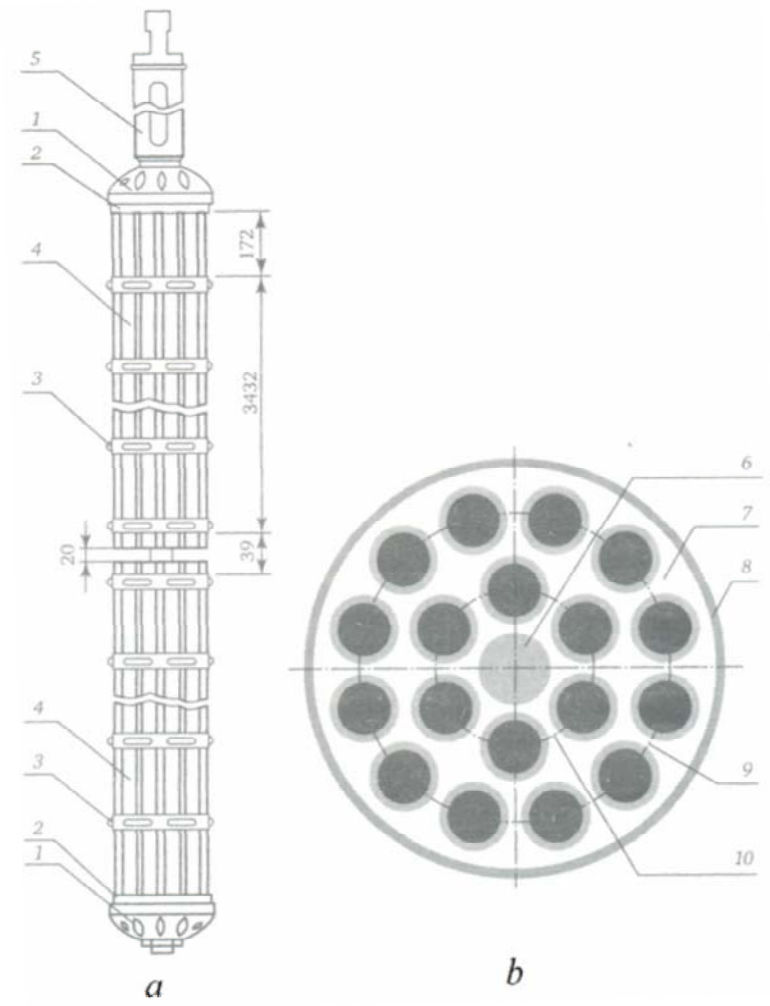
Tỷ phần khối lượng ^{235}U,%	2	2,4	2,6 ± 0,05	2,8 ± 0,05
Khối lượng urani trong BNL, kg	114,7 ± 1,6	114,7 ± 1,6	112,6 ±1,6	112,6 ± 1,6
Tỷ phần khối lượng erbi (tỷ số khối lượng erbi và khối lượng UO_2), %	–	–	0,41	0,6
Độ cháy trung bình của nhiên liệu theo BNL, MW. ngày/kg	22,5	22,5	25	28

BNL bao gồm các phần chính sau đây (hình 14.4, a): hai chùm thanh nhiên liệu (*4*); bộ phận chịu tải (*5*); các chi tiết dẫn hướng hình vòng (*1*); hai mạng hình vòng (*2*); hai mươi mạng định vị (*3*) (hình 14.4). Mỗi chùm bao gồm 18 thanh và khung cốt: thanh trung tâm và ống chịu tải (*6*), nước КМПЦ (*7*), các ống của kênh công nghệ (*8*), thanh ngoài (*9*) và dãy trong (*10*).

Sáu thanh được bố trí đều đặn thành vòng tròn trong, đường kính 32 ± 0,1 mm và 12 thanh – vòng tròn ngoài, đường kính 62 ± 0,1 mm. Các thanh ngoài được dịch

một góc 15^0 so với các thanh trong. Khung cốt của mỗi chùm thanh gồm ống trung tâm kích thước 15 x 1,25 mm, chế tạo bằng hợp kim Э125, một mạng hình vòng và mười mạng định vị. Mạng hình vòng được chế tạo bằng hợp kim Э125, có độ cao 15 mm, đường kính tối đa 79 mm. Khối lượng của mạng hình vòng 150 g. Cách quãng 360 mm trên ống trung tâm, có các mạng định vị được lắp ghép từ các ô riêng biệt, ống bọc trung tâm và đường viền kẹp. Mạng định vị được chế tạo bằng thép 06X18H10T có độ cao 16,3 mm, đường kính tối đa 79 mm. Khối lượng của mạng định vị 50 g. Toàn bộ BNL có 36 thanh nhiên liệu, hai mạng hình vòng và 20 mạng định vị. Khoảng cách giữa phần dưới của các thanh nhiên liệu chùm trên và phần trên các thanh nhiên liệu chùm dưới vào khoảng 20 mm, quãng cách nhiên liệu 39 mm. Hai chùm thanh nhiên liệu trong BNL, chùm nọ trên chùm kia, được lắp hoặc trên một thanh trung tâm (BNL công tác – b. 50), hoặc trên một ống chịu tải (BNL công tác trong buồng gamma – b. 49). Thanh trung tâm được chế tạo bằng hợp kim Э125 và có kích thước 12 x 2,75. Các kênh công nghệ là để bố trí các BNL và các chất hấp thụ bổ sung ở bên trong và để tổ chức dòng chảy chất tải nhiệt. Phần giữa (trong giới hạn vùng hoạt) của kênh công nghệ là một ống, được chế tạo bằng hợp kim zirconi Э125 (Zr + 2,5% Nb), đường kính ngoài 88 mm, đường kính trong 79,5 mm.

Để cải thiện dẫn thoát nhiệt, trên ống của kênh người ta lắp các vòng grafit xẻ cao 20 mm, chúng được xếp khít nhau theo chiều cao kênh. Mặt sườn của mỗi vòng đều có tiếp xúc trực tiếp, xen kẽ hoặc với ống, hoặc với mặt trong của khối grafit. Các vòng này cũng tiếp xúc với nhau ở phần đầu mút. Đường kính của các vòng: vòng ngoài 114,3/92, vòng trong 110,3/88 mm. Khe hở ngang tối thiểu kênh – vòng grafit và kênh – khối grafit là 1,35 mm. Khe hở này được xác định, sao cho không được kẹt kênh trong tấm lát, do co ngót vì nhiệt-phóng xạ trong quá trình hoạt động của lò phản ứng, cũng như do hiện tượng rão vì nhiệt và vì phóng xạ của ống zirconi của kênh.



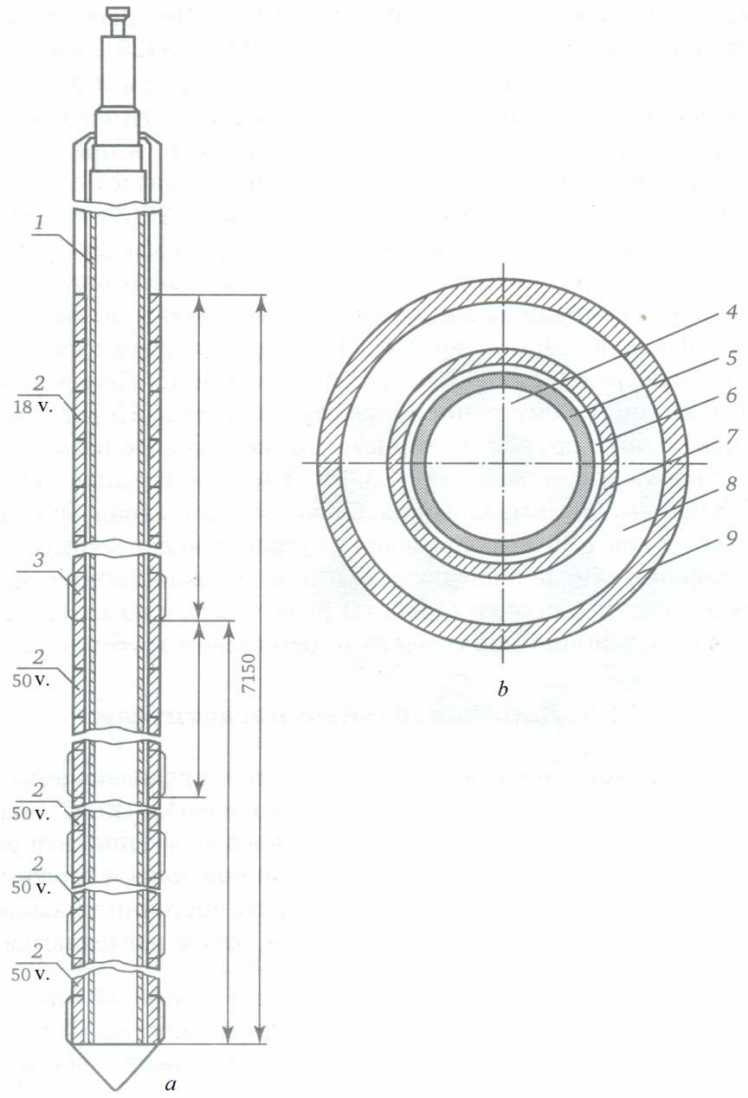
Hình 14.4. Dạng tổng thể (*a*) và mặt cắt ngang BNL (*b*)

14.5. Các chất hấp thụ bổ sung

Các thanh hấp thụ bổ sung là để điều hòa độ phản ứng dư trong giai đoạn đầu hoạt động của lò phản ứng và điều hòa hệ số hơi, dương của độ phản ứng trong trạng thái cân bằng của vùng hoạt. Các thanh ДП sau khi nạp vào các kênh công nghệ sẽ luôn luôn nằm trong vùng hoạt đến khi cháy hết, sau đó được lấy ra.

14.5.1. Thanh hấp thụ bổ sung b.1814.00.000

Thanh hấp thụ bổ sung b.1814.00.000 (sau đây gọi là b.1814) (hình 14.5) bao gồm bộ phận chịu tải *1* có lắp trên đó các ống hấp thụ *2* và các ống kẹp *3*. Bộ phận chịu tải là ống kích thước 50 x 3 mm, được chế tạo bằng thép 08X18H10T. Ống hấp thụ được chế tạo bằng thép bor СБЯ và có kích thước như sau: đường kính ngoài 59 mm, đường kính trong 53 mm, cao 50 mm.

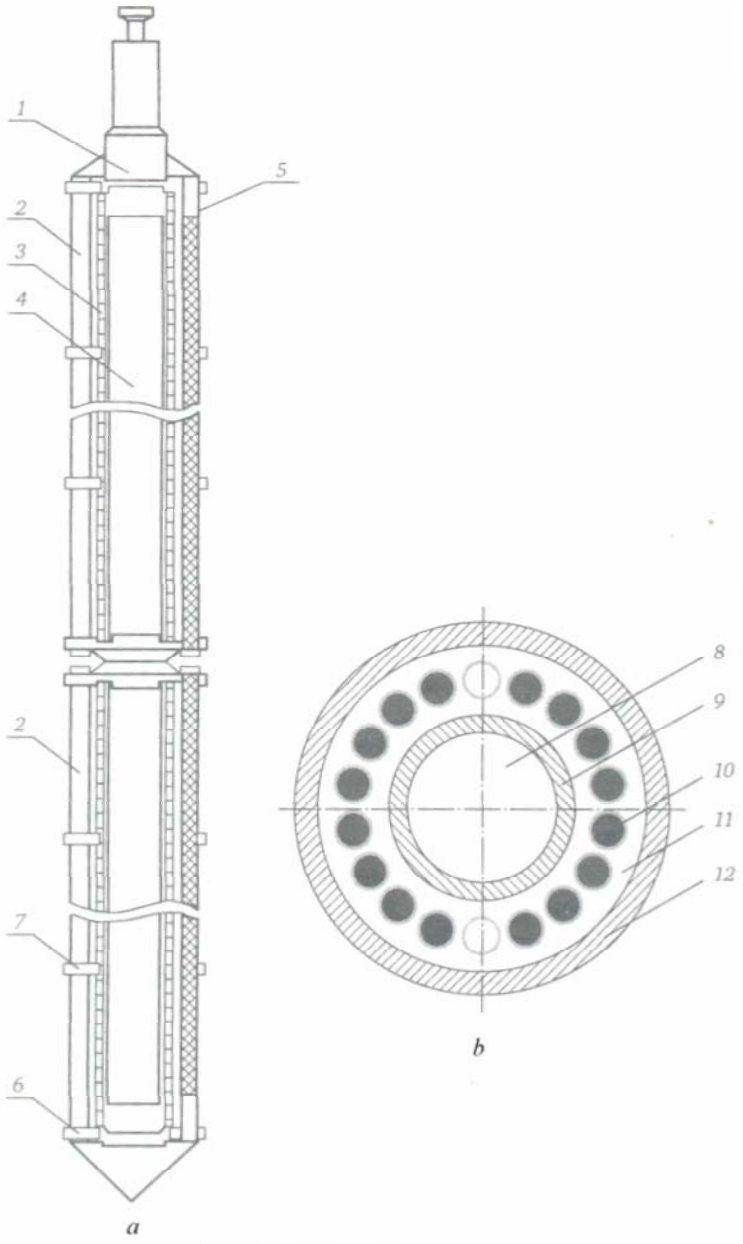


Hình 14.5. Dạng tổng thể (*a*) và mặt cắt ngang ДП b.1814 (*b*)

1– Bộ phận chịu tải; 2 – ống hấp thụ; 3 – các ống kẹp; 4 – nước КМПЦ (bán kính ngoài 22 mm); 5 – ống thép (đường kính ngoài 25 mm); 6 – nước КМПЦ (bán kính ngoài 26,5 mm); 7 – ống hấp thụ (bán kính ngoài 29,5 mm); 8 – nước КМПЦ (bán kính ngoài 39,75 mm); 9 – ống TK (bán kính ngoài 44 mm);

14.5.2. Thanh hấp thụ bổ sung b.2641.00.000

Thanh hấp thụ bổ sung dạng casset b.2641.00.000 (sau đây gọi là b.2641) (hình 14.6) bao gồm hai nhóm hấp thụ *2* và bộ phận chịu tải *1*, cũng thực hiện chức năng của thanh đẩy. Bộ phận chịu tải là ống *3* kích thước 50 x 3 mm, được chế tạo bằng thép 08X18H10T. Bên trong các ống này bố trí các thanh lõi grafit *4* đường kính 41 mm và dài 3400 mm. Vật liệu thanh lõi – grafit khối lượng riêng ≥ 1,6 g/cm^3.



Hình 14.6. Dạng tổng thể (*a*) và mặt cắt ngang ДП b.2641 (*b*)

8 – grafit; 9 – ống thép; 10 – thanh hấp thụ; 11 – nước КМПЦ; 12 – ống ТК

Mỗi nhóm hấp thụ được chế tạo ở dạng caset có các thanh hấp thụ phân bố một hàng và gồm 18 ống kín *5* kích thước 8,2 x 0,6 mm bằng thép 08Х18Н10Т, hai mạng biên *6* và ba mạng định vị *7*. Các trục ống được phân bố đều trên vòng tròn đường kính 66 mm. Hai ống được phân bố theo đường kính thì để không, trong các ống còn lại có 16 thanh hấp thụ vốn được chế tạo bằng bột bor cacbit B_4C theo phương pháp ép rung. Bor có thành phần tự nhiên, trong bột chứa 93% B_4C. Sau

khi ép rung, bột có khối lượng riêng khoảng 1,71 – 1,8 g/cm^3 (68 – 73% lý thuyết: khối lượng riêng bor cacbit đơn tinh thể 2,52 g/cm^3), khi đó tỷ phần khối lượng tổng bor không dưới 73%, cacbon – không quá 4%.

Nguồn dự trữ quy định của thanh hấp thụ bổ sung caset b.2641 vào khoảng 800 ngày hiệu dụng.

14.6. Các thanh СУЗ

Ngày nay trong РБМК-1000 sử dụng năm dạng thanh СУЗ

14.6.1. Các thanh СУЗ b.2091.00.000-01

Khi áp dụng các giải pháp tăng cường độ an toàn, kết cấu thanh b.2091.00.000-01 (sau đây gọi là 2091-01) phức tạp thêm do cải tiến thanh СУЗ РБМК-1000 thế hệ đầu. Độ dài tăng lên đến 6,55 m, khi nó ở trên cùng thì phần hấp thụ nằm ở mặt cắt phía trên của vùng hoạt, còn phần dưới của thanh đẩy – ở mặt cắt phía dưới. Điều đó bảo đảm khả năng đưa độ phản ứng âm vào trong suốt khoảng di chuyển và loại trừ khả năng đưa độ phản ứng dương vào, trong mọi tình huống.

Nhược điểm của các thanh có kết cấu như vậy là có cột nước cao (~ 2,5 m) giữa thanh đẩy và chất hấp thụ trong vùng nối kết kiểu ống lồng. Các thanh có kết cấu này được sử dụng trong các chế độ điều chỉnh bằng tay, điều chỉnh tự động, điều chỉnh và bảo vệ tự động nội vùng, tái điều hòa hệ thống bảo vệ khẩn cấp.

14.6.2. Các thanh СУЗ b.2477.00.000-01

Để khắc phục nhược điểm của các thanh СУЗ b.2091-01, đã nghiên cứu chế tạo kết cấu b.2477-01 (sau đây gọi là b.2477-01) có ống lồng mỏng hơn và kết cấu "hình chuông" của các chất hấp thụ phía dưới, gồm các tấm dysprosi titanat ($TiDy_2O_3$). Các thanh có kết cấu như vậy được sử dụng trong các chế độ điều chỉnh bằng tay, điều chỉnh tự động, điều chỉnh và bảo vệ tự động nội vùng, tái điều hòa hệ thống bảo vệ khẩn cấp.

Tốc độ đưa các thanh СУЗ b.2091-01và b.2477-01 vào vùng hoạt theo tín hiệu từ chìa khóa điều khiển khoảng 17 – 18 s, theo tín tiệu bảo vệ khẩn cấp – 14 s.

14.6.3. Thanh bảo vệ khẩn cấp nhanh (БАЗ) b. 2505.00.000

Thanh БАЗ b. 2505.00.000 (sau đây gọi là b.2505) khác với thanh đã xem xét trước b. 2091-01 ở chỗ, nó không có thanh đẩy và đường kính các thanh hấp thụ lớn hơn. Ngoài ra, các kênh cho các thanh БАЗ có làm nguội dạng màng. Tốc độ

đưa thanh БАЗ vào từ chìa khóa điều khiển khoảng 6 – 7 s, theo tín hiệu БАЗ – 2,5 s. Độ hiệu dụng của thanh БАЗ vào khoảng ~ $2\beta_{эф}$. Khi có các đặc tính như vậy, các thanh БАЗ bảo đảm, cùng các thanh khác, đủ tốc độ đưa độ phản ứng âm vào ($1\beta_{эф}$/s) theo tín hiệu БАЗ, một cách chắc chắn đưa lò phản ứng vào trạng thái dưới tới hạn.

14.6.4. Thanh hấp thụ rút ngắn (УСП) b. 2093.00.000

Trường tỏa năng lượng dọc trục trong РБМК-1000 được hình thành do ảnh hưởng của các đặc điểm kết cấu của nó, trong đó là ảnh hưởng của sự có mặt của:

hơi nước trong phần phía trên của vùng hoạt, hơi nước này dẫn đến việc, các phần ДП trên của các thanh СУЗ đã nhúng hoàn toàn, hiệu quả hơn so với các phần dưới;

dự trữ độ phản ứng trên các thanh РР, АР đã nhúng một phần, dự trữ này được thể hiện ở phần trên của vùng hoạt;

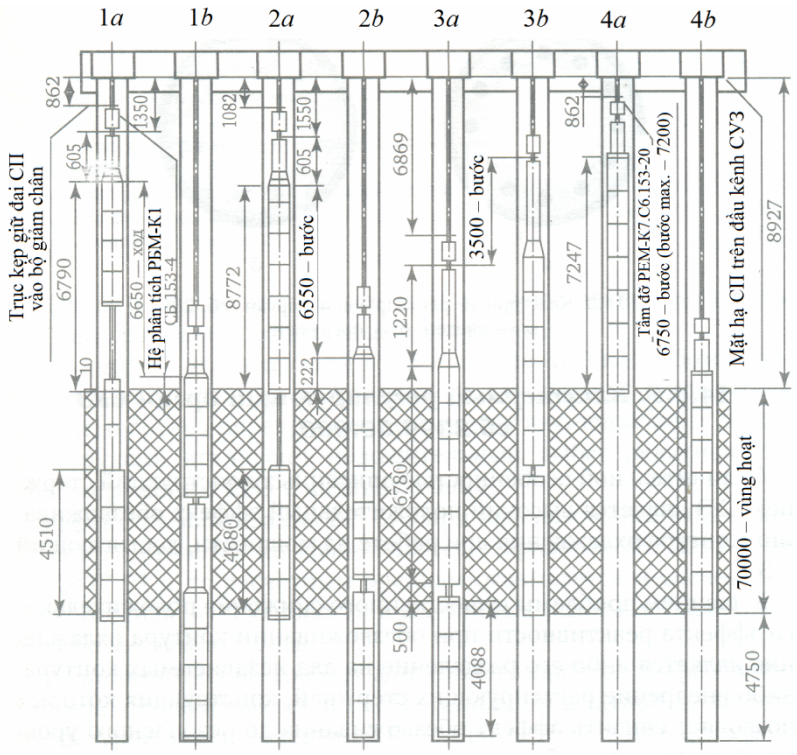
các cột nước giữa chất tải nhiệt và các thanh đẩy, các cột nước này nằm ở đầu mút trên của các thanh СУЗ, vốn hấp thụ nơtron tốt hơn so với các thanh đẩy.

Các yếu tố này dẫn đến việc, sự tỏa năng lượng dịch chuyển xuống phía dưới của vùng hoạt. Để duy trì hình dạng gần với hình dạng đối xứng, đã tính trước đến các thanh hấp thụ được rút ngắn b. 2093.00.000 (sau đây là b.2093). Độ dài phần hấp thụ khoảng 4 m, và chúng được đưa vào vùng hoạt từ phía dưới (hình 14.7). Khi khởi động БАЗ hoặc các АЗ-1, thanh УСП được đưa vào trong khoảng 8 s. Các cơ cấu cấp điện và phanh cơ học tránh cho chúng bị rơi khỏi vùng hoạt khi mất điện.

Các kênh СУЗ là để bố trí các thanh điều chỉnh của hệ thống điều khiển, các buồng phân hạch và các cảm biến kiểm soát tỏa năng lượng theo chiều cao, cũng như để bảo đảm tuần hoàn chất tải nhiệt nhằm dẫn thoát tỏa năng lượng từ các bộ phận thừa hành của hệ thống điều khiển.

Vòng làm nguội các kênh СУЗ là vòng tự động từ vòng tuần hoàn cưỡng bức lặp. Nhiệt độ nước làm nguội của vòng СУЗ khi lò phản ứng hoạt động phát công suất vào khoảng 40 – 55^{0}C ở đầu vào, 50 – 75^{0}C ở đầu ra.

Phần giữa của kênh СУЗ (trong giới hạn vùng hoạt) là một ống bằng hợp kim zirconi Э125 đường kính ngoài 88 mm, thành dày 3 mm.



Hình 14.7. Phân bố các thanh của các cơ cấu thừa hành СУЗ theo chiều cao vùng hoạt РБМК-1000 (*a*, *b* – tương ứng, thanh được đưa ra và nhúng vào):

1, 2 – tương ứng, thanh b.2477-01 và b. 2091-01; 3 – УСП b.2093; 4 – thanh БАЗ b.2505.

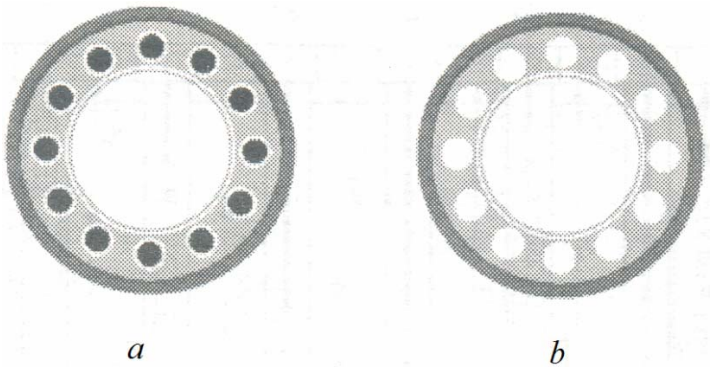
14.6.5. Bộ phận điều chỉnh СУЗ dạng cụm b.2399.00.000

Đặc điểm khác biệt của kết cấu các thanh СУЗ đã mô tả là hiệu ứng dương cao của quá trình cạn nước vòng làm nguội khi lò phản ứng phát công suất, hiệu ứng này đạt đến ~ $3\beta_{эф}$.

Giải quyết vấn đề hiệu ứng độ phản ứng dương suy giảm mạnh khi cạn nước vòng làm nguội hoặc là bằng cách chia nó thành hai vòng độc lập, hoặc là bằng việc đưa các thanh điều chỉnh vào. Kết cấu của các thanh này cho phép giảm hiệu ứng làm cạn nước đến mức an toàn. Nhân đó, đã đề xuất một kết cấu mới của các thanh b.2399.00.000 (sau đây gọi là b.2399) – các bộ phận dạng cụm (KPO) (hình 14.8).

Khác biệt về nguyên tắc của KPO so với các thanh СУЗ bình thường là các bộ phận công tác của cụm này dịch chuyển trong vỏ nhôm, hầu như toàn bộ chiều dài của vỏ này được lắp đặt trong kênh СУЗ. Khi đó, khoang trong của vỏ nhôm là kín đối với nước làm nguội bên ngoài. Vỏ nhôm thay thế phần nước “thừa” trong kênh СУЗ, và cũng là ống định hướng cho bộ phận công tác. Bộ phận công tác gồm các

thanh làm bằng dysprosi titanat ($TiDy_2O_3$), nằm thành vòng tròn trong vỏ nhôm. Điều khiển bộ phận công tác của KPO cũng giống như điều khiển các thanh СУЗ b.2091-01 và b.2477-01. Thời hạn làm việc của KPO được quy định – không dưới 5 năm.



Hình 14.8. Bộ phận điều chỉnh dạng cụm (b.2399): *a* – đưa vào; *b* – nhúng vào

Một số đặc tính của các thanh nói trên như sau:

	b.2091-01	b.2477-01
KPO		
Bước di chuyển, mm	6650	6650
7000		
Độ dài phần hấp thụ, mm	6772	6790
7550		
Mức độ chất hấp thụ trùm phủ chiều cao vùng hoạt, %	93,6	95
100		
Lượng nước trong kênh khi chất hấp thụ được đưa ra ngoài, lít	16	8
3		
Sự thay đổi độ phản ứng khi cạn nước KO СУЗ (số liệu tính toán), $\beta_{эф}$	4 – 4,5	2 – 2,5
< 1		
Thời gian đưa vào khẩn cấp, s	14	14
≤ 7		

Như vậy, có thể nhận thấy những ưu điểm sau dây của KPO so với các thanh bình thường:

lượng nước làm nguội trong kênh KPO, ở mọi mức theo chiều cao, là không đổi, còn chất hấp thụ đồng nhất của bộ phận công tác trùm phủ toàn bộ chiều cao vùng hoạt. Kết cấu như vậy loại trừ được quán tính dương của độ phản ứng khi nhúng KPO vào vùng hoạt;

hiệu ứng cạn nước KO СУЗ khi sử dụng KPO giảm đi nhiều so với các thanh b.2091-01 và b.2477-01 và theo tính toán thì dưới $1\beta_{эф}$;

độ hiệu dụng theo tốc độ trong các chế độ khẩn cấp tăng lên hơn hai lần.

Việc lắp đặt KPO không yêu cầu dừng lò phản ứng lâu, bởi vì nó được thực hiện theo lịch trình chung về thay thế các thanh СУЗ. Ngoài ra, trong đó sử dụng cơ cấu trợ dẫn chung của СУЗ b.151.

15. CÁC PHƯƠNG TIỆN ĐIỀU KHIỂN

15.1. Kiểm soát và điều chỉnh sự phân bố tỏa năng lượng trong vùng hoạt

РБМК có các đặc điểm vật lý và kết cấu làm cho nhiệm vụ kiểm soát và điều chỉnh tỏa năng lượng trở nên phức tạp và rất quan trọng. Thuộc các đặc điểm đó, trước hết là:

tính phức tạp của vi cấu trúc phân bố tỏa năng lượng, là do một số lượng lớn các ДП trong giai đoạn đầu vận hành, còn trong chế độ đã được xác lập – là do các BNL đã cháy và chưa sử dụng được bố trí theo hàng;

độ không ổn định phân bố tỏa năng lượng, vốn là thuộc tính của các lò phản ứng có kích thước vật lý lớn;

nhiều điểm kiểm soát, nhiều thông số được điều chỉnh và nhiều thanh điều chỉnh, đòi hỏi nhân viên vận hành tập trung chú ý.

15.1.1. Những tiên đề công nghệ kiểm soát gián đoạn sự phân bố

Việc lắp đặt các detector nơtron hoặc bức xạ gamma bên trong lò vào từng kênh công nghệ có liên quan đến việc đưa vào lò phản ứng một số lượng lớn các vật liệu hấp thụ, làm xấu đi các đặc tính vật lý của vùng hoạt. Vì vậy trong thiết kế РБМК đã áp dụng phương pháp kiểm soát gián đoạn quá trình tỏa năng lượng trên cơ sở đo các đại lượng đặc trưng cho sự phân bố của nó trong các kênh riêng biệt, kèm theo phép nội suy và phép ngoại suy các số liệu thu được trên các kênh không được trang bị các cảm biến. Khi chọn số lượng và vị trí lắp đặt các detector bên trong lò đã tính đến việc, do các đặc tính lấy nhiệt của nước sôi mà công suất giới

hạn cho phép của BNL ít phụ thuộc vào sự phân bố tỏa năng lượng tương đối theo chiều cao của kênh (đến tận các hệ số không đồng đều dọc trục 1,7 – 2) và công suất này được xác định chủ yếu bằng công suất toàn phần của BNL. Vì vậy, việc kiểm soát phân bố phương vị xuyên tâm là cơ sở của việc kiểm soát nội vùng trong РБМК. Các detector kiểm soát dọc trục có nhiệm vụ chủ yếu là kiểm soát độ ổn định và hệ số không đồng đều phân bố tỏa năng lượng dọc trục để ngăn ngừa khả năng vượt quá công suất tuyến tính giới hạn được phép của BNL.

Để xử lý các kết quả đo gián đoạn tỏa năng lượng trong hệ thống kiểm soát trung tâm "Scala" và tính toán công suất từng BNL, đã chọn phương pháp tính toán-thực nghiệm, bảo đảm độ chính xác cao nhất và độ tin cậy kiểm soát phân bố. Phương pháp này tính trước việc sử dụng đồng thời thông tin đến từ các detector bên trong lò và các kết quả tính toán vật lý. Khi cự ly mạng của các detector được chọn trong РБМК là ~ 1m, tương ứng với 130 detector đặt theo chiều xuyên tâm, sai số bình phương trung bình của kiểm soát gián đoạn các BNL xa detector nhất, vào khoảng 3,5%, sai số đó nhỏ hơn 3 – 4 lần so với mức có thể dẫn đến làm xấu đáng kể sai số tổng, vốn dùng để xác định hệ số dự trữ trước khi đạt công suất tới hạn của BNL.

Việc chọn vị trí lắp đặt các detector kiểm soát dọc trục xuất phát từ các yêu cầu kiểm soát độ ổn định của tính cân đối phương vị-dọc trục ban đầu, tính dự phòng (cho khả năng hỏng hóc detector) và tính đối xứng.

15.1.2. Cấu trúc kiểm soát và điều chỉnh phân bố tỏa năng lượng

Trong thiết kế ban đầu РБМК, các chức năng kiểm soát và điều chỉnh được bảo đảm bằng các hệ thống thiết kế sau đây:

hệ thống điều khiển và bảo vệ lò phản ứng – kiểm soát công suất lò phản ứng trong mọi chế độ hoạt động của nó, chu kỳ tăng công suất trong chế độ khởi động ở mức công suất nhỏ, sự phân bố tỏa năng lượng tương đối ở vùng biên lò phản ứng theo các tín hiệu của các buồng ion hóa bên sườn, bảo đảm việc điều chỉnh bằng tay sự phân bố tỏa năng lượng toàn thể tích lò phản ứng và độ phản ứng để điều hòa các hiệu ứng cháy, nhiễm độc,…, tự động duy trì công suất và thực hiện việc bảo vệ khẩn cấp lò phản ứng theo các tín hiệu của các buồng ion hóa bên sườn, kể cả chức năng của các vi hệ thống của hệ thống điều chỉnh tự động nội vùng và hệ thống bảo vệ khẩn cấp nội vùng;

hệ thống kiểm soát vật lý quá trình tỏa năng lượng theo chiều hướng tâm của lò phản ứng СФКРЭ (р) – kiểm soát công suất 130 BNL vốn phân bố đều đặn trong lò phản ứng, và truyền các tín hiệu của các detector kiểm soát tỏa năng lượng ДКЭ (р) vào hệ thống “Skala”;

hệ thống “Skala”, nhờ chương trình ПРИЗМА, tính toán công suất của tất cả các BNL theo các tín hiệu СФКРЭ (р), các hệ số dự trữ trước khi đạt công suất giới hạn được phép của các BNL, kèm theo việc cung cấp các tín hiệu trên bảng nhắc việc cho nhân viên vận hành về mức giảm không được phép, các mức giới hạn được phép của các tín hiệu (mức đặt) cho ДКЭ (р) và ДКЭ (в), lưu lượng nước được khuyến nghị trong các kênh công nghệ, nhiệt độ tối đa của grafit, các hệ số không đồng đều tỏa năng lượng,…

Do kết quả của việc hiện đại hóa đã tiến hành, hệ thống kiểm soát và điều chỉnh đã trải qua những thay đổi lớn. Thay vì các cơ cấu đã lạc hậu và các СУЗ đã lỗi thời, các РБМК-1000 được trang bị những hệ thống đồng bộ kiểm soát điều khiển và bảo vệ, được hiện đại hóa (КСКУЗ) [2]. Theo những yêu cầu hiện đại, trong КСКУЗ đã có hai hệ thống dừng lò độc lập – hệ thống bảo vệ khẩn cấp và hệ thống giảm nhanh công suất (БСМ). Mỗi hệ thống trong số đó đều có một bộ các cơ cấu thừa hành và các thanh hấp thụ khác biệt về kết cấu. Hệ thống bảo vệ khẩn cấp, mà số thanh hấp thụ của nó tăng từ 24 (từ 21 đối với РБМК-1000 thế hệ đầu) lên 33, thực hiện chức năng bảo vệ khẩn cấp, hệ thống giảm nhanh công suất (158 thanh của thế hệ đầu, 190 thanh của số còn lại) – bảo vệ trước và dừng lò khi làm việc bình thường. Đã tính trước hai hệ thiết bị điều tiết độc lập của hệ thống bảo vệ khẩn cấp, điều khiển, kiểm soát và biến đổi thông tin từ các cảm biến và xử lý logic toàn bộ tập hợp thông tin theo các thuật toán đã cho.

Hệ thứ nhất dựa trên cơ sở kỹ thuật tương tự, hệ thứ hai – kỹ thuật số. Mỗi hệ có một bộ cảm biến bên trong lò của riêng mình (90 cảm biến xuyên tâm (ВРД-Р) và 30 cảm biến theo chiều cao (ВРД-В) trong hệ thứ nhất, 92 cảm biến xuyên tâm và 36 cảm biến theo chiều cao trong hệ thứ hai) và một bộ cảm biến ngoài lò (12 buồng ion hóa trong hệ thứ nhất, 4 buồng dải rộng ba khoang trong hệ thứ hai) để kiểm soát các dòng nơtron và các cảm biến kiểm soát 40 thông số công nghệ РУ – áp suất, lưu lượng, nhiệt độ và mức chất tải nhiệt, nhiệt độ các bộ phận kết cấu và các buồng, dòng điện của các động cơ điện ГЦН. Các hệ thống dừng lò được kích hoạt bằng cả hai hệ thiết bị điều tiết. Các tín hiệu bảo vệ được tạo ra trên cơ sở logic tổ hợp thứ bậc theo nguyên tắc tác động bảo vệ theo chiều sâu, mà trình tự của chúng tính trước đến các lệnh cấm và lệnh phong tỏa, đến việc giảm công suất cưỡng bức, việc dừng lò phản ứng bằng hệ thống БСМ và việc dừng khẩn cấp.

Các mức đặt kích hoạt các tác động bảo vệ khác nhau được hình thành tùy thuộc vào lượng tín hiệu và tổ hợp các tín hiệu của các cảm biến từ các nhóm độc lập. Việc bố trí thiết bị và các đường ống bảo đảm tính độc lập của thiết bị điều tiết của cả hai hệ, bảo đảm tính phụ thuộc của thiết bị có liên quan đến việc thực hiện chức năng của cả hai hệ thống dừng lò.

Trong các điều kiện vận hành bình thường thì cả hai hệ đều hoạt động, nhưng đã tính trước việc ngừng hoạt động của một hệ bất kỳ, khi đó hệ còn hoạt động sẽ bảo đảm việc khởi động các hệ thống dừng lò. Như vậy, khả năng thực hiện mọi công đoạn sửa chữa và kiểm tra trong hệ sẽ bảo đảm không ảnh hưởng đến hoạt động của lò phản ứng. Việc ngừng hoạt động cả hai hệ được loại trừ nhờ các phương tiện kỹ thuật. Việc chủ động ngừng hoạt động một hệ trong КСКУЗ sẽ đồng thời làm ngừng hoạt động các hệ tương ứng của thiết bị điều tiết thuộc СКУЗ và thiết bị điều tiết thuộc АЗРТ, khi đó sẽ phong tỏa tác động của thiết bị điều tiết thuộc СКУЗ trong hệ đã ngừng hoạt động lên các thanh, và tác động của thiết bị điều tiết thuộc АЗРТ lên УСБ.

Hư hại bất kỳ bộ phận nào của thiết bị điều tiết, vốn thực hiện chức năng của БСМ hoặc điều khiển, đều không ảnh hưởng đến khả năng thực hiện các chức năng bảo vệ khẩn cấp của thiết bị điều tiết.

Để cải thiện các đặc tính của hệ thống đo đạc-cung cấp thông tin “Skala”, các vi phương tiện môdul cơ sở thế hệ mới đã được nghiên cứu và áp dụng vào sản xuất, lượng thông tin đã được mở rộng, việc trao đổi linh hoạt các thông tin với КСКУЗ theo kênh liên lạc số đã được bảo đảm, mức độ tin cậy và linh hoạt kiểm soát phân bố tỏa năng lượng đã được nâng cao, tổ hợp tính toán vật lý-nơtron đã được mở rộng, ví dụ, việc kiểm soát linh hoạt phân bố tỏa năng lượng ba chiều với chu kỳ 2,5 s (thay vì 5 phút) đã được thực hiện, việc hỗ trợ thông tin cho nhân viên vận hành, đặc biệt trong các chế độ chuyển tiếp, đã được hoàn thiện. Hệ thống mới, có tên “Skala micro”, là mạng tính toán điều khiển nội vùng với bốn mức xử lý thông tin: xử lý sơ bộ thông tin của các cảm biến riêng và của hệ thống tự động nội vùng; xử lý chẩn đoán và xây dựng kho lưu trữ chẩn đoán; xây dựng cơ sở các dữ liệu vận hành; cung cấp thông tin cho nhân viên vận hành.

16. ĐẶC ĐIỂM CỦA CÁC QUÁ TRÌNH VẬT LÝ РБМК-1000

16.1. Grafit, các đặc tính của grafit

Việc grafit được chọn làm chất làm chậm cho lò phản ứng nhiệt là do khả năng làm chậm tốt và tiết diện hấp thụ nhỏ trong vùng nhiệt của nó – 3,8 mб. Chất làm

chậm được coi là càng tốt khi nó có khả năng làm chậm các nơtron nhanh đến năng lượng nhiệt càng nhanh và nó có tiết diện bắt càng nhỏ. Các tính chất đó phụ thuộc vào khối lượng nguyên tử, khối lượng riêng, các tiết diện tán xạ và tiết diện hấp thụ của nó.

Khi phân tích các tính chất của các chất làm chậm được đưa ra trong bảng 16.1 có thể rút ra kết luận rằng, theo hệ số làm chậm, nghĩa là, tỷ lệ giữa khả năng làm chậm và tiết diện bắt vĩ mô, thì grafit thua nước nặng, nhưng ngang với berili và hơn hẳn nước thường. Nếu như chú ý đến độ dài dịch chuyển của các nơtron, thì so sánh như vậy sẽ không có lợi cho grafit. Do độ dài vận chuyển lớn, các lò phản ứng sử dụng grafit làm chất làm chậm có kích thước lớn.

Grafit công nghiệp mác ГР-280, vốn được sử dụng để lát РБМК-1000, có chứa các tạp chất, do đó tiết diện hấp thụ của nó cao hơn so với ^{12}C khoảng 30%. Tạp chất chủ yếu, vốn quyết định các tính chất hấp thụ của grafit, là ^{10}B có tiết diện hấp thụ trong vùng nhiệt là ~ 3500 б. Trong quá trình vận hành lò phản ứng, các tính chất hấp thụ của grafit thay đổi dưới tác động của hai quá trình có ảnh hưởng ngược nhau – quá trình cháy các tạp chất hấp thụ vốn tồn tại ngay từ đầu trong lớp lát grafit, và quá trình nhiễm bẩn không tránh khỏi của lớp lát khi lò phản ứng hoạt động. Theo tính toán, sau khoảng 360 ngày hiệu dụng của РБМК-1000 phát công suất thì grafit lò phản ứng sẽ cháy hết các tạp chất và phục hồi được các tính chất vốn là thuộc tính của ^{12}C. Quá trình nhiễm bẩn lớp lát diễn ra do lắng đọng các hợp chất khác nhau và tích tụ đến mức có ảnh hưởng rõ rệt đến các tính chất hấp thụ của grafit trong quá trình vận hành lâu dài.

Độ ẩm của lớp lát grafit đóng góp một phần nhất định vào tiết diện hấp thụ. Như đã biết, grafit là vật liệu hút ẩm, và hàm lượng ẩm phụ thuộc vào các điều kiện bên ngoài. Qua nhiều lần đo độ ẩm grafit khẳng định rằng, tỷ phần khối lượng hydro trong lớp lát khoảng $(50 – 100).10^{-6}$. Sự có mặt lượng hydro như vậy có thể dẫn đến gia tăng khả năng làm chậm của grafit $\xi\Sigma_s$ vào khoảng 3%. Khi nâng nhiệt lò phản ứng trong thời gian khởi động và tiếp tục vận hành, hơi ẩm sẽ bốc hơi, tuy nhiên trong quá trình dừng lò, đặc biệt là khi dừng lâu, grafit lại hấp thụ hơi ẩm trở lại.

Một điểm đặc biệt nữa của grafit là sự tích tụ nội năng khi bức xạ. Khi các nơtron nhanh va chạm với các nguyên tử cacbon, một phần năng lượng của các nơtron trễ sẽ tỏa ra ở dạng nhiệt, một phần khác sẽ gây ra biến dạng mạng tinh thể kèm theo tích tụ nội năng.

Bảng 16.1. Các đặc tính của các chất làm chậm

Chất làm chậm	Số nguyên tử	Khối lượng riêng, g/cm^3	σ_a, мб	σ_s, б	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a$	L, cm	t, cm^2
Grafit: sạch	12	2,2	3,0	4,8	250	42	250
lò phản ứng	12	1,65	3,8	4,8	205	52	350
Berili	9	1,84	6,7	6,2	190	24	90
Nước nặng (D_2O)	20	1,1	0,6	4	4580	147	120
Nước (H_2O)	18	1,0	330	21	70	2,7	27

Ghi chú. σ_a, σ_s – tương ứng, tiết diện hấp thụ và tán xạ nơtron trung bình; $\xi\Sigma_s/\Sigma_a$ – hệ số làm chậm; L – độ dài khuếch tán; τ – bình phương độ dài làm chậm, hoặc tăng trưởng nơtron.

Năng lượng đó được gọi là năng lượng Wigner. Đối với các lò phản ứng năng lượng cao, hiệu ứng này không lớn, bởi vì diễn ra quá trình tiêu giải liên tục các khuyết tật do phóng xạ và quá trình thoát phần lớn năng lượng tích tụ. Tuy nhiên, trong grafit của các lò phản ứng nghiên cứu và lò phản ứng năng lượng thấp có thể tích lũy một lượng lớn năng lượng tiềm tàng. Năng lượng này có thể được giải phóng theo con đường nung nóng grafit đã bức xạ đến nhiệt độ cao hơn đáng kể so với nhiệt độ bức xạ. Năm 1952 đã xảy ra vụ phun bắn năng lượng Wigner tự phát trong thời gian dừng tổ máy số 1 NMĐHN “Wildscale Pile” (Anh), việc đó đã đòi hỏi bắt đầu chương trình xả thường xuyên năng lượng này. Sau 5 năm, ở tổ máy này, trong thời gian xả năng lượng theo kế hoạch, đã xảy ra một trong những sự cố trầm trọng nhất của kỷ nguyên hạt nhân. Vùng hoạt lò phản ứng đã quá nhiệt tới mức có vụ cháy (nhiệt độ đạt đến 1200^{0}C), kết quả là đã hư hại gần một phần tư vùng hoạt, một vùng lãnh thổ rộng lớn của Anh và Châu Âu bị nhiễm bẩn phun thải phóng xạ. Cho đến nay việc tháo dỡ tổ máy này vẫn chưa hoàn thành.

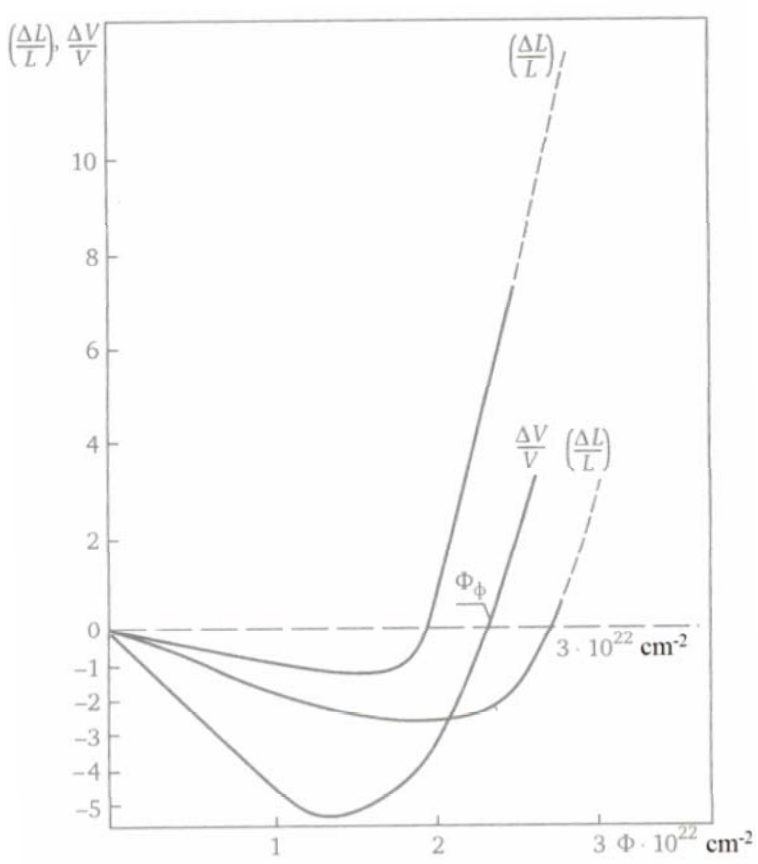
Việc tăng nhiệt độ grafit tương tự có thể xảy ra khi xi măng hóa thải grafit của lò phản ứng được tháo dỡ. Khi đó, quá trình đóng rắn xi măng có thể gây tăng nhiệt độ của grafit ở mức đáng kể, vốn có liên quan với hiện tượng giải phóng năng lượng Vigner. Việc tăng nhiệt độ grafit tương tự có thể xảy ra cả ở trạm xử lý grafit.

Vấn đề đặc biệt là tính tương tác của chất làm chậm grafit với các kim loại và môi trường khí, nhất là ở nhiệt độ cao. Ở nhiệt độ cao, grafit tạo ra cacbit với nhiều

kim loại. Trong số các khí, chỉ có hêli là hợp hoàn toàn với grafit. Trong những điều kiện nhất định, không khí, cacbonic và hydro có phản ứng với grafit. Khi nhiệt độ trên 400^0C, grafit bị oxy hóa trong không khí, tạo ra CO và CO_2. Nhiệt dung cháy của grafit khi tạo thành CO_2 bằng 94 kcal/mol. Bởi vì tổng thể tích các lỗ xốp hở trong grafit bình thường chiếm khoảng 20% tổng thể tích các lỗ xốp, nên bên trong các lỗ xốp đó, ở áp suất bình thường, chứa gần 0,15 ml/g khí. Khi nâng đến nhiệt độ cao hoặc dưới tác động của bức xạ, từ grafit sẽ thoát ra CO, CO_2, H_2 và N_2. Các khí này nằm lại trong grafit trong quá trình chế tạo nó. Cacbon tham gia phản ứng với CO_2 khi nhiệt độ vượt quá 375^0C, tuy nhiên, dưới nhiệt độ 425^0C tốc độ phản ứng tăng theo hàm mũ khi tăng nhiệt độ, vì vậy mà việc thổi hỗn hợp khí không có oxy (N_2 hoặc N_2 + He) cho grafit là biện pháp cần thiết để tránh oxy hóa grafit. Sự có mặt của hêli cho phép làm giảm nhiệt độ grafit nhờ độ dẫn nhiệt cao. Khi lò phản ứng hoạt động ở công suất định mức kèm theo việc thổi lớp lát bằng 90% He + 10% N_2, nhiệt độ tối đa của grafit (tại các góc của khối grafit) vào khoảng gần 600^0C, trong trường hợp thổi bằng nitơ nhiệt độ tăng lên 800^0C.

Sự thay đổi hình dạng grafit do phóng xạ (thay đổi kích thước theo chiều dài của các chi tiết grafit khi bức xạ) là một trong những yếu tố quan trọng nhất. Kết quả các nghiên cứu cho thấy, đặc tính thay đổi của các kích thước theo chiều dài của các mẫu grafit tùy thuộc vào thông lượng nơtron, là rất phức tạp, mặc dù nhìn chung, sự thay đổi hình dạng grafit do phóng xạ như sau: lúc đầu là co phóng xạ và tiếp sau là phồng phóng xạ (hình 16.1).

Thông lượng nơtron, mà ở đó thể tích vật liệu trở lại giá trị ban đầu sau khi co và phồng phóng xạ, được lấy làm thước đo mức tới hạn hư hại phóng xạ. Đại lượng này được gọi là thông lượng tới hạn ($\Phi_{кр}$). Trong vùng thông lượng này, các tính chất cơ lý của grafit,



Hình 16.1. Sự phụ thuộc của sự thay đổi các tính chất grafit lò phản ứng mác ГР-20 vào thông lượng nơtron ở nhiệt độ đặc trưng cho lớp lát РБМК-1000 ($T_{обол}$ = 500 – 600^{0}C)

vốn có ý nghĩa đối với các đặc tính vận hành – độ bền (modul đàn hồi) và độ dẫn nhiệt, bị xấu đi đột ngột. Những thay đổi này tiến triển rất nhanh, dẫn đến kết quả là thoái hóa và phá hủy vật liệu. Thông lượng tới hạn phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ bức xạ. Tăng nhiệt độ bức xạ làm dịch chuyển thông lượng tới hạn vào vùng giá trị nhỏ hơn.

Độ bền phóng xạ của grafit cần được hiểu là sự bảo toàn khả năng làm việc của nó ở các điều kiện làm việc trong một khoảng thời gian nhất định. Khi đó cần tính đến toàn bộ các tính chất cơ lý của nó và trên cơ sở đó kết luận về việc, liệu kết cấu grafit có bảo đảm được tuổi thọ của lò phản ứng hay không. Đối với các khối lát grafit của РБМК-1000, thông lượng đó (trung bình cho toàn tổ máy) vào khoảng 1,6.10^{22} cm^{-2}.

Phồng phóng xạ của các khối grafit cùng với phồng phóng xạ hướng tâm của các kênh công nghệ làm khít khe hở giữa chúng và tạo ra ứng suất bổ sung ở điểm tiếp

xúc, dẫn đến biến dạng. Vì vậy, trong tất cả các tổ máy РБМК-1000, để kéo dài tuổi thọ của lớp lát grafit và để tránh hư hại các kênh công nghệ, đã tính trước việc thay chúng sau một thời gian vận hành nhất định. Ở tổ máy số 1 NMĐHN Leningrat đã thay tất cả các kênh công nghệ. Phần lớn các kênh công nghệ cũng đã được thay ở các tổ máy còn lại của NMĐHN này, cũng như ở các tổ máy của NMĐHN Kursk. Để phục hồi khe hở khi thay các kênh, đã tính trước đến việc thiết kế lỗ khuôn chế tạo tấm lát grafit.

Các câu hỏi cho mục
"Grafit, các đặc tính của grafit"

1. Cho biết các đặc tính vật lý-nơtron cơ bản của grafit trong vai trò chất làm chậm nơtron.
2. Đặc điểm tương tác của grafit với các vật liệu lò phản ứng thể hiện như thế nào?

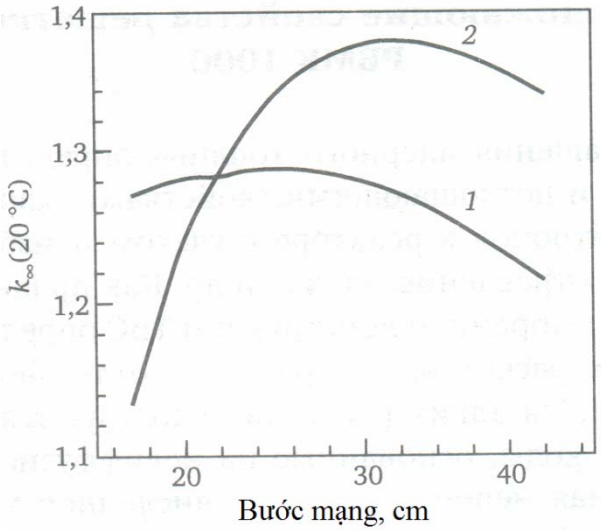
16.2. Tỷ số urani-grafit

Đối với các lò phản ứng dạng kênh sử dụng chất làm chậm grafit, tỷ số urani-grafit, nghĩa là tỷ số giữa số hạt nhân urani và số hạt nhân grafit, là một thông số quan trọng. Tỷ số urani-grafit quyết định mức độ nghiêm ngặt của phổ nơtron trong mạng, mức độ nghiêm ngặt này có ảnh hưởng đến các tính chất tái sinh. Trong giai đoạn đầu xây dựng lò phản ứng thông số đó được sử dụng để xác định cấu trúc mạng, vốn có hệ số tái sinh cao hơn cả, điều này đặc biệt quan trọng đối với các lò phản ứng đầu tiên hoạt động với urani tự nhiên. Trong các lò phản ứng РБМК-1000 hiện đại sử dụng urani làm giàu thấp, không có việc tiết kiệm nơtron nghiêm ngặt như vậy, vì vậy tìm kiếm tỷ số urani-grafit tốt nhất là để tối ưu hóa các thông số có ảnh hưởng đến độ an toàn của lò phản ứng. Đối với РБМК, thông số quan trọng nhất có thể chọn là, ví dụ hiệu ứng độ phản ứng của lò phản ứng khi cạn КМПЦ, nghĩa là khi mất nước làm nguội BNL. Với kết cấu BNL đã chọn và độ làm giàu nhiên liệu, tồn tại bước mạng tối ưu, khi đó hiệu ứng cạn nước gần bằng 0. Mọi sai lệch khỏi bước mạng tối ưu đều tạo ra những vấn đề nhất định đối với an toàn hoặc khi mất nước làm nguội, hoặc khi cấp nước vào các kênh nhiên liệu trong các tình huống khẩn cấp.

Để minh họa, trên hình 16.2 đưa ra sự phụ thuộc của hệ số tái sinh nơtron của ô mạng РБМК-1000 sử dụng nhiên liệu chưa bức xạ làm giàu 2% vào bước mạng có nước và không có nước trong các kênh công nghệ.

Các số liệu đưa ra trên hình 16.2 chứng tỏ rằng, đối với ô mạng có nước, sự phụ thuộc k_∞ vào bước mạng trong dải 20 – 25 cm thì yếu, ngược lại, trong mạng

không có nước thì mạnh. Trong khi đó đáng chú ý là, điểm giao nhau của hai đường cong (hiệu ứng cạn nước bằng 0) ứng với bước mạng ~ 22 cm. Do đó có thể nói rằng, bước mạng được chọn cho РБМК-1000 không phải là tối ưu theo quan điểm hiệu ứng cạn nước. Đó chính là nguyên nhân của việc chọn lượng grafit giảm đi 20% trong lò phản ứng của tổ máy thứ 5 NMĐHN Kursk, điều được thể hiện trong giải pháp dễ chấp nhận hơn cả về công nghệ là xén bớt các góc của các khối grafit.



Hình 16.2. Sự phụ thuộc k_∞ của vào bước mạng có nước (1) và không có nước (2) trong các kênh công nghệ

Các câu hỏi cho mục
"Tỷ số urani-grafit"

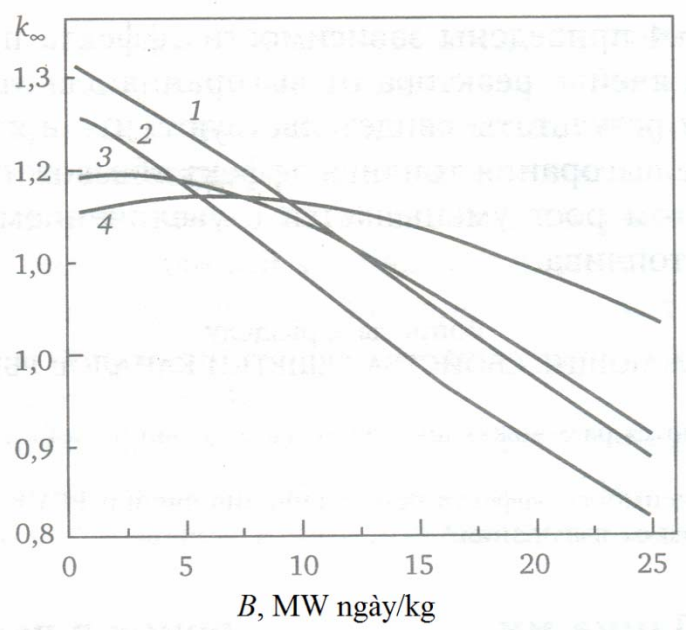
1. Vai trò của tỷ số urani-grafit trong РБМК-1000 là thế nào?
2. Hãy phân tích tại sao hệ số tái sinh hiệu dụng cực đại trong mạng không có nước trong các kênh lại đạt được khi bước mạng lớn hơn so với trong mạng có nước trong các kênh?

16.3. Các tính chất tái sinh của mạng các kênh РБМК-1000

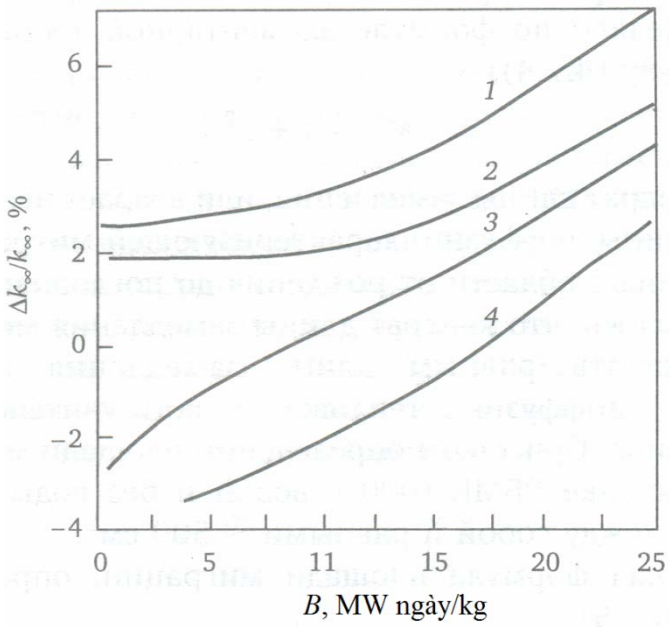
Việc lựa chọn độ làm giàu của nhiên liệu hạt nhân được quyết định bởi các tính chất hấp thụ và tái sinh của nó, đặc trưng cho cân bằng nơtron trong lò phản ứng, có tính đến sự mất mát không tránh khỏi do cháy, nhiễm độc và rò rỉ,…Thông thường, các đặc tính đó đối với kết cấu BNL đã chọn được xác định trên cơ sở các tính toán ô mạng, nghĩa là các tính toán của từng ô grafit riêng biệt có BNL. Để tính toán, người ta sử dụng các bộ mã chính xác dựa trên các phép gần đúng không

khuếch tán, kể cả mô hình hóa số trực tiếp bằng phương pháp Monter-Carlo. Để làm ví dụ, trong bảng 16.2 đưa ra các hệ số tái sinh trong ô mạng của РБМК-1000 đối với nhiên liệu chưa bức xạ, làm giàu đến 2, 2,4%, cũng như nhiên liệu urani-erbi làm giàu 2,6 và 2,8% với hàm lượng erbi 0,41 và 0,6%.

Các tính chất tái sinh của ô mạng РБМК-1000 phụ thuộc vào nhiệt độ nhiên liệu, chất làm chậm (grafit) và chất tải nhiệt (nước hoặc hỗn hợp nước-hơi nước) và giảm đi tùy theo quá trình cháy nhiên liệu do các sản phẩm phân hạch tích tụ trong nhiên liệu hấp thụ. Trên hình 16.3 trình bày sự phụ thuộc của các hệ số tái sinh vào quá trình cháy của chính các dạng nhiên liệu đó ở nhiệt độ làm việc.



Hình 16.3. Sự phụ thuộc của hệ số tái sinh ô mạng РБМК-1000 vào quá trình cháy nhiên liệu làm giàu 2,0 (1), 2,4 (2), 2,6% (3) và 2,8% (4)



Hình 16.4. Sự phụ thuộc của hiệu ứng cạn nước trong ô mạng РБМК-1000 sử dụng nhiên liệu làm giàu 2,0 (1), 2,4 (2), 2,6% (3) và 2,8% (4) vào quá trình cháy

Bảng 16.2. Các hệ số tái sinh trong ô mạng của РБМК-1000 sử dụng nhiên liệu chưa bức xạ, độ làm giàu khác nhau (nhiệt độ nhiên liệu 20^0C)

Nước	Độ làm giàu, %			
	2	2,4	2,6(Er)	2,8 (Er)
Có nước Không có nước	1,290 1,339	1,347 1,388	1,251 1,268	1,222 1,231

Trên hình 16.4 trình bày sự phụ thuộc của hiệu ứng cạn nước hoàn toàn trong ô mạng của lò phản ứng vào quá trình cháy đối với chính các dạng nhiên liệu đó. Các kết quả này chứng tỏ rằng, trong ô mạng РБМК-1000, tùy theo quá trình cháy nhiên liệu, hiệu ứng cạn nước tăng lên, trong khi đó mức tăng lại giảm đi khi tăng độ làm giàu ban đầu của nhiên liệu.

Các câu hỏi cho mục “Các tính chất tái sinh của mạng các kênh РБМК-1000”

1. Các tính chất tái sinh của từng ô mạng riêng biệt РБМК-1000 khi cạn nước thay đổi như thế nào?

2. Sự phụ thuộc của hiệu ứng cạn nước ô mạng РБМК-1000 sử dụng nhiên liệu urani-erbi vào quá trình cháy như thế nào?

16.4. Độ dài dịch chuyển của các nơtron trong mạng РБМК-1000

Độ dài dịch chuyển trong РБМК-1000 là một trong những thông số quan trọng có ảnh hưởng đến các hiệu ứng và các hệ số độ phản ứng.

Trong giai đoạn thiết kế РБМК-1000, bình phương độ dài dịch chuyển được xác định theo công thức lý thuyết cơ bản lò phản ứng (xem công thức (4.7.4))

$$M^2 = \tau + L^2,$$

ở đây, τ – bình phương độ dài làm chậm, hoặc tuổi của các nơtron, L^2 – bình phương độ dài khuếch tán, đặc trưng cho dịch chuyển của các nơtron trong vùng nhiệt từ khi sinh ra đến khi bị hấp thụ. Khi đó giả định rằng, bình phương độ dài làm chậm gần bằng độ dài làm chậm đối với grafit (~ 350 cm^2), quá trình khuếch tán trong vùng nhiệt có tính đến quá trình hấp thụ trong nhiên liệu. Khi định nghĩa như vậy thì các diện tích dịch chuyển nơtron trong ô mạng РБМК-1000 có nước và không có nước là gần bằng nhau và bằng ~ 500 cm^2.

Công thức chính xác hơn của diện tích dịch chuyển, vốn được xác định theo công thức (4.7.5)

$$M^2 = \tau\varphi + (1 - w_f)L^2,$$

ở đây, φ – xác suất tránh bắt cộng hưởng khi làm chậm, w_f – số hạng, tính đến quá trình tái sinh nơtron khi làm chậm, làm thay đổi đáng kể sự biểu hiện về đặc trưng ảnh hưởng của độ dài dịch chuyển đến những thông số an toàn quan trọng đối với РБМК-1000. Thật vậy, định nghĩa chính xác hơn về diện tích dịch chuyển làm giảm đáng kể diện tích dịch chuyển so với biểu thức (4.7.4). Hơn nữa, tỷ lệ giữa độ dài dịch chuyển trong mạng có nước và khi cạn nước giảm xuống đột ngột. Ví dụ, đối với trạng thái lạnh, với nhiên liệu chưa sử dụng, làm giàu 2%, các giá trị đó, tương ứng là khoảng ~ 350 và ~ 460 cm^2.

Ta xét hiện tượng rò rỉ nơtron trong РБМК-1000. Đối với lò phản ứng cao ~ 7 m và bán kính vùng hoạt ~ 7 m có diện tích dịch chuyển ~ 350 cm^2 và phần bổ sung hiệu dụng của bộ phận phản xạ δ ~ 30 cm, rò rỉ

$$B^2M^2 = \left[\left(\frac{2,405}{R+\delta}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H+\delta}\right)^2\right]M^2 \approx 0,013. \qquad (16.4.1)$$

ở đây, B^2 – Laplas hình học toàn phần của lò phản ứng.

Như vậy, rò rỉ nơtron từ lò phản ứng vào khoảng ~ 1,5%.

Để đánh giá vai trò của độ dài dịch chuyển ta xét một ví dụ trực quan. Như đã biết, trong giai đoạn thiết kế, việc đánh giá hiệu ứng cạn nước dựa vào các kết quả thực nghiệm trên các bó tới hạn, đồng nhất, có các kênh, dùng cho РБМК-1000. Ta đánh giá hiệu ứng cạn nước trong bó theo cách như vậy. Để bảo đảm tính xác định, ta xét một bó nhiên liệu thử nghiệm không có bộ phận phản xạ, bao gồm 16 kênh (4 x 4). Khi đánh giá hiệu ứng cạn nước của các bó đồng nhất, gồm các BNL РБМК-1000 với nhiên liệu chưa sử dụng, có thể dùng biểu thức (4.1), sau một số biến đổi không phức tạp biểu thức này có dạng

$$\rho = \frac{\delta k_\infty}{k_\infty} - \frac{k_\infty - 1}{k_\infty}\frac{\delta M^2}{M^2}. \qquad (16.4.2)$$

Từ biểu thức này suy ra , hiệu ứng cạn nước toàn phần được góp vào từ hai thành phần: những thay đổi, vốn liên quan với các tính chất tái sinh của mạng vô cùng và với rò rỉ từ hệ thống, được xác định bởi sự thay đổi diện tích vận chuyển khi cạn nước và bởi mức độ vượt quá 1 của k_∞.

Các thông số của mạng đồng nhất РБМК-1000 đối với nhiên liệu chưa bức xạ được làm giàu 2%, ở nhiệt độ 20^0C như sau:

k_∞ = 1,29, M^2 = 350 cm^2, khi có nước trong các kênh và k_∞ = 1,34, M^2 = 460 cm^2, khi không có nước trong các kênh.

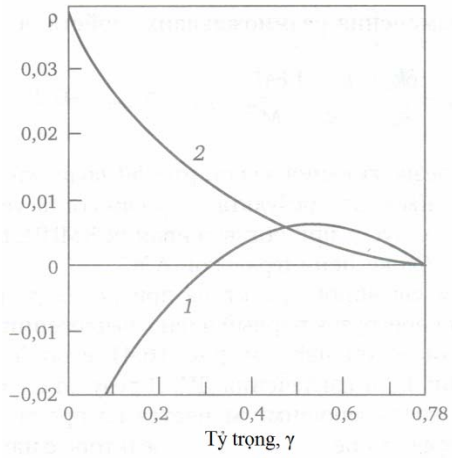
Khi sử dụng các số liệu đó, ta nhận được độ phản ứng do cạn nước các kênh nhiên liệu:

$$\rho = \frac{\delta k_\infty}{k_\infty} - \frac{k_\infty - 1}{k_\infty}\frac{\delta M^2}{M^2} = 0,038 - 0,07 = -0,032 = -3,2\%.$$

Từ đó suy ra, hiệu ứng cạn nước của mạng đồng nhất có nhiên liệu chưa bức xạ là rất âm. Lưu ý rằng, kết quả nhận được tương ứng với sự thay đổi – 3,1 ± 0,4% trong mô hình РБМК thử nghiệm tới hạn hiệu ứng cạn nước hoàn toàn của BNL thương mại đồng nhất РБМК-1000 làm giàu 2%, thực hiện ở РНЦ "Viện Kurchatov". Đó là nguyên do kết luận trong giai đoạn thiết kế về hiệu ứng cạn nước âm của КМПЦ РБМК-1000. Kết quả này cũng đã được đưa vào chương trình BPM, vốn được sử dụng trong các tính toán thiết kế và ở giai đoạn đầu vận

hành các tổ máy РБМК-1000 để đánh giá an toàn. Như đã biết, trong các tính toán thiết kế đã sử dụng sự phụ thuộc của hiệu ứng độ phản ứng vào khối lượng riêng hỗn hợp nước-hơi nước, được trình bày trên hình 16.5 (đường cong *1*). Các tính toán chi tiết, được tiến hành nhờ các chương trình chính xác ngay sau sự cố NMĐHN Checnôbưn, cho thấy, sự phụ thuộc đó mang đặc tính hoàn toàn khác (đường cong *2*). Ngày nay, do đưa nhiên liệu urani-erbi vào vận hành, đặc tính của sự phụ thuộc độ phản ứng vào khối lượng riêng hỗn hợp nước-hơi nước thay đổi đáng kể, ví dụ, theo các tính toán, hiệu ứng cạn nước КМПЦ trong trạng thái làm việc dịch về hướng các giá trị âm (xem mục 18.5.1).

Nguyên nhân các lý giải khác nhau về hiệu ứng cạn nước vòng tuần hoàn КМПЦ là ở việc không đánh giá hết vai trò của rò rỉ. Thật vậy, khi phân tích công thức (16.4.2) có thể rút ra kết luận về phần đóng góp của các thành phần riêng biệt trong hiệu ứng tổng. Hệ số tái sinh vốn được xác định bởi các tính chất tái sinh và hấp thụ của nhiên liệu, tăng lên khoảng 4,9% khi cạn nước. Tuy nhiên, ảnh hưởng của rò rỉ nơtron đối với nhiên liệu chưa bức xạ thừa khả năng điều hòa mức tăng k_∞, kết quả là hiệu ứng tổng là rất âm (– 4%). Cần lưu ý rằng, hiệu ứng điều hòa khá lớn của rò rỉ có liên quan đến, một mặt, việc làm chính xác thêm diện tích vận chuyển nơtron cho ô mạng có nước như đã nói, mặt khác, giá trị lớn của $k_\infty \sim 1{,}3$ đối với nhiên liệu chưa bức xạ.



Hình 16.5. Sự phụ thuộc độ phản ứng vào khối lượng riêng của nước (hỗn hợp nước-hơi nước) trong lò phản ứng РБМК-1000:
1 – tính toán trong thiết kế; 2 – tính toán được làm chính xác sau sự cố NMĐHN Checnôbưn

Ta đánh giá hiệu ứng cạn nước РБМК-1000 của mẻ nhiên liệu khởi động. Trong trường hợp đó, trong công thức (16.4.2) hiệu ứng điều hòa rò rỉ dường như nhỏ hơn nhiều. Cần nhấn mạnh rằng, rò rỉ trong biểu thức (16.4.2) nói chung có liên quan đến các nơtron không bị hấp thụ trong nhiên liệu. Các nơtron đó bị hấp thụ trong các thanh СУЗ, trong các chất hấp thụ bổ sung, trong cột nước,… và chỉ một phần nhỏ chúng (1,5 – 2%) là "rò rỉ" ra khỏi lò phản ứng. Do hấp thụ nơtron trong các thanh СУЗ và ДП nên trong trường hợp này, hiệu (k_∞ – 1) vào khoảng ~ 6%, vì vậy phần đóng góp của số hạng thứ hai trong phương trình (16.4.2) trở nên tương đương với phần đóng góp từ sự thay đổi các tính chất tái sinh của lò phản ứng:

$$\rho = \frac{\delta k_\infty}{k_\infty} - \frac{k_\infty - 1}{k_\infty}\frac{\delta M^2}{M^2} = \rho_{k_\infty} - \rho_{\text{утеч}} = -0,2\%,$$

nghĩa là, hiệu ứng cạn nước đối với mẻ nhiên liệu khởi động là hơi âm. Kết quả này khá phù hợp với các số liệu khởi động vật lý khi cạn nước КМПЦ, ví dụ ở tổ máy số 2 NMĐHN Leningrat.

Đối với lò phản ứng thực, khi chuyển sang chế độ tĩnh của quá trình thay đảo nhiên liệu, số hạng thứ nhất trong biểu thức (16.4.2) tăng lên khi tăng độ cháy nhiên liệu (xem hình 16.4), số hạng thứ hai giảm đi do k_∞ giảm và do việc đưa ДП ra ngoài. Kết quả là tỷ lệ giữa hai thành phần sẽ thay đổi theo hướng ngược lại và hiệu ứng cạn nước tổng trong lò phản ứng sử dụng nhiên liệu làm giàu ban đầu 2% sẽ trở nên dương đáng kể:

$$\rho = \frac{\delta k_\infty}{k_\infty} - \frac{k_\infty - 1}{k_\infty}\frac{\delta M^2}{M^2} = (3,5 - 1,6)10^{-2} = 1,9\%.$$

Như vậy, khi sử dụng các hệ thức đơn giản và dựa vào việc xác định đúng độ dài vận chuyển nơtron có thể nhận được các giá trị hiệu ứng độ phản ứng, kể cả hiệu ứng hơi, vốn khó xác định.

Các câu hỏi cho mục "Độ dài vận chuyển nơtron trong mạng РБМК-1000"

1. Sự khác nhau trong việc xác định diện tích vận chuyển trong lý thuyết cơ bản của các lò phản ứng và trong lý thuyết hiện đại của lò phản ứng không đồng nhất?
2. Tại sao để đánh giá hiệu ứng độ phản ứng đối với quy mô đầy đủ lò phản ứng, ví dụ, khi cạn nước các kênh có BNL, lại không sử dụng trực tiếp các kết quả đo đạc trên các BNL không trên quy mô đầy đủ?

16.5. Cân bằng nơtron. Sử dụng nhiên liệu urani-erbi

Hệ số tái sinh tương đối cao của các kênh nhiên liệu $k_\infty \approx 1{,}3$ và độ hấp thụ nhỏ trong grafit dẫn đến việc để tạo ra tới hạn bằng nhiên liệu chưa bức xạ thì chỉ 18 BNL là đủ. Vì vậy, khi xây dựng lò phản ứng công suất lớn cần "tận dụng" lượng dư nơtron ($k_\infty - 1$), đối với nhiên liệu chưa bức xạ, lượng dư này vào khoảng ~ 30%. Như đã thấy, ~ 1,5% nơtron thất thoát khỏi lò phản ứng, một phần bị hấp thụ trong các bộ phận СУЗ, một phần là để dự trữ linh hoạt cho quá trình cháy và điều khiển. Tuy nhiên còn lại một phần nơtron dư đáng kể cần tận dụng để điều hòa độ phản ứng trong mẻ nhiên liệu khởi động. Trong thiết kế РБМК-1000, với mục đích đó đã sử dụng các chất hấp thụ bổ sung có nhiệm vụ bắt các nơtron dư ở giai đoạn đầu thời hạn sử dụng, các chất hấp thụ này được loại ra khỏi vùng hoạt tùy theo quá trình cháy nhiên liệu. Kết quả là đã tạo ra cấu trúc ban đầu của vùng hoạt РБМК-1000 gồm 77 ô, mỗi ô có 16 kênh (4 x 4), theo chu kỳ. Sự có mặt các chất hấp thụ bổ sung trong vùng hoạt có tác dụng ổn định hệ số hơi của độ phản ứng.

Việc sử dụng có chủ định các nơtron, nghĩa là hấp thụ chúng bởi các chất hấp thụ hữu ích, có thể là tình huống thay thế cho hiện tượng bắt nơtron vô ích trong các chất hấp thụ bổ sung. Có thể sử dụng các bia đặc biệt làm các chất hấp thụ hữu ích như vậy để sản xuất các đồng vị dùng trong công nghiệp và y tế. Thực tế này đối với các lò phản ứng dạng kênh đã được ứng dụng rộng rãi trên thế giới, ví dụ, trong các lò CANDU của Canada. Trong РБМК-1000, khi vận hành thí nghiệm ở NMĐHN Leningrat, người ta đã dùng các chất hấp thụ bổ sung bằng coban để sản xuất ^{60}Co. Tuy nhiên, chỉ có thể sử dụng các chất hấp thụ nào đó sau khi đã đánh giá kỹ ảnh hưởng của chúng đến trạng thái an toàn hạt nhân và phóng xạ khi vận hành tổ máy.

Việc sử dụng chất hấp thụ cháy trong nhiên liệu là giải pháp quan trọng nhất để điều hòa độ phản ứng dư ban đầu trong РБМК-1000. Với mục đích đó, đã đề xuất sử dụng erbi, hàm lượng của nó được quyết định bởi các điều kiện thay thế dần dần nhiên liệu urani bình thường bằng nhiên liệu urani-erbi và duy trì trong các giới hạn đã định của đặc tính vùng hoạt. Khi đó sẽ đạt được mức an toàn cao hơn. Khi có mặt các chất hấp thụ cháy sẽ xuất hiện khả năng rút dần các chất hấp thụ bổ sung, điều đó làm tăng khả năng bình ổn phân bố tỏa năng lượng trong vùng hoạt, càng làm tăng độ an toàn, vì khi đó công suất tối đa, công suất theo chiều dài và nhiệt độ BNL đều giảm xuống.

Chất hấp thụ cháy cần đáp ứng các yêu cầu sau đây, nếu không thì việc sử dụng nó sẽ không hiệu quả:

tác động lên hệ số hơi không được yếu hơn tác động của các chất hấp thụ bổ sung;

cần bảo đảm khả năng tăng độ cháy khi giữ nguyên các giới hạn vận hành (về công suất, nhiệt độ, …);

cần có tính công nghệ, nghĩa là, không làm phức tạp đáng kể và không làm tăng chi phí cho quá trình chế tạo nhiên liệu;

cần đạt được hiệu quả kinh tế rõ rệt khi sử dụng.

Đối với РБМК-1000, mối quan tâm lớn nhất là các chất hấp thụ cộng hưởng. Các chất hấp thụ truyền thống – bor và gadolini không thuộc loại này. Cũng có thể nói như vậy về disprosi. Phần lớn các chất hấp thụ này đều có cộng hưởng trong tiết diện hấp thụ ở vùng năng lượng cao hơn năng lượng nhiệt. Những tính toán khảo sát cho thấy, erbi là chất hấp thụ tốt nhất theo quan điểm tác động lên hệ số hơi và hiệu ứng cạn nước. Erbi tự nhiên có bốn đồng vị. Hàm lượng, tiết diện hấp thụ và tích phân cộng hưởng hiệu dụng của chúng được đưa ra trong bảng 16.3.

Đồng vị chính ^{167}Er có cộng hưởng mạnh ở 0,47 eV, nó đóng vai trò chính trong các quá trình hấp thụ nơtron, và chính sự có mặt của nó trong nhiên liệu quyết định hệ số hơi của độ phản ứng. Sự có mặt ^{166}Er dẫn đến hấp thụ nơtron bổ sung. Ngoài ra, bởi vì khi bắt nơtron, trong ^{166}Er tạo ra ^{167}Er, sự có mặt ^{166}Er làm chậm quá trình cháy ^{167}Er một chút.

Các tính toán khảo sát về tối ưu hóa phân bố erbi trong BNL РБМК-1000 cho phép xác định rằng, trộn đều erbi oxit (Er_2O_3) với urani dioxit là tối ưu. Hàm lượng erbi trong nhiên liệu được chọn theo những tính toán sau đây:

hệ số hơi của độ phản ứng trong lò phản ứng sử dụng nhiên liệu urani-erbi không có các chất hấp thụ bổ sung, không được vượt quá mức khi không sử dụng;

công suất tối đa của BNL không được vượt quá mức hiện tại.

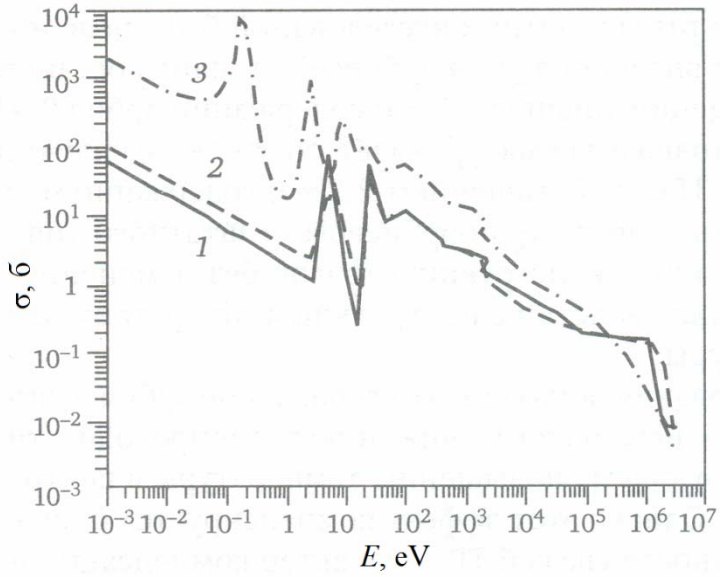
Bảng 16.3. Tiết diện hấp thụ trong vùng nhiệt σ và tích phân cộng hưởng hiệu dụng $I_{эф}$ của các đồng vị erbi

Đồng vị	c, %	σ, б	$I_{эф}$, б
Er	–	158 ± 8	740 ± 10
^{162}Er	0,14	29 ± 2	514 ± 50
^{164}Er	1,56	2,5 ± 2	121 ± 10
^{166}Er	33,4	19,4 ± 41,5	109 ± ± 20
^{167}Er	22,9	653 ± 30	2970 ± 70
^{168}Er	27,1	2,79 ± 0,08	41 ± 7
^{170}Er	14,9	5,8 ± 0,3	58 ± 2

^{166}Er, ^{167}Er đóng vai trò chính trong hấp thụ nơtron, trong khi đó tiết diện hấp thụ của ^{167}Er lớn hơn khoảng 30 lần so với ^{166}Er.

Theo kết quả tính toán khảo sát, giai đoạn đầu áp dụng nhiên liệu urani-erbi đã chọn nhiên liệu làm giàu 2,6% và hàm lượng erbi 0,41% khối lượng. Hiện nay đang thử nghiệm vận hành các BNL urani-erbi làm giàu 2,8% và hàm lượng erbi 0,6%.

Các tính chất của nhiên liệu urani-erbi và nhiên liệu bình thường rất giống nhau, điều đó cho phép giữ nguyên cấu trúc BNL, không cần thay đổi gì, ngoài việc sử dụng viên gốm nhiên liệu có lỗ ở giữa để giảm nhiệt độ.



Hình 16.6. Sự phụ thuộc vào năng lượng nơtron của tiết diện hấp thụ vi mô ^{166}Er, tính toán theo tài liệu ENDF/B-6 (*1*), ENDF/B-4 (*2*) và ^{167}Er theo ENDF/B-4, 6 (*3*)

Các nghiên cứu cho thấy, việc bổ sung erbi vào urani dioxit làm giảm một chút độ dẫn nhiệt của nhiên liệu và, tương ứng, làm tăng nhiệt độ trong tâm cột nhiên liệu. Tuy nhiên, hiệu ứng đó được điều hòa bằng nguồn dự trữ – giảm công suất BNL chưa sử dụng. Sự phụ thuộc của đặc tính điều hòa độ phản ứng dư khi sử dụng nhiên liệu urani-erbi vào độ cháy được trình bày trên hình 16.6.

Các câu hỏi cho mục “Cân bằng nơtron. Sử dụng nhiên liệu urani-erbi”

1. Có các thành phần cân bằng nơtron trong РБМК-1000 nào?

2. Điểm đặc biệt sử dụng các chất hấp thụ là ở chỗ nào, cụ thể là erbi trong lò phản ứng?

17. Các tính toán vật lý-nơtron, được thực hiện để bảo đảm vận hành РБМК-1000

Hiện nay, tính toán lò phản ứng không đồng nhất cỡ lớn, trong đó có РБМК-1000, gồm ba giai đoạn:

tính toán từng ô mạng riêng, chứa kênh công nghệ có BNL hoặc các kênh có các thành phần khác của vùng hoạt (ДП, СУЗ, các cột nước,…);
tính toán sẵn các hằng số nhóm nhỏ (thường là nhóm đôi) để sử dụng trong tính toán lò phản ứng quy mô đầy đủ;
tính toán theo từng kênh cho lò phản ứng quy mô đầy đủ (thông thường, là ba chiều) có tính đến các quan hệ phản hồi về thủy nhiệt.

Trong thực tế hiện nay, để tính toán РБМК-1000, các chương trình ba chiều sau đây được sử dụng: STEPAN, SADCO, ТРОЙКА, POLARIS, BARS.

Thông tin về mẻ nhiên liệu, năng suất năng lượng, vị trí các thanh điều chỉnh, lưu lượng chất tải nhiệt từng kênh, cũng như thông tin của các cảm biến tỏa năng lượng theo chiều hướng tâm và chiều cao vùng hoạt,… được sử dụng làm các số liệu đầu vào. Các chương trình đó được bảo đảm ổn định là nhờ các tiết diện vĩ mô nhóm đôi, nhận được trên cơ sở tính toán chi tiết các ô mạng theo cách không khuếch tán đa nhóm riêng biệt. Để tiến hành các tính toán ô mạng, ngày nay sử dụng các chương trình WIMS-D4 (cho các chương trình STEPAN, SADCO, ТРОЙКА, POLARIS) và chương trình MCNP. Các hằng số của từng kênh riêng, nhận được theo các chương trình ô mạng, sẽ được trình bày ở dạng các đa thức hai chiều dạng lũy thừa , tùy thuộc vào năng suất năng lượng của các kênh, khối lượng riêng của hỗn hợp nước-hơi nước, nhiệt độ nhiên liệu và chất làm chậm, hàm lượng xenon. Những phiên bản đặc biệt của các chương trình ba chiều nói trên dùng để tính toán các đặc tính trong thuyết minh cụm thiết bị lò phản ứng.

Nhờ các chương trình ba chiều, thực hiện việc kiểm soát mẻ nhiên liệu của lò phản ứng theo cách tính toán cho các trạng thái khác nhau (lò phản ứng đã dừng và đã giải nhiễm, gia nhiệt đẳng nhiệt, hoạt động ở các mức công suất khác nhau).

Để bảo đảm vận hành РБМК-1000, đã đưa ra bảng liệt kê các chế độ công nghệ chủ yếu, vốn đòi hỏi tiến hành các tính toán vận hành, các tính toán vận hành để duy trì chất lượng vận hành cụm thiết bị lò phản ứng, các phương pháp cơ bản và

các quá trình công nghệ, mà việc duy trì tính toán chúng cần được thực hiện ở NMĐHN sử dụng РБМК-1000; cũng đã đưa ra cấu trúc tổ chức việc giám sát tính toán. Để giám sát tính toán vận hành các lò phản ứng РБМК-1000, sử dụng một bộ chương trình ứng dụng "Энергия", bao gồm các chương trình sau đây:

ОПТИМА – tối ưu hóa phân bố tỏa năng lượng bằng cách di chuyển các thanh СУЗ. Kết quả tính toán – phân bố tỏa năng lượng theo kênh (công suất) và vị trí của các thanh СУЗ sau khi tối ưu hóa. Các kết quả tính toán được sử dụng để tính công suất theo chương trình ПРИЗМА trong СЦК "Skala";

ОПЕРА – lập kế hoạch thay đảo nhiên liệu. Trên cơ sở những tính toán này thực hiện việc lựa chọn tối ưu các BNL được thay đảo và kế hoạch thay đảo chung;

МКУ – tính toán trình tự tối ưu rút các thanh СУЗ khi đưa lò phản ứng vào mức công suất tối thiểu kiểm soát được;

ПРИЗМА-М-Аналог (tương tự) – tính toán công suất của các kênh công nghệ, các hệ số dự trữ trước khủng hoảng trao đổi nhiệt, các thông số vận hành khác.

Mặc dù các chương trình đó là hai chiều, các kết quả tính toán tương đối ổn định, đủ tin cậy, không có sai lệch đáng kể về phân bố tỏa năng lượng theo chiều hướng tâm.

Hiện nay, đối với các tính toán vận hành, ví dụ, khi đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn, khi lập kế hoạch thay đảo nhiên liệu, đánh giá các đặc tính trong thuyết minh,…các chương trình ba chiều STEPAN, SADCO, ТРОЙКА,… ngày càng được sử dụng rộng rãi.

Các câu hỏi cho mục "Các tính toán vật lý-nơtron, được thực hiện để bảo đảm vận hành РБМК-1000"

1. Các mã ba chiều nào được áp dụng để tính toán các đặc tính thủy nhiệt và vật lý-nơtron của РБМК-1000 và đặc điểm của các thuật toán trong đó là gì?
2. Các mã chương trình nào được sử dụng để tính toán vận hành РБМК-1000?

18. CÁC QUAN ĐIỂM CÔNG NGHỆ CỦA VẤN ĐỀ AN TOÀN РБМК-1000

18.1. Đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn

18.1.1. Trạng thái dưới tới hạn của lò phản ứng

Như đã biết trong mục 8.4, sau khi từ bên ngoài vào vùng hoạt hoặc xuất hiện bên trong vùng hoạt, nơtron được tái sinh M lần trong một khoảng thời gian nào đó, và dòng nơtron (công suất) được xác lập trong lò phản ứng tỷ lệ với M. Sự thay đổi mật độ dòng nơtron theo thời gian được mô tả bằng công thức (hình 18.1):

$$N = \frac{1}{1-k}\left\{1 - \exp\left[-1(1-k)t/l\right]\right\}, \qquad (18.1.1)$$

ở đây k – hệ số tái sinh; t – thời gian hiện tại; l – thời gian sống của nơtron.

Thời gian xác lập mật độ dòng nơtron đến mức $N_{уст}$ phụ thuộc vào độ dưới tới hạn của lò phản ứng $(1 - k)$ và thời gian sống của các nơtron l. Trên thực tế, có thể coi mật độ dòng dưới tới hạn là mật độ đã được xác lập, khi nó đạt đến 90 – 95% $N_{уст}$. Khi đó, thời gian xác lập là

$$t_{уст} \approx 2\frac{l}{1-k} \quad \text{ở } 0{,}9\ N_{уст}. \qquad (18.1.2)$$

Theo công thức trên, ta sẽ đánh giá thời gian xác lập mật độ dòng dưới tới hạn ở thời điểm đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn khi độ dưới tới hạn 10^{-3} hoặc 0,1%.

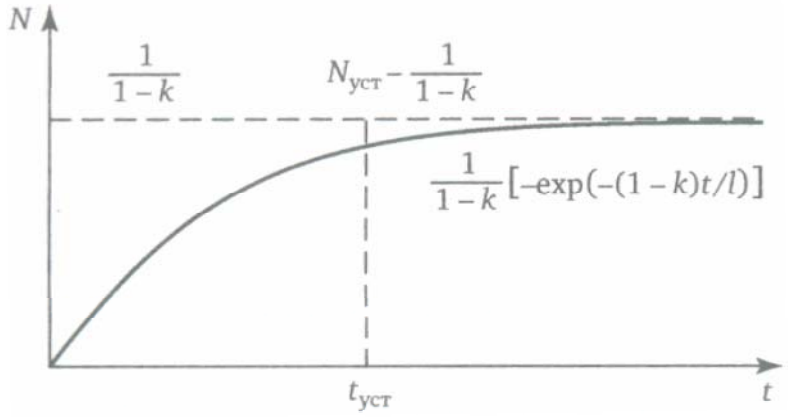
Khi độ dưới tới hạn 10^{-3}, để đưa vào trạng thái tới hạn vẫn còn phải rút hai thanh PP ra (độ hiệu dụng trung bình của thanh PP ~ 50.10^{-5}). Khi độ dưới tới hạn dưới 1β, ảnh hưởng của các nơtron trễ đến thời gian xác lập sẽ càng lớn, khi k càng gần 1, và để tăng độ chính xác, cần sử dụng thời gian sống trung bình l (đối với РБМК-1000 l = 0,07 s), tính theo các nơtron tức thời và nơtron trễ, làm thời gian sống của thế hệ nơtron.

Khi đó $t_{уст} = \dfrac{2.0,07}{0,001} = 140\text{s}.$

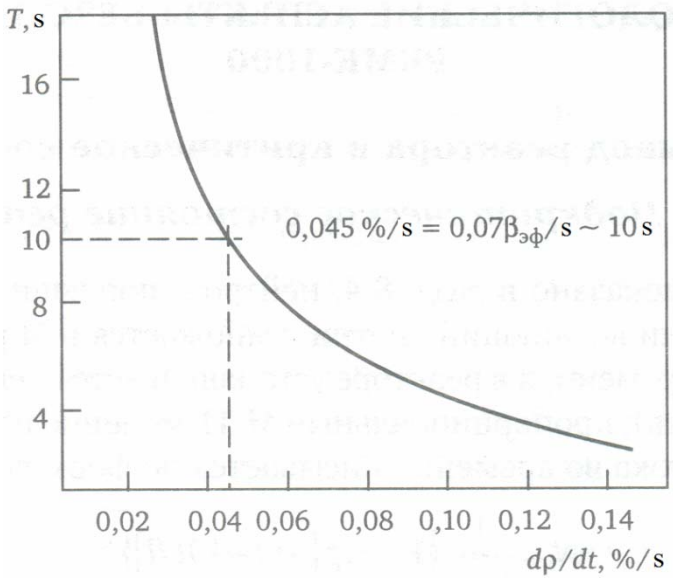
Như vậy, thời gian xác lập mật độ dòng dưới tới hạn là ~ 2 phút. Kết quả này khá phù hợp với yêu cầu của hướng dẫn điều khiển РБМК-1000 đối với khoảng thời gian giữa các bước rút các thanh ra khi tiến dần tới trạng thái tới hạn.

Tình trạng lò phản ứng dưới tới hạn khi đưa độ phản ứng vào một lần, từng bước, là như sau. Trong trường hợp đưa độ phản ứng vào một cách tuyến tính, liên tục, sự phụ thuộc của chu kỳ (thời gian để dòng nơtron tăng lên *e* lần) vào tốc độ thay đổi độ phản ứng được giải phóng ở thời điểm chuyển sang trạng thái tới hạn được trình bày trên hình 18.2.

Như thấy trên biểu đồ, chu kỳ tăng tốc khi chuyển sang trạng thái tới hạn sẽ càng nhỏ, nếu tốc độ đưa độ phản ứng vào (trong trường hợp này, là nhịp độ rút các thanh ra) càng lớn. Ví dụ, khi chuyển sang trạng thái tới hạn, chu kỳ tăng tốc sẽ lớn hơn 10 s chỉ khi tốc độ đưa độ phản ứng vào nhỏ hơn 45.10^{-5}/s, hoặc nhỏ hơn ~ 0,07 β/s. Mức hạn chế đó cũng đã được biết, đó là yêu cầu của mục 2.3.3.13 trong Các quy tắc an toàn hạt nhân các cụm thiết bị lò phản ứng của các cơ sở hạt nhân (ПБЯ РУ АС).



Hình 18.1. Sự thay đổi mật độ dòng nơtron trong lò phản ứng dưới tới hạn



Hình 18.2. Chu kỳ lò phản ứng ở thời điểm chuyển sang trạng thái tới hạn tùy thuộc vào tốc độ giải phóng độ phản ứng

РБМК-1000 được khởi động bằng cách đưa độ phản ứng dương vào từng bước, giữ thời gian giữa các bước để kiểm soát chắc chắn quá trình tăng dòng nơtron đến mức mới và kiểm soát khả năng tính toán chính xác đại lượng 1/M. Thời gian ổn định mật độ dòng nơtron cho trạng thái dưới tới hạn sâu được lấy bằng 1 – 2 phút. Trong khi tiến dần đến trạng thái tới hạn, thời gian đó tăng lên và có thể tăng lên đến hàng chục phút. Đối với РБМК-1000 gần trạng thái tới hạn cần lấy thời gian giữ ổn định an toàn là ~ 6 – 10 phút. Trên thực tế, điều đó đạt được bằng cách thực hiện yêu cầu ổn định các chỉ số của thiết bị đo tốc độ tính toán.

18.1.2. Quá trình đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn

Trong thời gian đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn, hệ số không đồng đều dòng nơtron không được vượt quá 3,5. Tuy nhiên, do không có khả năng kiểm tra và ghi nhận một cách tin cậy độ không đồng đều phân bố dòng nơtron, nên hệ số không đồng đều thường được xác định bằng cách tính toán cho từng giai đoạn rút thanh điều chỉnh.

Tầm quan trọng của việc xác định hệ số không đồng đều khi đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn được xác định bằng các lý giải sau đây. Biết rằng, độ hiệu dụng của một chất hấp thụ bất kỳ nào trong lò phản ứng cũng tỷ lệ với bình phương dòng tương đối tại vị trí chất hấp thụ, cụ thể là

$$\rho_{\text{погл}} \sim \frac{\Phi^2}{\overline{\Phi}^2} \qquad (18.1.3)$$

Theo định nghĩa, hệ số không đồng đều bằng tỷ số giữa dòng cực đại và dòng trung bình:

$$k_r = \frac{\Phi_{\max}}{\overline{\Phi}}. \qquad (18.1.4)$$

Từ đó suy ra, tỷ số giữa độ hiệu dụng cực đại và độ hiệu dụng trung bình của các thanh, khi hệ số không đồng đều bằng, ví dụ 4,5, là

$$\frac{\rho_{\max}}{\overline{\rho}} = k_r^2 \approx 20.$$

Như vậy, việc đánh giá trên cơ sở những lập luận định tính đơn giản chứng tỏ rằng, trong РБМК-1000, ở trạng thái giải nhiễm dưới tới hạn hoặc cận tới hạn, độ hiệu dụng có thể vượt quá mức trung bình hàng chục lần. Lưu ý rằng, trong vùng hoạt РБМК-1000 có thể xuất hiện giới hạn nội vùng trong một vùng thể tích tương đối nhỏ, việc tuân thủ nghiêm ngặt trình tự rút các thanh khi đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn kèm theo việc bắt buộc kiểm tra và ghi nhận hệ số không đồng đều là điều kiện an toàn tối cần thiết trong trạng thái dưới tới hạn và khi đưa vào mức công suất tối thiểu kiểm soát được.

Khi nâng công suất, trong trường hợp đưa lò phản ứng vào chế độ định mức, các hiệu ứng độ phản ứng có liên quan đến công suất, chủ yếu là nhiễm độc, bắt đầu có tác dụng, các tính chất tái sinh của các khu vực khác nhau trong vùng hoạt trở nên cân bằng, và các khu vực đó trở nên có liên quan với nhau. Ngoài ra, hệ thống điều chỉnh tự động hướng tới duy trì hệ số không đồng đều ở mức đã cho $\overline{k}_r \approx 1,4$. Vì vậy, độ hiệu dụng của các thanh trong lò phản ứng đang phát công suất khác nhau không quá hai lần $\overline{k}_r^2 = 1,4^2 \approx 2$.

Việc xác định trình tự rút các thanh СУЗ và vị trí tới hạn của chúng là phần quan trọng của quá trình khởi động an toàn. Khi rút các thanh СУЗ, cần bảo đảm độ không đồng đều cần thiết của phân bố dòng nơtron theo chiều hướng tâm và khi thả các thanh СУЗ để đo độ dưới tới hạn, cần bảo đảm sự biến dạng nhỏ nhất có thể có của phân bố dòng nơtron (bảo đảm tiếp cận tốt hơn với lò phản ứng điểm và bảo đảm độ chính xác cao của phép đo độ dưới tới hạn nhờ dụng cụ đo độ phản ứng). Các nhiệm vụ đó được giải quyết khi xác định trình tự rút các thanh СУЗ kèm theo việc sử dụng chương trình tương ứng. Thuật tính toán bảo đảm việc rút

các thanh một cách đều đặn, có thứ tự trong từng góc phần tư, ở những vị trí có sai hỏng nội vùng phân bố dòng nơtron. Với mục đích đó, người ta sử dụng chương trình МКУ, gần đây sử dụng cả chương trình SADCO (xem mục 17).

Vị trí tới hạn của các thanh СУЗ trong thực tế vận hành được xác định bằng phương pháp so sánh trạng thái hiện tại với trạng thái đã biết trước đó và tính toán sự thay đổi hệ số tái sinh do các hiệu ứng độ phản ứng:

so sánh mức công suất trước khi dừng lò của trạng thái tới hạn với trạng thái hiện tại và tính toán các hiệu ứng độ phản ứng (mức giảm công suất, làm nguội, giải nhiễm,…);

so sánh hệ số tái sinh của hai trạng thái dưới tới hạn, có tính đến sự khác nhau về nhiễm độc xenon, samari và nhiệt độ vùng hoạt;

so sánh hệ số tái sinh của hai trạng thái tới hạn có tính đến sự khác nhau về nhiễm độc xenon, samari và nhiệt độ vùng hoạt.

Các câu hỏi cho mục
“Quá trình đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn”

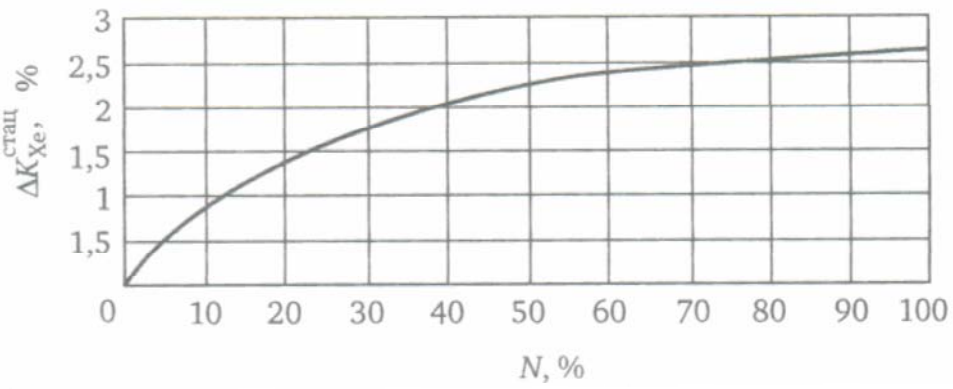
1. Chu kỳ lò phản ứng là gì?
2. Thời gian xác lập mật độ dòng nơtron trong trạng thái dưới tới hạn là gì?

18.2. Nhiễm độc xenon và samari lò phản ứng РБМК-1000

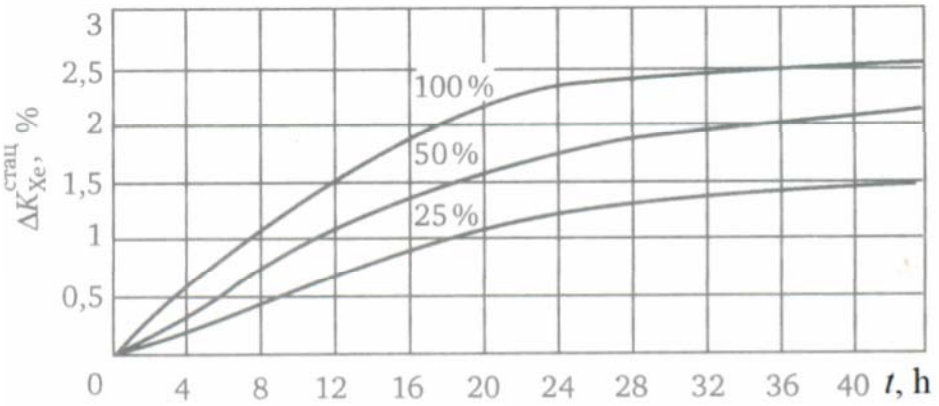
18.2.1. Nhiễm độc tĩnh xenon

Như đã biết trong mục 6, nhiễm độc tĩnh xenon phụ thuộc vào tiết diện hấp thụ nơtron, độ làm giàu nhiên liệu và mật độ dòng nơtron (công suất lò phản ứng). Mức giảm dự trữ độ phản ứng do nhiễm độc tĩnh xenon phụ thuộc vào mức công suất РБМК-1000 được trình bày trên hình 18.3.

Như được thấy trên hình 18.3, khi tăng công suất thì mức tăng tương đối của nhiễm độc tĩnh giảm đi. Như vậy, ở công suất 50% $N_{ном}$, mức giảm dự trữ độ phản ứng do nhiễm độc tĩnh là ~ 2,5, hoặc 45 PP. Nâng công suất lên 50% nữa (đến 100% $N_{ном}$) dẫn đến giảm dự trữ độ phản ứng tất cả là 10 thanh PP.



Hình 18.3. Nhiễm độc tĩnh ^{135}Xe ở các mức công suất khác nhau



Hình 18.4. Sự phụ thuộc của nhiễm độc ^{135}Xe vào thời gian khi lò phản ứng hoạt động ở công suất định mức

Từ hình 18.4 suy ra , công suất lò phản ứng càng cao thì dự trữ độ phản ứng giảm càng nhanh. Như vậy, khi lò phản ứng hoạt động ở công suất định mức $N_{ном}$ trong khoảng 10 giờ, dự trữ độ phản ứng giảm xuống 30 thanh PP, còn khi ở 25% $N_{ном}$ – chỉ 10 – 11 thanh PP.

Khi tăng độ làm giàu, nhiễm độc xenon tăng lên. Điều đó là do ở các điều kiện như nhau, trong hai lò phản ứng có độ làm giàu khác nhau, có lượng ^{235}U như nhau, thì phần hấp thụ trong xenon ở lò nào chứa ^{238}U nhiều hơn sẽ nhỏ hơn. ^{238}U là chất hấp thụ đối với nơtron nhiệt. Như vậy, đối với urani làm giàu cao thì nhiễm độc tĩnh xenon tiến dần tới 5%, đối với urani tự nhiên ~ 2,5%. Các biểu đồ nhiễm độc tĩnh được sử dụng trong các trường hợp sau:

xác định vị trí tới hạn của các bộ phận СУЗ khi khởi động lò phản ứng;

tính toán thời gian hoạt động bổ sung khi giảm công suất;

đánh giá tình trạng các bộ phận điều chỉnh sau khi đưa lò phản ứng vào trạng thái phát công suất.

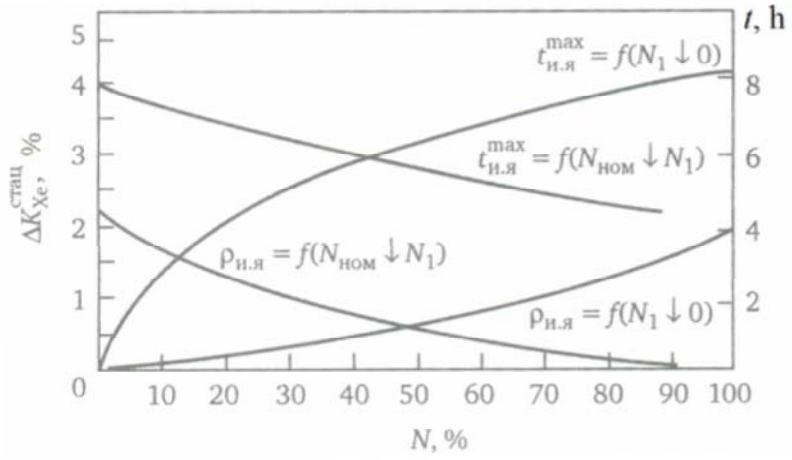
Các câu hỏi cho mục
"Nhiễm độc tĩnh xenon"

1. Nồng độ cân bằng xenon khi tăng công suất sẽ thay đổi như thế nào?
2. Có thể sử dụng dự trữ độ phản ứng nào cho quá trình cháy khi giảm công suất từ 100 xuống đến 70% $N_{ном}$?

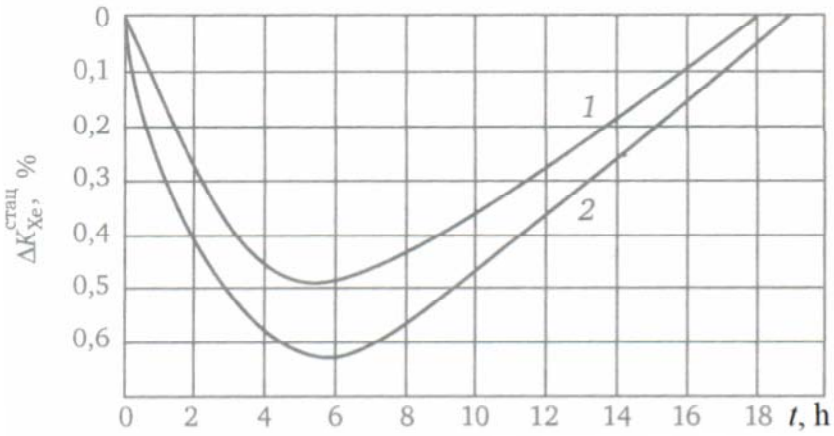
18.2.2. Nhiễm độc không ổn định xenon

Đối với РБМК-1000 có thể tính toán nhiễm độc tĩnh và nhiễm độc không ổn định theo chương trình POIS, vốn cho phép đánh giá sự thay đổi độ phản ứng $\Delta\rho_{Xe}(t)$ khi thay đổi tùy ý công suất theo thời gian. Các biểu đồ nhiễm độc xenon được sử dụng để nhân viên NMĐHN giải quyết các nhiệm vụ thực tế. Trên hình 18.5 trình bày các thông số của hố iốt khi giảm công suất.

Đường cong $\rho_{и.я} = f(N_1 \downarrow 0)$ cho phép xác định độ sâu cực đại của hố iốt tùy thuộc vào công suất lò phản ứng trước khi dừng. Như vậy, khi dừng lò ở công suất 50%, độ sâu hố iốt vào khoảng ~ 1,1%, ở công suất 100% $N_{ном}$ – ~ 1,9%. Khi đó cần nhớ rằng, trước khi dừng, lò phản ứng đã hoạt động không dưới 3 ngày ở mức công suất đã cho và đã có nhiễm độc tĩnh được thiết lập. Đường cong $t_{и.я}^{max} = f(N_1 \downarrow 0)$ tạo khả năng đánh giá thời gian đạt đến điểm cực đại nhiễm độc không ổn định. Như vậy, khi dừng lò với 50% $N_{ном}$ = 6,2 h, với 100 $N_{ном}$ – ~ 8 h.



Hình 15.5. Các thông số hố iốt sau khi giảm công suất



Hình 18.6. Sự thay đổi dự trữ độ phản ứng khi giảm công suất $N_{ном}$ do nhiễm độc tĩnh xenon: *1*, *2* – dưới 60 và dưới 50% $N_{ном}$

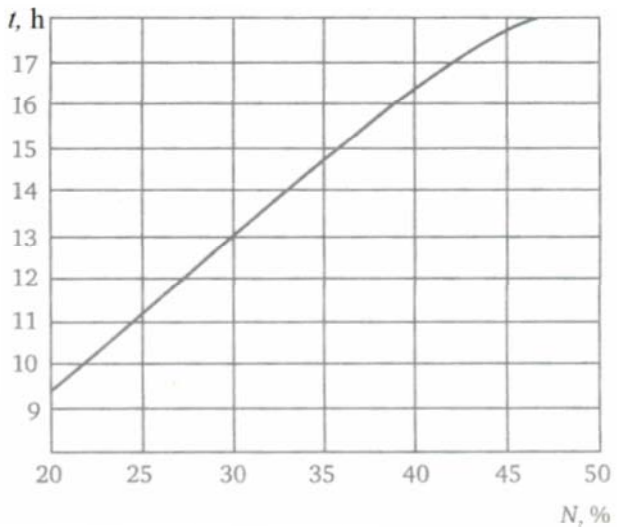
Trên hình 18.6 đưa ra các đường cong nhiễm độc không ổn định khi giảm công suất từ định mức $N_{ном}$ xuống 60% (đường cong *1*) và 50% $N_{ном}$ (đường cong *2*) sau khi khởi động thiết bị bảo vệ khẩn cấp. Trên hình 18.6 thấy rằng, mất mát dự trữ độ phản ứng do nhiễm độc vào khoảng 0,5 và 0,62%, và thời gian để đạt đến điểm cực đại nhiễm độc không ổn định bằng 5 – 6 h.

Sự có mặt hố iốt làm tăng thêm những hạn chế sau đây cho chế độ vận hành РБМК-1000:

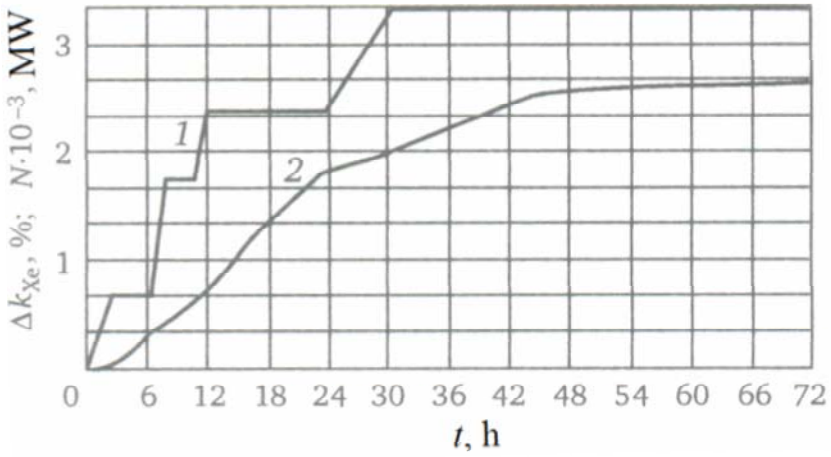
sau khi dừng lò với công suất trên 50% $N_{ном}$, việc khởi động lò phản ứng được phép không trước 2 ngày;

sau khi dừng lò với công suất 50% $N_{ном}$ và thấp hơn, việc khởi động lò phản ứng được phép sau khi thoát khỏi hố iốt. Thời gian cần để thoát khỏi hố iốt được xác định theo chương trình POIS.

Trên hình 18.7 đưa ra sự phụ thuộc của thời gian cực đại cần để thoát khỏi hố iốt vào công suất mà lò phản ứng đã hoạt động trước khi dừng. Trong khi đó, lò phản ứng được xem là đã hoạt động ở mức công suất đã cho không dưới 3 ngày.



Hình 18.7. Sự phụ thuộc của thời gian thoát khỏi hố iốt vào công suất trước khi dừng lò (thời gian hoạt động của lò phản ứng ở công suất này không dưới 3 ngày)



Hình 18.8. Nhiễm độc РБМК-1000 ^{135}Xe trong quá trình nâng công suất sau sửa chữa: 1 – công suất nhiệt lò phản ứng; 2 – sự thay đổi hệ số tái sinh nơtron

Từ kết quả phân tích hình 18.8 có thể rút ra kết luận rằng, khi tăng một cách đều đặn công suất thì không thấy có đoạn tăng theo đà của độ phản ứng dương.

Các biểu đồ nhiễm độc xenon không ổn định là cần thiết cho nhân viên vận hành để đánh giá:

khả năng điều phối công suất lò phản ứng và loại trừ việc làm giảm dự trữ độ phản ứng xuống dưới 30 thanh РР;

tính toán vị trí tới hạn của các thanh СУЗ khi khởi động lò phản ứng;

thời gian nghỉ cưỡng bức khi dừng lò với công suất 50% $N_{ном}$ và thấp hơn;

thời gian hoạt động bổ sung ở mức công suất thấp.

Khi vận hành РБМК-1000 cần nhớ rằng, nhiễm độc xenon phụ thuộc vào phân bố tỏa năng lượng. Khi tăng công suất, ở những vùng nào đó thấy có sự suy giảm mạnh nồng độ xenon, sau đó đạt đến nhiễm độc không ổn định, công suất giảm đi. Xuất hiện các dao động xenon. Chu kỳ các dao động đó 6 – 10 h. Để loại trừ điều đó cần duy trì phân bố tỏa năng lượng trong những giới hạn cho trước và không để lệch nhiều cả theo chiều cao, cả theo chiều hướng tâm của lò phản ứng.

Các câu hỏi cho mục
“Nhiễm độc không ổn định xenon”

1. Tại sao sau khi dừng lò hoặc giảm công suất lại xảy ra tăng tạm thời nồng độ xenon?
2. Hãy xác định các thông số của hố iốt khi dừng lò ở công suất 70% $N_{ном}$.

18.2.3. Nhiễm độc samari

Giải các phương trình (6.5.1) và (6.5.2) cho phép đánh giá mức mất mát độ phản ứng khi nhiễm độc ở mọi thời điểm trước khi xác lập giá trị tĩnh theo hệ thức:

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_{0_{Sm}}\left[1 - \frac{\lambda_{Pm}\exp(-\sigma_{Sm}\Phi t)}{\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm}\Phi_0} + \frac{\lambda_{Sm}\Phi_0\exp(-\lambda_{Pm}t)}{\lambda_{Pm} - \sigma_{Sm}\Phi_0}\right]. \qquad (18.2.1)$$

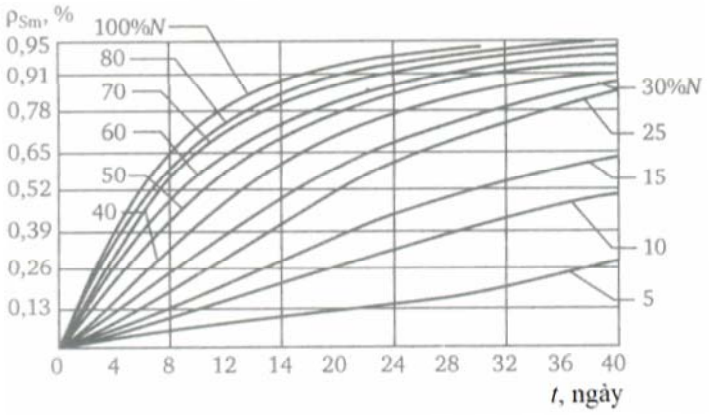
Sự phụ thuộc này đối với РБМК-1000 được trình bày trên hình 18.9.

Như đã thấy trong mục 6.5, thời gian xác lập nồng độ cân bằng ^{149}Sm tỷ lệ nghịch với công suất, nghĩa là, với mật độ dòng nơtron Φ_0:

$$t_{уст} \approx \frac{10^{20}}{\Phi_0}\text{s} \approx \frac{10^{15}}{\Phi_0}\text{ngày}.$$

Trong РБМК-1000, nhiễm độc samari đạt đến giá trị tĩnh trong khoảng 20 ngày hiệu dụng sau khởi động lần đầu và không thay đổi trong suốt thời hạn sử dụng. Vì

vậy, ngày nay, không được tính đến nhiễm độc tĩnh samari khi tính toán vị trí tới hạn của các thanh СУЗ.



Hình 18.9. Sự phụ thuộc của nhiễm độc samari vào thời gian và công suất

18.2.4. Nhiễm độc không ổn định samari

Khi thay đổi công suất và đặc biệt là sau khi dừng lò thì cân bằng động giữa tốc độ tạo ra ^{149}Sm và ^{149}Pm và tốc độ giảm sút do hấp thụ nơtron bị phá hủy. Sau khi dừng lò, sự giảm sút đó (xem hình 6.2.12) chấm dứt, bởi vì dòng nơtron thực tế là bằng 0, còn việc tạo ra samari từ promethi thì tiếp tục đến khi promethi phân rã hoàn toàn. Trên thực tế, trong khoảng 4 – 5 T_{Pm}, nghĩa là, khoảng 8 – 10 ngày thì ~ 90% promethi được phân rã.

Mức tăng độ dưới tới hạn khi tích tụ samari từ promethi phân rã sau khi dừng lò (hố sụt promethi) tỷ lệ thuận với công suất trước khi dừng, vốn tương ứng với nồng độ promethi đã được xác lập $\rho_{пп}$:

$$\rho_{пп} = -\Theta W_{пп} = -\Theta \frac{\gamma_{Pm}\sigma_{Sm}\sum_f^{U_{235}}}{\lambda_{Pm}\sum_f^{U_{235}}}\Phi_0 = \rho_{0Sm}\frac{\sigma_{Sm}}{\lambda_{Sm}}\Phi_0, \qquad (18.2.2)$$

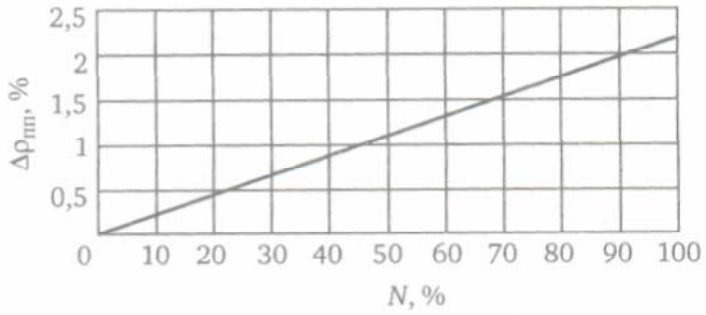
ở đây, Θ – hệ số sử dụng nhiệt của các nơtron.

Để giải quyết các nhiệm vụ đó, trên hình 18.10 đưa ra sự phụ thuộc của hố sụt promethi trong РБМК-1000 vào công suất, mà ở đó nồng độ cân bằng promethi đã được xác lập trước khi dừng lò.

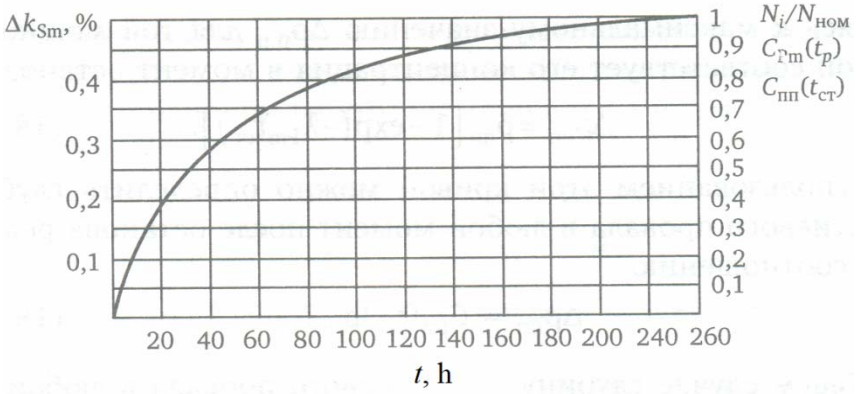
Khi dừng lò với mức công suất bất kỳ N_i, mà ở đó lò phản ứng hoạt động không dưới 8 ngày,

$$\rho_{\text{пп}}^{N_i} = \rho_{\text{пп}}^{\text{ном}} N_i / N_{\text{ном}}. \qquad (18.2.3)$$

Khi lò hoạt động ở công suất định mức dưới 8 ngày, nồng độ promethi chưa thể đạt mức cân bằng. Nhưng vì, ứng với mỗi mức công suất đều có nồng độ tĩnh riêng, nên có thể đặt cho mỗi nồng độ bất kỳ một mức công suất, mà ở mức đó lò phản ứng hoạt động trong khoảng thời gian không dưới 8 ngày vẫn xác lập được nồng độ promethi đã cho.



Hình 18.10. Sự phụ thuộc của độ sâu cực đại "hố sụt promethi" vào công suất lò phản ứng N



Hình 18.11. Nồng độ tĩnh Pm phụ thuộc vào công suất

Trên hình 18.11 trình bày sự phụ thuộc của nồng độ tĩnh promethi vào công suất.

Theo trục tọa độ, bằng các đơn vị tương đối, đã thể hiện nồng độ promethi, được tính theo công thức sau đây, đối với nồng độ tĩnh cho mức công suất, mà ở đó lò phản ứng hoạt động trong khoảng thời gian t_p,

$$C_{\text{Pm}}(t_p) = \frac{N_{\text{Pm}}(t_p)}{N_{0\text{Pm}}} \qquad (18.2.4)$$

và đã thể hiện mức công suất, mà ở đó lò phản ứng hoạt động, đối với công suất định mức. Trên biểu đồ đó, ứng với mỗi giá trị nồng độ promethi là công suất, mà ở đó đã thiết lập một nồng độ promethi như khi lò phản ứng đã từng hoạt động ở mức công suất này trong thời gian 4 – 5 T_{Pm}. Biểu đồ đó cũng được sử dụng để xác định hố sụt promethi trong khoảng thời gian nghỉ của lò phản ứng ($t_{ст}$), vì quá trình tăng độ dưới tới hạn khi nhiễm độc xenon trong hố sụt promethi $\Delta\rho_{пп}$ diễn ra với tốc độ phân rã promethi vốn đã tích tụ cho đến khi dừng lò, nghĩa là, với tốc độ tích tụ samari từ promethi phân rã:

$$\Delta N_{Sm}(t_{ст}) = N_{0Pm}\left[1-\exp(-\lambda_{Pm}t_{ст})\right] \qquad (18.2.5)$$

trong khi tiến đến giá trị cực đại đối với mức công suất, mà tương ứng với mức công suất đó là nồng độ của nó ở thời điểm dừng lò:

$$\Delta\rho_{пп} = \rho_{пп}\left[1-\exp(-\lambda_{Pm}t_{ст})\right]. \qquad (18.2.6)$$

Sử dụng đường cong đó có thể xác định độ sâu của hố sụt promethi ở mọi thời điểm sau khi dừng lò theo hệ thức

$$\Delta\rho_{пп} = C_{пп}(t_{ст})\rho_{пп}. \qquad (18.2.7)$$

Trong trường hợp tổng quát, có thể xác định độ sâu của hố sụt promethi ở mọi thời điểm $t_{ст}$ sau khi dừng lò với công suất N_i, mà ở đó lò phản ứng đã hoạt động trong suốt quãng thời gian t_p, khi sử dụng hình 18.13, theo công thức

$$\rho_{пп}^{N_i}(t_{ст}) = \rho_{пп}^{ном}\frac{N_i}{N_{ном}}C_{Pm}(t_p)C_{пп}(t_{ст}). \qquad (18.2.8)$$

Giá trị $\rho_{пп}$ được xác định theo biểu đồ trên hình 18.10.

Xét ví dụ.

Xác định hố sụt promethi trong khoảng 50 h sau khi dừng lò với công suất N = 70% $N_{ном}$, mà ở đó lò phản ứng đã hoạt động 40 ngày.

Theo biểu đồ trên hình 18.10, $\rho_{пп}$ (70%) ≈ 0,32%, theo biểu đồ trên hình 18.11, $C_{пп}$(50 h) ≈ 0,52.Từ đó hố sụt promethi là

$$\rho_{пп}^{50h} = C_{пп}\Delta\rho_{пп} = 0,32.0.52 = 0,156\%.$$

Sau khởi động thường kỳ, hố sụt promethi do cháy phần samari vốn làm tăng nồng độ cân bằng, mất đi, và nhiễm độc ở mức tĩnh lại được thiết lập. Sự giảm bớt nhiễm độc samari do nó cháy diễn ra theo quy luật hàm mũ

$$\rho_{\text{Sm}}^{(t)} = \rho_{\text{Sm}}^{*} \exp(-\sigma_{\text{Sm}}\Phi_0 t) = \rho_{\text{Sm}}^{*} \exp\left(-0,693\frac{t}{T_{\text{Sm}}^{*}}\right),$$

ở đây, ρ_{Sm}^{*} – nhiễm độc ở thời điểm khởi động lò phản ứng; σ_{Sm} – tiết diện hấp thụ vi mô; Φ_0 – mật độ dòng nơtron; T_{Sm}^{*} – chu kỳ bán cháy hiệu dụng.

Chu kỳ bán cháy hiệu dụng của samari, đặc trưng cho tốc độ giảm nó do bắt phóng xạ nơtron khi lò phản ứng hoạt động ở công suất với mật độ dòng Φ_0, là

$$T_{\text{Sm}}^{*} = \frac{0,693}{\lambda_{\text{Sm}}^{*}} = \frac{0,693}{\sigma_{\text{Sm}}\Phi_0} = \frac{16.10^{13}}{\Phi_0}.$$

Đại lượng T_{Sm}^{*}, tùy thuộc vào mức công suất, nằm trong giới hạn 4 – 10 ngày.

Khi thay đổi công suất, nồng độ samari tạm thời thay đổi, đó là do sai lệch cân bằng động giữa tích tụ và giảm sút nó. Tốc độ giảm sút có liên quan trực tiếp với dòng nơtron (với công suất), còn tốc độ tích tụ – với chu kỳ bán rã của promethi. Tăng công suất sẽ kèm theo việc giải phóng tạm thời độ phản ứng, còn giảm công suất – mất mát, điều này, tương tự như hố iốt, có thể gọi là hố promethi. Do nhỏ nên hiệu ứng này không ảnh hưởng đáng kể đến hoạt động của lò phản ứng. Vì $|\rho_{\text{пп}}| < |\rho_{\text{Xe0}}|$, nên không cần phải có thêm dự trữ độ phản ứng để điều hòa $\rho_{\text{пп}}$.

Các biểu đồ nhiễm độc không ổn định samari và các mối quan hệ, đặc trưng cho độ lớn và tốc độ thay đổi nhiễm độc, là cần thiết để tính toán vị trí tới hạn СУЗ khi khởi động lò phản ứng một cách bình thường và để đánh giá khả năng điều phối công suất khi dự trữ độ phản ứng nhỏ.

Các câu hỏi cho mục “Nhiễm độc không ổn định samari ”

1. Sự thay đổi nồng độ samari trong quá trình khởi động lần thứ nhất và thứ hai khác nhau như thế nào?
2. Hố sụt promethi có ảnh hưởng như thế nào đến độ dưới tới hạn?

18.3. Hệ thống tin cậy dẫn thoát nhiệt từ các thanh nhiên liệu

Khi vận hành bình thường, việc dẫn thoát nhiệt từ các thanh nhiên liệu được bảo đảm bởi quá trình tuần hoàn chất tải nhiệt trong КМПЦ nhờ ГЦН. Nước được đưa đến tuabin ở dạng hơi, khi trở lại КМПЦ ở dạng nước cấp. Sự phân bố lưu lượng nước theo các kênh, tuỳ theo công suất của chúng (điều chỉnh lưu lượng), bảo đảm lấy nhiệt từ các thanh nhiên liệu và bảo đảm hoạt động tin cậy của BNL trong suốt thời hạn làm việc. Muốn vậy, mỗi kênh công nghệ, tuỳ theo mức công suất của nó, vốn phụ thuộc trước hết vào năng suất tỏa năng lượng của BNL, đều được chuyển vào hoạt động trong một dải lưu lượng cho trước nhất định. Có tất cả bảy kênh như vậy. Tùy theo quá trình cháy của BNL mà kênh công nghệ được chuyển đến vùng có lưu lượng nhỏ hơn.

Xuất phát từ quan điểm loại trừ khả năng phá huỷ BNL khi lấy nhiệt thì tấm chặn là bộ phận quan trọng của hệ thống điều chỉnh lưu lượng qua kênh công nghệ. Tấm chặn này loại trừ hoàn toàn khả năng đóng sai của van điều chỉnh-đóng (ЗРК). Lưu lượng, vốn được quy định khi đóng van điều chỉnh-đóng của kênh công nghệ từ BNL đến tấm chặn (3 mm), là 12 – 13 m^3/h. Trong khi đó, trong kênh có công suất cực đại (3MW) xuất hiện khủng hoảng lấy nhiệt, và vỏ bọc các thanh nhiên liệu dãy ngoài bị nung nóng đến 465^0C. Trong chế độ nhiệt độ như vậy, độ kín của thanh nhiên liệu vẫn được bảo đảm. Tuy nhiên, khi có tín hiệu giảm lưu lượng nước, sau đó là tín hiệu $K_3 < 1$ cần nhanh chóng mở ЗРК và phục hồi lưu lượng chất tải nhiệt yêu cầu. Vì vậy, từ thời điểm đưa lò phản ứng vào mức công suất tối thiểu kiểm soát được, cấm tháo bỏ các tấm chặn – đó là điều kiện vận hành an toàn.

Để làm nguội tin cậy cho vùng hoạt khi có sự cố kèm theo hở КМПЦ, đã tính trước hệ thống làm nguội khẩn cấp lò phản ứng (CAOP), hệ thống này bảo đảm lấy nhiệt từ các thanh nhiên liệu khi có các sự cố thiết kế, kể cả sự cố vỡ ống góp có áp dẫn đến hậu quả xấu nhất, và tránh cho các thanh nhiên liệu hư hại vượt quá các giới hạn thiết kế. Giữ CAOP ở chế độ sẵn sàng là yếu tố an toàn quan trọng, vì vậy phải thường xuyên kiểm tra khả năng làm việc của các bộ phận của CAOP. Nhờ đó mà tránh cho nhiên liệu hư hại quá giới hạn đã định khi có sai phạm dẫn thoát nhiệt khỏi các thanh nhiên liệu.

Các câu hỏi cho mục “Hệ thống tin cậy dẫn thoát nhiệt từ các thanh nhiên liệu”

1. Việc điều chỉnh lưu lượng trong РБМК-1000 được thực hiện như thế nào?
2. Các biện pháp nào đã được tính trước để tránh xuất hiện khủng hoảng lấy nhiệt?

18.4. Các hiệu ứng và các hệ số độ phản ứng của РБМК-1000. Ảnh hưởng của sự thay đổi các thông số lò phản ứng đến độ phản ứng

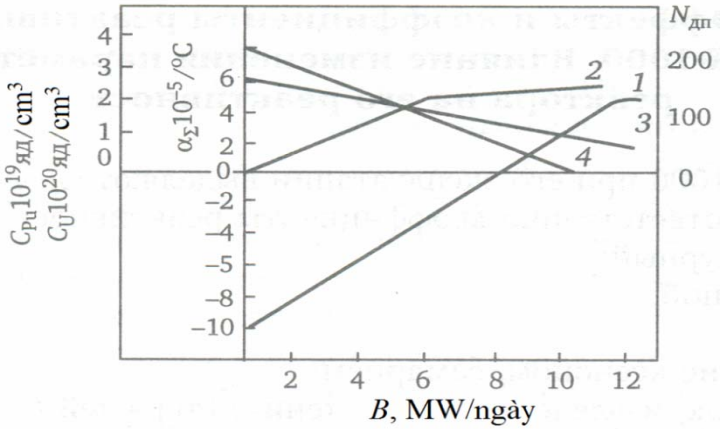
Trong РБМК-1000, khi vận hành, có các hiệu ứng và các hệ số độ phản ứng nổi bật sau đây:

nhiệt độ;
công suất;
hơi;
nhiễm độc xenon và samari;
thay đảo nhiên liệu, rút ra (nhúng vào) các thanh СУЗ;
cạn nước КМПЦ, КОСУЗ.

Ta xét một cách chi tiết hơn các hiệu ứng và các hệ số độ phản ứng đó.

18.4.1. Hiệu ứng (hệ số) nhiệt độ của độ phản ứng

Bởi vì trong các trạng thái khác nhau của vùng hoạt nhiệt độ của các bộ phận trong đó thay đổi theo các quy luật khác nhau, nên toàn bộ dải nhiệt độ của các bộ phận trong vùng hoạt được chia thành các phần: từ 20 đến 180^0C và cao hơn 180^0C. Trong dải từ 20 đến 180^0C, lò phản ứng được gia nhiệt nhờ ГЦН. Khi đó coi là, nhiệt độ của tất cả các bộ phận trong vùng hoạt thay đổi cùng một kiểu, do vậy khái niệm hệ số gia nhiệt đẳng nhiệt α_Σ được đưa vào. Giá trị của nó phụ thuộc cả vào thời gian hoạt động của lò phản ứng từ thời điểm khởi động, cả vào thành phần của vùng hoạt ở chế độ tĩnh (độ làm giàu, số các ДП, các thanh СУЗ trong vùng hoạt).



Hình 18.12. Sự thay đổi α_Σ trong chế độ chuyển tiếp РБМК-1000 trong lượt thứ hai; $1 - C_{^{239}Pu}$; $2 - \alpha_\Sigma$; $3 - C_{^{235}U}$; $4 - N_{пд}$

Từ hình 18.12 suy ra, đặc tính thay đổi của α_Σ trong chế độ chuyển tiếp được xác định bởi sự thay đổi thành phần nhiên liệu (độ cháy ^{235}U và tích tụ ^{239}Pu) và bởi mức suy giảm số chất hấp thụ bổ sung).

Ngoài ra, khi РБМК-1000 hoạt động cần phân biệt α_Σ cho hai trạng thái: dưới tới hạn (tất cả các thanh СУЗ, ngoài БАЗ, đều được nhúng xuống), và khi gia nhiệt trong trạng thái tới hạn. Trong trạng thái dưới tới hạn thì α_Σ âm ($\sim -1.10^{-5}/^0C$). Hệ số này được sử dụng để đánh giá sự thay đổi độ dưới tới hạn của lò đã dừng khi thay đổi nhiệt độ của nó. Ví dụ, độ dưới tới hạn của lò phản ứng được đo ở nhiệt độ 60 – 80^0C. Các quy tắc an toàn hạt nhân có thêm quy định hạn chế độ dưới tới hạn trong trạng thái $k_{эф}$ cực đại. Khi α_Σ âm, trạng thái có $k_{эф}$ cực đại bắt đầu khi nhiệt độ vùng hoạt 20^0C, và độ dưới tới hạn trong trạng thái đó sẽ nhỏ hơn độ dưới tới hạn đo được theo hiệu ứng nhiệt độ.

Ví dụ.

Độ dưới tới hạn đo được ở 80^0C bằng $5\beta_{эф}$, hoặc 3,05%, khi $\alpha_\Sigma = -1.10^{-5}/^0C$, hiệu ứng nhiệt độ là $\Delta\rho_t = \alpha_\Sigma.\Delta_t = -1.10^{-5}(80 - 20) = -60.10^{-5}$; độ dưới tới hạn trong trạng thái có $k_{эф}$ cực đại ở 20^0C là $\rho = 3050.10^{-5} = 2990.10^{-5} = 2,99\%$.

Hệ số gia nhiệt đẳng nhiệt trong trạng thái tới hạn là dương và điều đó xuất hiện trong trường hợp, khi gia nhiệt mà bộ điều chỉnh tự động và các thanh СУЗ đều được nhúng trong vùng hoạt, và thấy có tăng dự trữ độ phản ứng.

Hệ số đó cần sử dụng khi xác định vị trí tới hạn của các thanh СУЗ khi đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn ở nhiệt độ khác nhau, khi xác định sự thay đổi dự trữ độ phản ứng trong quá trình gia nhiệt ở mức công suất tối thiểu kiểm soát được.

Ví dụ.

Khi đo hệ số nhiệt độ của độ phản ứng trong thời gian đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn lần đầu, 88 thanh СУЗ được rút ra (nhiệt độ 60^0C). Theo những số đo trước đó $\alpha_\Sigma = +2.10^{-5}$. Xác định vị trí tới hạn của các thanh СУЗ ở 160^0C (gia nhiệt nhờ các ГЦН).

Giải.

Khi độ hiệu dụng của thanh СУЗ $\sim 40.10^{-5}$ dự trữ độ phản ứng tăng lên một lượng $\Delta\rho = 200.10^{-5}/40.10^{-5} = 5$ thanh РР. Nghĩa là số thanh СУЗ được rút ra giảm đi một lượng là 5 thanh và bằng 88 – 5 = 83.

Các câu hỏi cho mục
"Hiệu ứng (hệ số) nhiệt độ của độ phản ứng"

1. α_Σ phụ thuộc vào năng suất lò phản ứng như thế nào?
2. Xác định hiệu ứng gia nhiệt lò phản ứng với mẻ nhiên liệu đầu.

18.4.2. Gia nhiệt cao hơn 180^0C. Hệ số độ phản ứng theo nhiệt độ grafit

Gia nhiệt vùng hoạt cao hơn 180^0C là do các phản ứng hạt nhân, và vì vậy mà tất cả các bộ phận của vùng hoạt được gia nhiệt khác nhau. Ta đánh giá sự thay đổi nhiệt độ của các bộ phận trong vùng hoạt.

Nhiệt độ nước đầu vào vùng hoạt được xác định bởi công suất, lưu lượng nước cấp và lưu lượng nước trong КМПЦ. Nhiệt độ nước thay đổi trong khoảng 265 – 280^0C và được đo trong ống góp hút của КМПЦ. Nhiệt độ của hỗn hợp nước-hơi nước ở đầu ra lò phản ứng được xác định bởi áp suất trong các bộ tách-tang trống và tương ứng với nhiệt độ bão hoà. Bởi vì dải thay đổi nhiệt độ của nước không lớn, nên hệ số riêng theo nhiệt độ của nước không được đưa vào, còn ảnh hưởng của nó đến độ phản ứng được mô tả bằng hệ số hơi (mật độ) của độ phản ứng và bằng hệ số công suất nhanh của độ phản ứng.

Dải thay đổi nhiệt độ của nước trong vòng làm nguội СУЗ khi lò phát công suất là không lớn (10 – 15^0C), nhưng hệ số độ phản ứng theo nhiệt độ lại khá lớn (~ $1.10^{-4}/^0$C), và hiệu ứng tổng của độ phản ứng lại rõ rệt (1 – 2 thanh СУЗ). Nó được sử dụng trong các tình huống bất thường để tăng dự trữ độ phản ứng trong một giai đoạn ngắn. Do việc lắp các thanh СУЗ b.2477-01, sau đó là các thanh КРО nên lượng nước trong vòng làm nguội СУЗ giảm bớt đáng kể, và hiệu ứng đó giảm đi.

Nhiệt độ của nhiên liệu thay đổi trong dải rộng hơn, từ ~ 300^0C đến ~ 1500^0C trong tâm thanh nhiên liệu khi lò hoạt động ở công suất định mức. Bởi vì nhiệt độ của nhiên liệu được xác định bởi công suất, và thay đổi liền theo công suất, nên ảnh hưởng của nó đến độ phản ứng là một phần trong tính toán hệ số công suất nhanh của độ phản ứng. Nhiệt độ của grafit thay đổi từ 280 đến 750^0C và phụ thuộc vào công suất, sự phân bố công suất theo thể tích lò phản ứng và thành phần hỗn hợp khí trong không gian lò phản ứng. Để đánh giá ảnh hưởng của sự thay đổi nhiệt độ grafit người ta đưa vào khái niệm hệ số nhiệt độ của độ phản ứng theo grafit α_C. Ngày nay, РБМК-1000 hoạt động ở chế độ đã được quy định, và α_C ~ $4{,}5.10^{-5}/^0$C.

Trong quá trình vận hành РБМК-1000, nhiệt độ grafit được xác định bởi công suất, sự phân bố công suất theo thể tích lò phản ứng và thành phần hỗn hợp khí trong không gian lò phản ứng. Đã xác định giới hạn vận hành an toàn theo nhiệt độ grafit, giới hạn này bằng 750^0C. Khi vận hành bình thường, nhiệt độ tối đa của grafit không được vượt quá 730^0C.

Để đánh giá sự thay đổi nhiệt độ của grafit khi thay đổi công suất và nồng độ hêli có thể sử dụng công thức:

$$\overline{T}_{\text{гр}} = T_{\text{тепл}} + \alpha \overline{W}, \qquad (18.4.1)$$

ở đây, $\overline{T}_{\text{гр}}$ – nhiệt độ trung bình của grafit (nhiệt độ tối đa khi phân bố toả năng lượng bình thường theo chiều hướng tâm và theo chiều cao lò phản ứng:

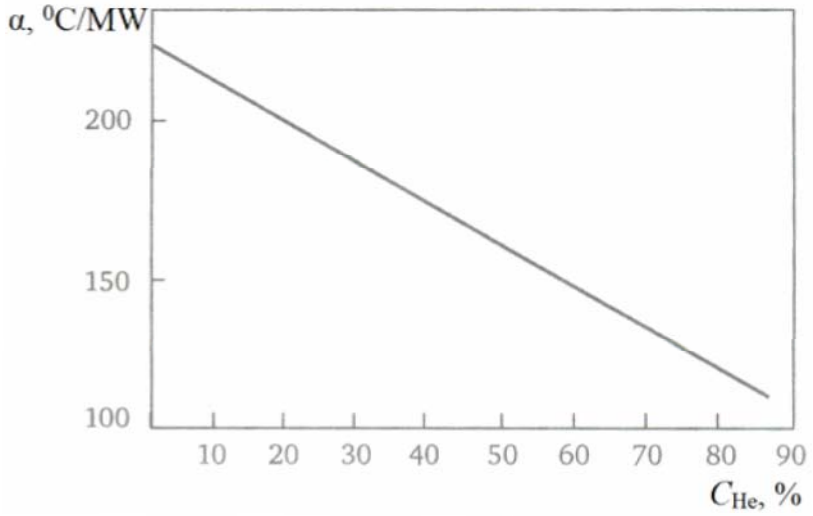
$$T_{\text{гр}}^{\max} \approx (1,3-1,4)\overline{T}_{\text{гр}}, \qquad (18.4.2))$$

$T_{\text{тепл}}$ – nhiệt độ chất tải nhiệt; α – hệ số tỷ lệ (phụ thuộc vào thành phần nước thổi); $\overline{W}$ – công suất trung bình của kênh công nghệ.

$$\overline{W} = W_{\text{реак}} / N_{\text{тк}}, \qquad (18.4.3)$$

ở đây, $N_{\text{тк}}$ – số kênh trong lò phản ứng.

Sự phụ thuộc của hệ số α vào nồng độ hêli trong hỗn hợp nitơ-hêli được trình bày trên hình 18.13.



Hình 18.13. Sự phụ thuộc của hệ số α vào nồng độ hêli

Ví dụ.

Trạng thái ban đầu của lò phản ứng – công suất 70% định mức, dự trữ độ phản ứng 46 thanh PP, $\overline{T}_{гр} = 465^0$C, $T_{тепл} = 280^0$C. Xác định nồng độ tối thiểu của hêli, ở đó nhiệt độ trung bình của grafit không quá 540^0C, và không thay đảo nhiên liệu trong thời gian hoạt động bổ sung.

Theo công thức (18.4.3) ta có

$$\overline{W} = 2240/1580 \approx 1{,}42 \text{ MW}.$$

Khi đó hệ số α bằng

$$\alpha = (\overline{T}_{гр} - T_{тепл})/\ \overline{W} = (540 - 280)/1{,}42 = 183^0\text{C/MW}.$$

Theo biểu đồ trên hình 18.13 khi $\alpha = 183^0$C/MW thì nồng độ hêli C = 28%.

Khi chênh lệch nhiệt độ

$$\Delta T = 540 - 465 = 75^0\text{C}$$

hiệu ứng độ phản ứng

$$\Delta\rho = \alpha_C.\Delta T = 4{,}5.10^{-5}.75 = 338.10^{-5}.$$

Với nhịp độ cháy ~ 20.10^{-5}/ngày (ở công suất 70%) thời gian bổ sung là

$$t = 338.\ 10^{-5}/20.10^{-5} \approx 17 \text{ ngày}.$$

Các câu hỏi cho mục
"Gia nhiệt cao hơn 180^0C. Hệ số độ phản ứng theo nhiệt độ grafit"

1. Dự trữ độ phản ứng sẽ thay đổi như thế nào khi thổi hêli?
2. Xác định sự thay đổi nồng độ hêli để tăng dự trữ độ phản ứng lên 1 thanh PP.

18.4.3. Hệ số công suất của độ phản ứng

Sự thay đổi độ phản ứng, do thay đổi nhiệt độ của nhiên liệu và do thay đổi tỷ trọng và nhiệt độ của nước trong TK có liên quan đến sự thay đổi nhiệt độ nhiên liệu đó, được gọi là hiệu ứng công suất nhanh. Mức thay đổi độ phản ứng, dẫn đến thay đổi 1MW công suất, được gọi là hệ số công suất nhanh của độ phản ứng

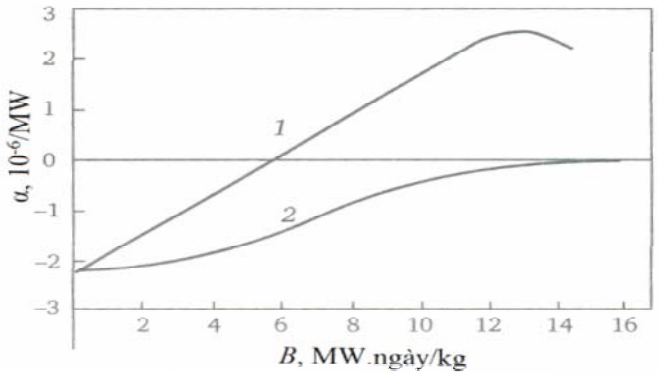
$$\alpha_{\text{w}}^{\text{б}} = \alpha_T \frac{\Delta T}{\Delta W} + \alpha_\gamma \frac{\Delta \gamma}{\Delta W} + \alpha_{t_{\text{в}}} \frac{\Delta t_{\text{в}}}{\Delta W}, \qquad (18.4.4)$$

ở đây, $\alpha_{\text{w}}^{\text{б}}$ – hệ số công suất nhanh của độ phản ứng; α_T – hệ số độ phản ứng theo nhiệt độ của nhiên liệu; α_γ – hệ số độ phản ứng theo tỷ trọng của nước; ΔT, $\Delta t_{\text{в}}, \Delta\gamma$ – sự thay đổi nhiệt độ của nhiên liệu, của nước và thay đổi tỷ trọng của nước tương ứng với sự thay đổi công suất.

Số hạng thứ nhất được quy định bởi sự thay đổi nhiệt độ của nhiên liệu, nó luôn luôn âm và ít thay đổi trong quá trình hoạt động của lò phản ứng. Giá trị âm của nó được bảo đảm nhờ sự có mặt của ^{238}U trong nhiên liệu, trong đó, do hiệu ứng Dopler mà khi tăng nhiệt độ thì sự hấp thụ nơtron tăng lên. Các số hạng thứ hai và thứ ba có liên quan đến sự thay đổi tỷ trọng và nhiệt độ của nước trong vùng hoạt khi thay đổi công suất. Dấu và giá trị của tổng các số hạng đó cũng phụ thuộc vào chính những thông số mà hệ số hơi phụ thuộc. Ở đây cần lưu ý rằng, khi thay đổi công suất thì tỷ trọng và nhiệt độ của nước cũng phụ thuộc vào các thông số mà áp suất trong КМПЦ và lưu lượng hơi và nước cấp (chúng được duy trì bằng bộ điều chỉnh áp suất và lưu lượng) phụ thuộc, còn đại lượng $\alpha_{\text{w}}^{\text{б}}$ khi α_φ lớn ($4 - 5.10^{-2} \beta_{\text{эф}}$ /%) thì phụ thuộc vào chế độ hoạt động của bộ điều chỉnh.

Nói chung, $\alpha_{\text{w}}^{\text{б}}$ khi $\alpha_\varphi < 4.10^{-2} \beta_{\text{эф}}$ /% thì âm. Khi α_φ lớn và khi có sự điều chỉnh bộ điều chỉnh thì nó có thể chuyển dịch về vùng dương.

Các giá trị tính toán $\alpha_{\text{w}}^{\text{б}}$, α_w cho РБМК-1000 của những lượt thứ hai được đưa ra trên hình 18.14.



Hình 18.14. Đặc điểm của sự thay đổi $\alpha_{\text{w}}^{\text{б}}$ và α_w trong chế độ chuyển tiếp РБМК-1000: 1 – hiệu ứng công suất; 2 – hiệu ứng công suất nhanh.

Có thể thấy sự xuất hiện rõ ràng của $\alpha_w^б$ khi thay đổi nhanh công suất, ví dụ khi khởi động hệ thống bảo vệ sự cố theo các tín hiệu А3-1 và А3-3. Dự trữ độ phản ứng trong khoảng 5 – 10 phút đầu cao hơn dự trữ ở mức tĩnh một lượng bằng hiệu ứng công suất (3 – 5 thanh РР). Hệ số $\alpha_w^б$ được sử dụng để xác định vị trí tới hạn của các thanh СУЗ khi đưa lò phản ứng vào mức công suất tối thiểu kiểm soát được, cũng như khi tính toán sự thay đổi dự trữ độ phản ứng trong trường hợp chuyển từ một mức công suất này sang mức khác.

Hiệu ứng công suất âm là yếu tố có chức năng ổn định khi có thay đổi đột ngột công suất, nó đem lại khả năng tự điều chỉnh khi điều khiển công suất. Tác động kìm hãm của nó là đặc biệt quan trọng khi đưa độ phản ứng dương vào và khi tăng công suất trong các tình huống khẩn cấp, bởi vì tác động đó là tác động nhanh và là tác động vốn có của lò phản ứng.

Xét ví dụ sử dụng $\alpha_w^б$**.**

Ta sẽ xác định, công suất lò phản ứng thay đổi như thế nào khi rơi thanh РР từ trên đỉnh trong trường hợp các bộ điều chỉnh tự động không hoạt động. Để tính toán, lấy $\alpha_w^б$ = 1,2.10^{-6}/MW, độ hiệu dụng của các thanh СУЗ Δρ = 50.10^{-5}. Từ việc xác định $\alpha_w^б$ = Δρ/ΔW ta tìm được

$$\Delta W = \frac{\Delta\rho}{\alpha_w^б}\Delta W = \frac{50.10^{-5}}{1,2.10^{-6}} = 417 \text{ MW}.$$

Các câu hỏi cho mục
“Hệ số công suất của độ phản ứng”

1. Dự trữ độ phản ứng thay đổi như thế nào khi diảm đột ngột công suất?
2. $\alpha_w^б$ ảnh hưởng như thế nào đến độ an toàn của lò phản ứng?

18.4.4. Hệ số hơi của độ phản ứng

Ta đặc biệt chú ý đến ý nghĩa của hệ số hơi của độ phản ứng đối với độ an toàn của РБМК-1000.

Trước hết ta xét hệ số tỷ trọng của độ phản ứng α_γ, sau khi xác định nó như một hệ số tỷ lệ giữa độ phản ứng δρ, được quy định bởi sự thay đổi tỷ trọng của hỗn hợp nước-hơi nước một lượng δγ, và bởi đại lượng δγ.

Trong trường hợp đó, biểu thức (5.2.1) có thể được viết

$$\delta\rho = \frac{\partial\rho}{\partial\gamma}\delta\gamma = \frac{1}{k_{эф}^2}\frac{\partial k_{эф}}{\delta\gamma}\delta\gamma \approx \frac{1}{k_{эф}}\frac{\partial k_{эф}}{\delta\gamma}\delta\gamma = \alpha_\gamma\delta\gamma; \qquad (18.4.5)$$

$$\alpha_\gamma = \frac{\partial\rho}{\partial\gamma} = \frac{1}{k_{эф}}\frac{\partial k_{эф}}{\delta\gamma}. \qquad (18.4.6)$$

Bởi vì độ phản ứng được biểu diễn bằng đại lượng không thứ nguyên, ví dụ, bằng %, nên đơn vị đo của α_γ sẽ là đơn vị nghịch đảo của tỷ trọng, nghĩa là, ví dụ, cm^3/g. Trong thực tế vận hành người ta đưa vào thêm hai đại lượng nữa: hệ số lưu lượng hơi của độ phản ứng

$$\alpha_\beta = \frac{1}{k_{эф}}\frac{\partial k_{эф}}{\delta\beta} = \frac{1}{k_{эф}}\frac{\partial k_{эф}}{\delta\gamma}\frac{\partial\gamma}{\delta\beta} = \alpha_\gamma\frac{\partial\gamma}{\delta\beta}, \qquad (18.4.7)$$

ở đây β – hàm lượng hơi theo lưu lượng và thể tích, và hệ số hơi thực của độ phản ứng

$$\alpha_\varphi = \frac{1}{k_{эф}}\frac{\partial k_{эф}}{\delta\varphi} = \frac{1}{k_{эф}}\frac{\partial k_{эф}}{\delta\gamma}\frac{\partial\gamma}{\delta\varphi} = \alpha_\gamma\frac{\partial\gamma}{\delta\varphi}. \qquad (18.4.8)$$

Lưu ý rằng, theo các định nghĩa (18.4.7) và (18.4.8) thì hệ số hơi của độ phản ứng là đại lượng không thứ nguyên.

Tương tự, có thể đưa ra hệ số độ phản ứng theo hàm lượng hơi, theo lưu lượng nước,...Từ biểu thức (18.4.8) suy ra, mối liên hệ giữa các hệ số hơi và hệ số tỷ trọng của độ phản ứng được xác định bởi đại lượng δγ/δφ. Bởi vì tỷ trọng của hỗn hợp nước-hơi nước γ liên quan với hàm lượng hơi theo lưu lượng và khối lượng β bằng hệ thức

$$\gamma = \rho_в(1-\beta) = \rho_п\beta, \qquad (18.4.9)$$

nên

$$\frac{\partial\gamma}{\delta\beta} = -(\rho_в - \rho_п), \qquad (18.4.10)$$

ở đây, $\rho_в$, $\rho_п$ – tỷ trọng của nước và hơi trên đường bão hoà. Đối với trạng thái làm việc của РБМК-1000 (áp suất ~ 8 MPa, $T_{H_2O}^{вх} = 265^0C$, $\rho_в = 0{,}77$ g/cm^3, $\rho_п = 0{,}05$ g/cm^3) ta có

$$\frac{\partial\gamma}{\delta\beta} = -0,72 \quad \text{g/cm}^3. \qquad (18.4.11)$$

Từ các biểu thức (18.4.8), (18.4.11) suy ra, hệ số hơi của độ phản ứng ngược dấu với hệ số tỷ trọng của độ phản ứng và nhỏ hơn về giá trị tuyệt đối. Giá trị chính xác của hệ số tỷ lệ δγ/δβ được xác định bởi các đặc tính thuỷ nhiệt của quá trình tạo hơi. Trong các thực nghiệm được tiến hành ở các РБМК-1000 đang hoạt động, sự thay đổi độ phản ứng được đo tuỳ thuộc vào hàm lượng hơi thực tính theo thể tích φ. Sự khác biệt giữa các hàm lượng hơi thực và theo lưu lượng φ và β là ở việc tính toán mức trượt giữa các pha lỏng và hơi. Nếu sử dụng hệ thức giữa hàm lượng hơi lưu lượng theo thể tích (β) và theo khối lượng (x), thì

$$\beta = \frac{V_{\text{п}}}{V} = \left(1 + \frac{1-x}{x}\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}}\right)^{-1}. \qquad (18.4.12)$$

$$\varphi = \frac{V_{\text{п}}}{V} = \left(1 + \frac{1-x}{x}\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}}K\right)^{-1}, \qquad (18.4.13)$$

ở đây, K – hệ số trượt giữa pha lỏng và pha hơi.

Từ các biểu thức (18.4.12) và (18.4.13) suy ra

$$\frac{\partial\beta}{\partial\varphi} = \frac{1}{K}\frac{\beta^2}{\varphi^2}. \qquad (18.4.14)$$

Khi đó mối liên hệ giữa hệ số hơi α_φ và hệ số tỷ trọng α_γ đo được của độ phản ứng được xác định bằng biểu thức

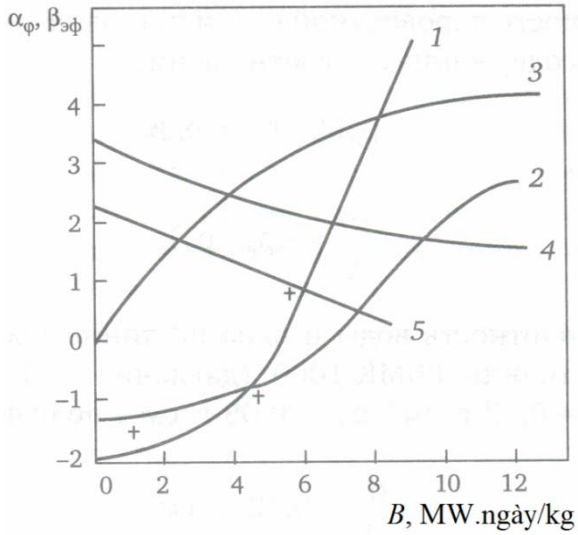
$$\alpha_\varphi = \frac{(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{п}})}{K}\frac{\beta^2}{\varphi^2}\alpha_\gamma. \qquad (18.4.15)$$

Khi hàm lượng hơi trung bình theo lưu lượng và khối lượng x = 0,15, thì hàm lượng hơi theo lưu lượng và thể tích β = 0,78. Trong điều kiện các thông số công tác của РБМК-1000, giá trị của hệ số trượt K = 1,4 – 1,7.

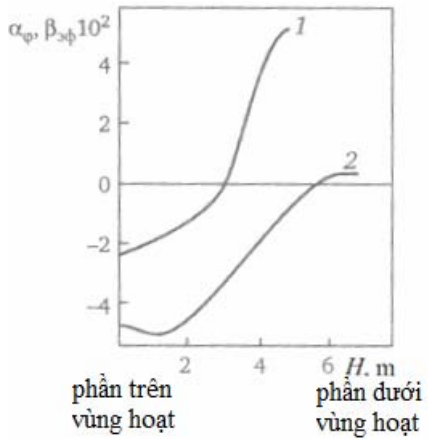
Giá trị số của hệ số tỷ lệ trong biểu thức (18.4.15) giữa α_φ và α_γ trong điều kiện các thông số công tác (β = 0,78, φ = 0,7, K = 1,5) bằng ~ 0,59 – 0,6. Như vậy, mối quan hệ chính xác giữa hệ số hơi và hệ số tỷ trọng của độ phản ứng được xác định bằng biểu thức

$$\alpha_{\varphi} \approx -0,6\alpha_{\gamma}. \qquad (18.4.16)$$

Hệ số hơi của độ phản ứng phụ thuộc vào độ cháy và độ làm giàu ban đầu của nhiên liệu, vào số các chất hấp thụ trong vùng hoạt (các chất hấp thụ bổ sung, các thanh СУЗ), vào công suất (hình 18.15).



Hình 18.15. Sự phụ thuộc hệ số hơi của độ phản ứng vào độ cháy nhiên liệu khi РБМК-1000 hoạt động ở công suất định mức; 1 – α_{φ} (đo); 2 – α_{φ} (tính toán); 3 – C_{Pu} (10^{19} hạt nhân/cm^3); 4 – C_U (10^{19} hạt nhân/cm^3); 5 – $N_{дп}.10^2$



Hình 18.16. Sự thay đổi α_{φ} theo chiều cao vùng hoạt khi РБМК-1000 hoạt động ở công suất định mức: 1 – ở mức công suất tĩnh khi dự trữ độ phản ứng là 40 thanh РР; 2 – cho mẻ nhiên liệu đầu

Hiện nay, khi thực hiện việc chuyển sang nhiên liệu urani-erbi trong РБМК-1000, đang duy trì được α_{φ} trong khoảng 0,3 – 0,8 $\beta_{эф}$.

Hệ số hơi của độ phản ứng có đặc tính phân bố phức tạp trong thể tích vùng hoạt. Ví dụ, sự phân bố α_φ theo chiều cao lò phản ứng phụ thuộc vào mức công suất, sự có mặt và số lượng chất hấp thụ trong từng lớp. Dạng phụ thuộc α_φ (H) đối với chế độ tĩnh, ở mức công suất 100%, khi dự trữ độ phản ứng là 40 thanh PP (đường cong *1*) và đối với mẻ nhiên liệu đầu (đường cong *2*) được trình bày trên hình 18.6.

Các câu hỏi cho mục
"Hệ số hơi của độ phản ứng"

1. α_φ (giá trị và dấu) có ảnh hưởng như thế nào đến an toàn РБМК-1000?
2. Hãy giải thích đặc tính thay đổi của hệ số hơi của độ phản ứng tuỳ thuộc vào độ cháy của nhiên liệu.
3. Trình bày bằng đồ thị sự phụ thuộc hệ số hơi của độ phản ứng vào tỷ trọng hỗn hợp nước-hơi nước cho đường cong 1 trên hình 16.5.

18.5. Các hiệu ứng độ phản ứng khi cạn nước КМПЦ và КО СУЗ

18.5.1. Hiệu ứng độ phản ứng khi cạn nước КМПЦ

Hiệu ứng độ phản ứng khi cạn nước КМПЦ được hiểu là độ phản ứng được đưa vào lò phản ứng khi đẩy nước ra khỏi tất cả các kênh công nghệ. Giá trị và dấu của hiệu ứng này được quyết định bởi thành phần vùng hoạt, trong đó có dạng và độ cháy của nhiên liệu, số lượng các thanh СУЗ được nhúng vào, sự có mặt và số lượng chất hấp thụ bổ sung, độ cao các cột nước. Ví dụ, giá trị này của mẻ nhiên liệu đầu РБМК-1000 trong quá trình khởi động các tổ máy lần thứ hai là: trong trạng thái dưới tới hạn khoảng $-4\beta_{эф}$, còn trong trạng thái tới hạn khoảng $-1{,}5\beta_{эф}$. Trong trường hợp tăng độ cháy của nhiên liệu thì hiệu ứng độ phản ứng khi cạn nước BNL sẽ chuyển từ âm sang dương và tăng lên.

Khi cạn nước các kênh có các chất hấp thụ bổ sung thì độ phản ứng âm được đưa vào, khi cạn nước các kênh có cột nước thì độ phản ứng dương được đưa vào. Hiệu ứng cạn nước của các kênh có các chất hấp thụ bổ sung ở mẻ nhiên liệu đầu là khoảng $-2\beta_{эф}$.

Khi độ làm giàu ban đầu của nhiên liệu là 2,4%, có 70 – 80 chất hấp thụ bổ sung trong vùng hoạt và dự trữ độ phản ứng ở công suất định mức là 43 – 48 thanh PP thì hiệu ứng mất nước КМПЦ, tính theo các chương trình ba chiều quy mô đầy đủ, trong trạng thái tới hạn là $\sim 0{,}2 - 0{,}9\beta_{эф}$, trong trạng thái dưới tới hạn bằng

khoảng – $2\beta_{эф}$. Khi vận hành РБМК-1000 thì hiệu ứng cạn nước КМПЦ được kiểm soát bằng cách tính toán theo các chương trình SADCO, TROЙKA,...

Hiện nay, do sử dụng nhiên liệu urani-erbi nên các số liệu tính toán cho biết sự dịch chuyển hiệu ứng cạn nước КМПЦ vào vùng các giá trị không hoặc âm khi lò phát công suất (xem mục 16.4). Đo trực tiếp hiệu ứng cạn nước КМПЦ trong lò phản ứng đã giải nhiễm đang dừng cho thấy, trong trạng thái tới hạn hiệu ứng cạn nước là dương và vào khoảng ~ 0,7 – $1,8\beta_{эф}$, trong trạng thái dưới tới hạn và tất cả các thanh đều nhúng là âm và bằng khoảng – 1 – $2,5\beta_{эф}$. Để giải thích điều đó, trước hết là giải thích hành vi không rõ ràng của hiệu ứng cạn nước КМПЦ, ta trở lại mục 16.4. Theo biểu thức (16.4.5), hiệu ứng tổng được xác định bởi tổng đại số của hai thành phần: hiệu ứng cạn nước của bản thân các kênh nhiên liệu và hiệu ứng vốn liên quan đến rò rỉ nơtron trong các chất hấp thụ (ДП và СУЗ).

Tuỳ theo mức rút các chất hấp thụ ra mà thành phần âm do rò rỉ trong các chất hấp thụ giảm đi và trong trường hợp rút hết các chất hấp thụ thì thành phần âm đó sẽ được xác định bởi sự hấp thụ trong các kênh СУЗ (43 – 48 thanh). Như vậy, hiệu ứng cạn nước sẽ được xác định chủ yếu bởi hiệu ứng cạn nước của bản thân các kênh có nhiên liệu urni-erbi. Khi lò phát công suất, hiệu ứng này, như suy ra từ hình 16.4, đối với nhiên liệu urni-erbi có độ cháy ~ 12MW ngày/tấn, là gần bằng 0.

Đối với lò phản ứng đã giải nhiễm đang dừng thì hiệu ứng cạn nước của các kênh nhiên liệu có độ cháy như vậy là dương và bằng khoảng ~ $2,5\beta_{эф}$. Vì vậy, trong trạng thái tới hạn, khi có ~ 100 thanh СУЗ nhúng hoàn toàn trong vùng hoạt thì hiệu ứng tổng sẽ vẫn dương và bằng ~ 0,6 – $1,8\ \beta_{эф}$ tuỳ thuộc vào các chất hấp thụ bổ sung còn lại trong vùng hoạt. Trong trạng thái dưới tới hạn, khi tăng số các thanh СУЗ được nhúng hoàn toàn đến ~ 200 do tăng rò rỉ nơtron trong các thanh СУЗ, thì hiệu ứng tổng sẽ trở nên âm.

18.5.2. Hiệu ứng cạn nước của vòng СУЗ trong trạng thái dưới tới hạn

Hiệu ứng cạn nước vòng СУЗ trong trạng thái dưới tới hạn được hiểu là sự thay đổi độ phản ứng khi cạn nước các kênh СУЗ, trong trường hợp các thanh bảo vệ sự cố được nâng lên và các thanh còn lại được nhúng xuống (các thanh УСП được đưa vào vùng hoạt một đoạn 4 m). Các tính toán cho thấy, hiệu ứng cạn nước vòng СУЗ thay đổi trong quá trình hoạt động của lò phản ứng từ – 0,3% (mẻ nhiên liệu đầu) đến + 0,7% (chế độ thay đảo nhiên liệu đã được thiết lập). Điều đó được quy

định bởi độ không đồng đều cháy nhiên liệu theo chiều cao vùng hoạt và bởi kết cấu các thanh СУЗ. Vì vậy để kiểm tra việc đáp ứng các yêu cầu an toàn hạt nhân, cần đo định kỳ (trong thời gian ППР) hiệu ứng cạn nước vòng làm nguội СУЗ. Hiệu ứng cạn nước vòng làm nguội СУЗ trong trạng thái dưới tới hạn được xác định theo sự khác biệt giữa độ dưới tới hạn của lò phản ứng trong các trạng thái có nước và không có nước trong vòng làm nguội, khi tất cả các thanh được nhúng trong vùng hoạt, trừ các thanh bảo vệ sự cố (các thanh УСП được đưa vào vùng hoạt một đoạn 4 m). Hiệu ứng cạn nước vòng làm nguội СУЗ trong trạng thái dưới tới hạn đối với các mẻ nhiên liệu hiện tại của lò РБМК-1000 gần bằng 0.

18.5.3. Hiệu ứng cạn nước vòng làm nguội СУЗ trong trạng thái dưới tới hạn của lò phản ứng khi phát công suất

Khi xem xét hiệu ứng độ phản ứng, vốn xuất hiện khi cạn nước vòng làm nguội СУЗ, trong trường hợp một phần các thanh СУЗ được kéo ra và lò phản ứng nằm trong trạng thái tới hạn, cần lưu ý:

hiệu ứng cạn nước của kênh có thanh СУЗ được nhúng hoàn toàn là âm;

hiệu ứng cạn nước của kênh có thanh СУЗ được kéo ra là dương;

hiệu ứng cạn nước của thanh УСП phụ thuộc vào vị trí của nó và sự phân bố dòng nơtron theo chiều cao.

Xuất phát từ đó, giá trị và dấu của hiệu ứng độ phản ứng phụ thuộc vào số lượng các thanh СУЗ được kéo ra (nhúng vào) và sự phân bố toả năng lượng theo chiều cao trong trạng thái cụ thể của lò phản ứng.

Hiệu ứng cạn nước vòng làm nguội СУЗ trong trạng thái tới hạn khi lò phản ứng phát công suất là dương và bằng $\sim 3 - 4\,\beta_{эф}$. Căn cứ theo dấu và giá trị thì hiệu ứng này là nguy hiểm nhất, theo quan điểm đưa độ phản ứng dương vào. Vì vậy, theo quan điểm an toàn hạt nhân thì việc cạn nước СУЗ trong trạng thái tới hạn là không được phép. Để tránh điều đó, đã tính trước ba hệ thống bảo vệ sự cố với việc sử dụng ba thông số vật lý khác nhau để tạo ra các tín hiệu khẩn cấp: mực nước trong bể khẩn cấp СУЗ, lưu lượng nước trong vòng làm nguội СУЗ, áp suất trong ống góp có áp.

Để giảm hiệu ứng đó, đã chuyển sang sử dụng các thanh СУЗ b.2477-01, trong đó, thay vì cột nước 2,5 m, ở phần trên có thanh đẩy đường kính 70 mm. Việc sử dụng các bộ phận điều chỉnh dạng cụm là giải pháp căn bản giải quyết vấn đề cạn nước

vòng СУЗ. Việc sử dụng chúng cho phép giảm hiệu ứng cạn nước vòng СУЗ xuống dưới 1 $\beta_{эф}$ khi lò phát công suất (xem mục 18.6.5).

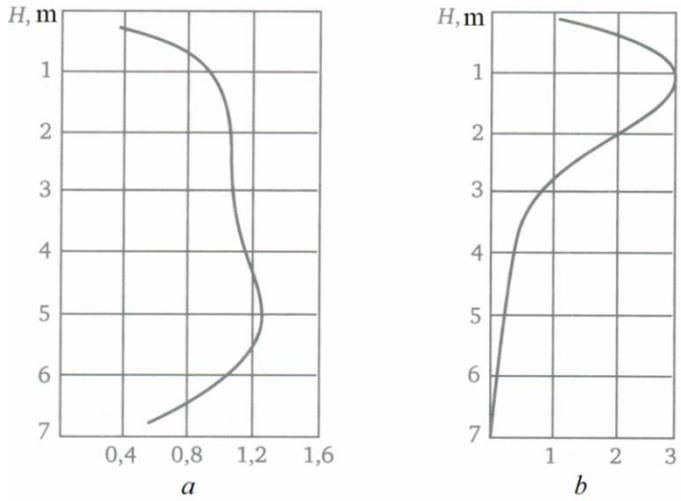
Các câu hỏi cho mục
“Các hiệu ứng độ phản ứng khi cạn nước КМПЦ và КО СУЗ”

1. Cho biết các hiệu ứng độ phản ứng khi cạn nước КМПЦ và КО СУЗ trong lò phản dừng đã giải nhiễm đang dừng và chúng phụ thuộc vào độ cháy nhiên liệu như thế nào?
2. Có những hiệu ứng cạn nước КМПЦ và КО СУЗ nào trong lò phản ứng khi lò phát công suất và các phương pháp làm giảm chúng?

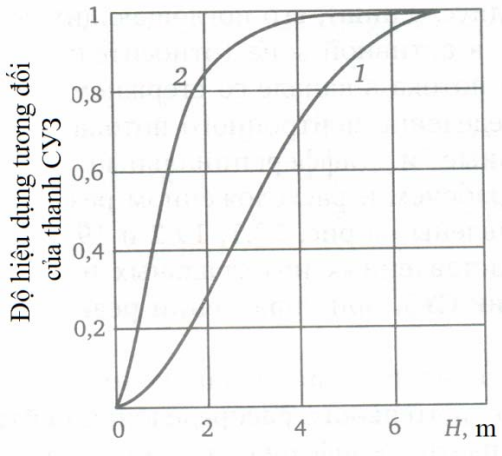
19. AN TOÀN LÒ PHẢN ỨNG

19.1. Độ hiệu dụng của hệ thống điều khiển và bảo vệ РБМК-1000

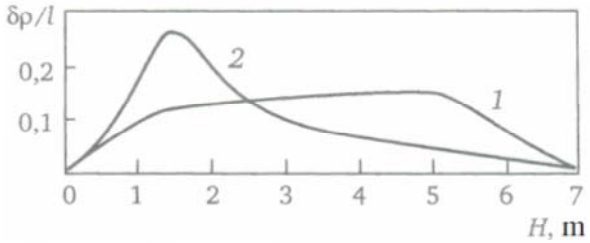
Theo quan điểm vật lý thì các thanh СУЗ được đặc trưng bởi độ hiệu dụng và các đặc tính vi phân và tích tích phân. Độ hiệu dụng của các thanh СУЗ – đó là độ phản ứng mà thanh có thể điều hoà khi đưa vào vùng hoạt và giải phóng tương ứng khi đưa ra khỏi vùng hoạt. Độ hiệu dụng tương tác của thanh đến độ phản ứng được xác định bởi tỷ phần nơtron bị nó hấp thụ trong vùng hoạt, cũng như rò rỉ bổ sung các nơtron từ lò phản ứng do biến dạng phân bố dòng nơtron. Tuỳ thuộc vào hình dạng, kích thước của thanh và vị trí của nó trong vùng hoạt mà hiệu ứng rò rỉ có thể là 50% hiệu ứng hấp thụ.



Hình 19.1. Phân bố trung bình của dòng nơtron theo chiều cao lò phản ứng: trong trạng thái làm việc (a); trong trạng thái nguội, đã giải nhiễm (b)



Hình 19.2. Độ hiệu dụng tương đối của thanh СУЗ trong các trạng thái làm việc (*1*); trong trạng thái nguội, đã giải nhiễm (*2*) tuỳ thuộc vào độ nhúng sâu (đặc tính tích phân)



Hình 19.3. Độ hiệu dụng tương đối của một đơn vị chiều dài *l* của thanh СУЗ trong các trạng thái làm việc (*1*); trong trạng thái nguội, đã giải nhiễm (*2*) tuỳ thuộc vào độ nhúng sâu (đặc tính vi phân)

Độ hiệu dụng của thanh СУЗ được quyết định bởi sự phân bố dòng nơtron theo chiều hướng tâm của lò phản ứng và tỷ lệ với đại lượng $\left(\Phi / \bar{\Phi}\right)^2$, ở đây, Φ – mật độ dòng nơtron trong kênh có thanh СУЗ; $\bar{\Phi}$ – phân bố trung bình của mật độ dòng nơtron theo chiều hướng tâm lò phản ứng.

Độ hiệu dụng của thanh СУЗ không có nước cao hơn độ hiệu dụng của thanh có nước, đó là do một phần nơtron bị hấp thụ trong nước chảy quanh thanh. Khi mất nước trong vòng làm nguội СУЗ, các thanh bị mất "màn nước", dòng nơtron nhiệt va vào nó tăng lên, làm tăng độ hiệu dụng của nó. Khi xả nước từ КМПЦ thì độ hiệu dụng của các thanh СУЗ tăng thêm do tăng độ dài dịch chuyển của các nơtron trong lò phản ứng (hấp thụ trong nước giảm đi). Nói chung, độ hiệu dụng tuyệt đối của thanh СУЗ phụ thuộc vào kích thước lò phản ứng (bán kính), các tích chất vật lý của vùng hoạt (độ dài vận chuyển), các kích thước thanh СУЗ (bán kính, độ

dài), các tính chất hấp thụ của nó và vị trí của nó trong vùng hoạt (sự phân bố tương đối của dòng nơtron trong kênh có thanh СУЗ).

Sự phân bố tương đối của dòng nơtron theo chiều cao lò phản ứng, các đặc tính vi phân và tích phân của các thanh СУЗ trong các trạng thái làm việc và trạng thái cạn nước đã giải nhiễm được trình bày trên các hình 19.1, 19.2 và 19.3. Xuất phát từ các đặc tính vi phân và tích phân của СУЗ đã trình bày ở trên, khi điều khiển lò phản ứng cần ghi nhớ:

độ phản ứng đã có, phụ thuộc cả vào vị trí của thanh СУЗ và sự phân bố tương đối của dòng nơtron theo chiều hướng tâm (phẳng, ngoại biên), cả vào vị trí của thanh СУЗ theo chiều cao lò phản ứng và sự phân bố dòng nơtron theo chiều cao;

độ hiệu dụng của thanh СУЗ trong lò phản ứng cạn nước đã giải nhiễm sẽ có ở phần trên của vùng hoạt (từ 0 đến 3 m). Vì vậy, khi điều hoà độ phản ứng dương dư sau khi nhúng thanh СУЗ sâu hơn 3 m thì nó không còn đưa được độ phản ứng âm vào, và để tiếp tục điều hoà độ phản ứng dương còn lại cần lấy thanh СУЗ tiếp theo nằm ở đầu phía trên;

bộ tự động điều chỉnh tinh công suất cần được đặt ở vị trí 1 ± 0,5 m, bởi vì ở vị trí đó nó có độ hiệu dụng tối đa. Khi nhúng sâu hơn 3 m cần đặt nó ở vị trí 1 m vì các thanh СУЗ khác được nhúng vào.

Độ hiệu dụng tối thiểu của hệ thống điều khiển và bảo vệ cần phải ở mức sao cho khi chuyển từ trạng thái làm việc với công suất định mức có dự trữ độ phản ứng được phép cực đại sang trạng thái có hệ số tái sinh hiệu dụng cực đại (đã giải nhiễm và đã làm nguội) mà lò phản ứng vẫn ở trạng thái dưới tới hạn và có độ dưới tới hạn không dưới 1%. Đối với РБМК-1000, đại lượng đó được xác định bởi tổng các hiệu ứng độ phản ứng sau đây: giải nhiễm lò phản ứng, làm nguội grafit từ nhiệt độ làm việc xuống 180^0C, làm nguội toàn bộ lò phản ứng từ 180 xuống 20^0C, hiệu ứng công suất. Bởi vì các hiệu ứng độ phản ứng thay đổi rất nhiều kể từ lúc đầu đến khi đạt trạng thái tĩnh, nên người ta chọn tổng cực đại của các hiệu ứng đó. Tổng này có được từ lúc đầu, khi mà hiệu ứng làm nguội dương lớn, hệ số công suất cực đại, còn hiệu ứng làm nguội của grafit bằng 0, và tổng này được tính toán như sau:

$$\Delta\rho_{Xe} \approx 2{,}98\%,\ \Delta\rho_t = 10.10^{-5}(284 - 20) = 2{,}64\%,$$

$$\Delta\rho_w = 2{,}2.10^{-6}.3200 = 0{,}7\%,\ \Delta\rho_{подкр} = 1\%,$$

$$\Delta\rho_{зап} = 1{,}5\%,\ \Delta\rho_{СУЗ} = 2{,}98 + 2{,}64 + 1{,}5 \approx 8{,}8\%.$$

Các câu hỏi cho mục "Độ hiệu dụng của hệ thống điều khiển và bảo vệ РБМК-1000"

1. Tại sao cần phải sử dụng các thanh УСП?
2. Các đặc tính vi phân và tích phân của các thanh СУЗ trong lò phản ứng dưới tới hạn là gì?
3. Phân bố trường nơtron theo chiều cao trong lò phản ứng đã dừng và khi lò phản ứng hoạt động phát công suất là như thế nào?

19.2. Phân tích một số rắc rối đã xảy ra trong РБМК-1000

Mặc cho các biện pháp an toàn, các dạng lò phản ứng vẫn là các mối nguy hiểm cao và trong quá trình vận hành chúng vẫn có thể xuất hiện các tình huống tiền sự cố và sự cố khác nhau. Phân tích kỹ lưỡng và giải thích đúng đắn các tình huống đó là cần thiết để các nhân viên NMĐHN nhận thức được mức độ trách nhiệm khi hành động trong các tình huống bất thường xảy ra, và không để các tình huống tương tự lặp lại khi tiếp tục vận hành. Để làm ví dụ, ta xét hai trường hợp rắc rối đã xảy ra trong РБМК-1000.

19.2.1. Rắc rối ở tổ máy số 1 NMĐHN Smolensk, ngày 21-22 tháng 11 năm 1992

Tổ máy nằm trong trạng thái dừng, người ta đã đo các hiệu ứng độ phản ứng trong các thực nghiệm – khi vòng làm nguội СУЗ đầy nước (thực nghiệm số 1), với vòng làm nguội cạn nước (thực nghiệm số 2) và sau khi lại cấp đầy nước cho vòng làm nguội СУЗ (thực nghiệm số 3). Khi thực hiện thực nghiệm thứ 3 đã nhận thấy độ phản ứng thay đổi đột biến sau khi rút cặp thanh РР tiếp theo ra, cặp thanh này, theo dự kiến, sẽ đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn. Độ phản ứng dư trong quá trình chuyển tiếp đó được đánh giá vào khoảng gần bằng $0{,}7\,\beta_{эф}$, chu kỳ lò phản ứng ~ 5,5 s. Đà tăng công suất đã được hãm lại nhờ khởi động hệ thống bảo vệ tự động theo tốc độ, cùng một lúc trong hai dải, dải khởi động và dải làm việc, theo mức đặt 20 s. Đà tăng công suất của lò phản ứng diễn ra với chu kỳ không đổi trong khoảng thời gian 30 s kể từ thời điểm thiết bị đo độ phản ứng bắt đầu ghi nhận được bằng kênh dòng và kênh độ phản ứng, đến khi khởi động БАЗ.

Tiền sử của biến cố đó có liên quan với việc cải tiến vòng làm nguội СУЗ, ở việc lắp đặt van của các thùng tuần hoàn (АО-3110) trên ống nhánh nhằm giảm xả khí ^{41}Ar khi vận hành bình thường. Trước khi khởi động vòng làm nguội СУЗ đáng ra van đó đã cần phải đóng và giữ ở trạng thái đó để khử khí trong khoảng vài giờ.

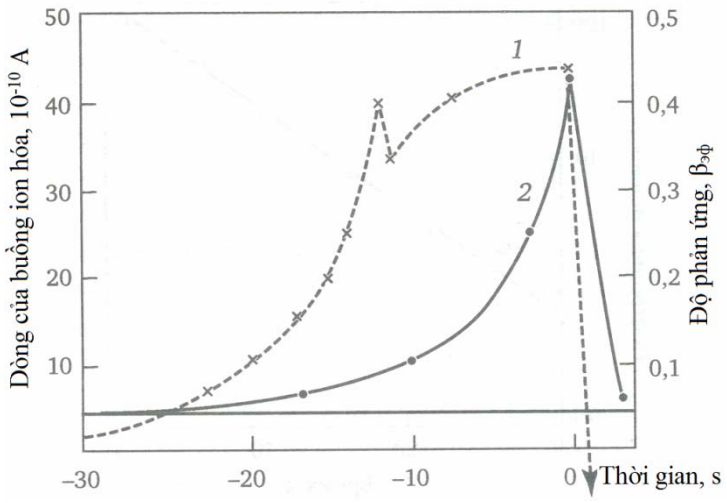
Rắc rối đã bắt đầu từ việc, van AO-3110 đã không đóng trước khi các máy bơm của vòng làm nguội СУЗ khởi động để tiến hành thực nghiệm số 3. Những chỉ dẫn mâu thuẫn và không rõ ràng trong Bản hướng dẫn vận hành vòng làm nguội СУЗ là nguyên nhân trực tiếp dẫn đến sai lầm của nhân viên vận hành. Tiếp sau, trong quá trình tiến triển của các biến cố, việc khử khí vòng làm nguội СУЗ đã không được tiến hành.

Việc tăng nhịp độ rút các thanh là sự việc gắn liền với rắc rối đó. Trong hướng dẫn trình tự rút các thanh đã quy định về sự cần thiết giữ 2 phút trước khi rút mỗi nhóm tiếp theo gồm bốn hoặc hai thanh. Việc giữ như vậy là cần thiết, như đã thấy trong mục 18.1, là để cho nhân viên vận hành cố định trạng thái tới hạn và hạn chế nhịp độ chung đưa độ phản ứng vào để tránh đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn với chu kỳ sự cố ngắn. Trong trường hợp đó, nhịp độ đưa độ phản ứng vào đã vượt quá khoảng 1,4 lần. Nhân viên vận hành cho rằng, theo kết quả đưa vào trạng thái tới hạn trong thực nghiệm số 1, đã biết chính xác số các thanh СУЗ được rút ra trong trạng thái tới hạn, mà đã không đánh giá đầy đủ rằng, giữa các lần thứ nhất và thứ ba đưa lò vào trạng thái tới hạn, vòng làm nguội СУЗ đã cạn nước.

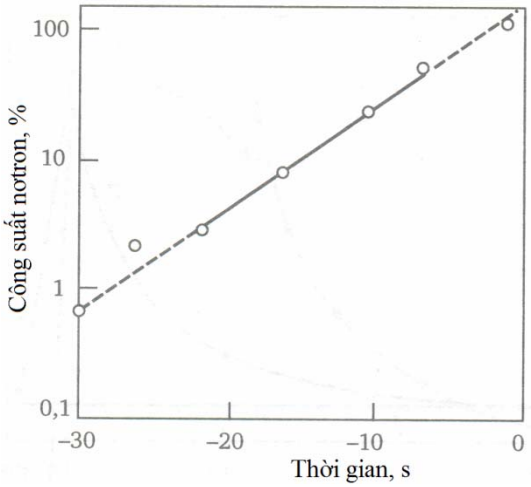
Khi rắc rối, có hai biểu đồ đặc trưng cho mật độ dòng nơtron được ghi lại: dòng tổng của 12 buồng ion hoá nối với thiết bị đo độ phản ứng, và tín hiệu ra của thiết bị đo độ phản ứng (hình 19.4).

Để đánh giá tốc độ thay đổi công suất nơtron theo thủ tục thông thường: xây dựng theo thang logarit sự phụ thuộc vào thời gian của công suất tương đối tính theo phần trăm của giá trị cực đại trừ đi giá trị phông. (hình 19.5).

Độ dốc của đường thẳng đó tương ứng với chu kỳ không đổi trong khoảng thời gian 30 s, bằng 5,5 ± 0,4 s, lượng đó tương đương với độ phản ứng dư 0,68 $\beta_{эф}$.



Hình 19.4. Sự phụ thuộc của dòng tổng của các buồng ion hoá và các chỉ số của thiết bị đo độ phản ứng vào thời gian: 1 – độ phản ứng; 2 – dòng của buồng ion hoá; 3 – dòng phông của buồng ($4{,}4.10^{-10}$)



Hình 19.5. Sự phụ thuộc của công suất nơtron tương đối vào thời gian

Phân tích các số liệu đó theo trình tự ghi được của các biến cố cho phép rút ra các kết luận. Các kết luận này luôn được áp dụng mà không phụ thuộc vào nguyên nhân biến đổi đột ngột độ phản ứng:

lò phản ứng chuyển vào chế độ tới hạn trước lúc tín hiệu của các buồng đo độ phản ứng cao hơn phông (các buồng đã chuyển vào dải nhạy), nghĩa là, thời điểm đạt đến độ tới hạn dưới 30 s;

từ thời điểm các buồng ion hoá chuyển vào dải đó, mật độ dòng nơtron đã tăng lên với chu kỳ không đổi ~ 5,5 s;

đà tăng công suất vẫn tiếp tục, với mức độ nhỏ hơn, trong 30 s với chu kỳ đó trước khi lò phản ứng đã được dừng do khởi động thiết bị bảo vệ tự động theo tốc độ trong các dải khởi động và dải làm việc (các mức đặt khởi động là 20 s). Điều đó chứng tỏ rằng, thiết bị bảo vệ tự động đã không ghi nhận đà tăng công suất trong suốt quãng thời gian tạm thời đó;

bởi vì chu kỳ đã không đổi nên lượng dư độ phản ứng cũng không đổi. Giá trị này được đánh giá là 0,68 ± 0,2 $\beta_{эф}$. Theo công thức

$$T = \tau_{зап}\frac{1-\rho}{\rho}; \qquad \rho = \frac{\tau_{зап}}{T+\tau_{зап}},$$

ở đây, ρ – lượng dư độ phản ứng, đo bằng ; T – chu kỳ, s; $\tau_{зап}$ – thời gian sống trung bình của các nơtron trễ 11,6 s (phép gần đúng đơn nhóm);

việc đưa vào lượng dư độ phản ứng gần như trùng về thời gian với việc rút hai thanh của nhóm thứ 15.

Khi phân tích những rắc rối thì dường như độ hiệu dụng cực đại của một thanh đơn PP là 0,79%, hoặc 1,4 $\beta_{эф}$, độ hiệu dụng cực đại của một cặp thanh là 2,14%, hoặc 3,75 $\beta_{эф}$, trung bình là 1,9 $\beta_{эф}$ mỗi thanh.

Trong số các giả định khác nhau về sự kiện rắc rối, có một được khẳng định: có không khí trong vòng làm nguội СУЗ kết hợp với tăng độ hiệu dụng của nhóm cuối cùng trong số các nhóm thanh được rút ra. Có lẽ phải giả định rằng, không khí đang tích tụ ở phần trên của các kênh СУЗ một lượng đủ để làm dịch chuyển điểm đạt độ tới hạn đến mức mà lò phản ứng đạt đến đúng lúc đã rút hai thanh của nhóm 14/2. Sự biến đổi nhanh chóng độ phản ứng diễn ra khi rút các thanh của nhóm 15/1. Một nhóm duy nhất không thể có đóng góp đáng kể vào độ phản ứng dư – nhóm 15/1, như vậy, phần cạn nước phía trên của vòng làm nguội СУЗ đáng phải đem lại độ phản ứng cần thiết để chuyển lò phản ứng vào trạng thái tới hạn trước khi rút nhóm 15/1,2. Do vậy, phần cạn nước phía trên đáng phải đem lại độ phản ứng hơn + 0,43 $\beta_{эф}$ (độ hiệu dụng tổng của các thanh nhóm 15/1,2), tương ứng với độ cao của phần đó ~ 0,25 m ở phía trên vùng hoạt. Nếu ở phía trên có một lượng không khí như vậy, còn mực nước trong các kênh, khi rút các thanh, giảm xuống chí ít cũng ngang độ cao của cột nước từ thanh đến thanh đẩy, tổng độ phản ứng đưa vào khoảng ~ 0,65 $\beta_{эф}$, lượng này hoàn toàn phù hợp với giai đoạn đã được ghi chép.

Lưu ý rằng, trong quá trình khảo sát rắc rối trên đây, những sai lầm và vi phạm sau đây đã được phát hiện:

van AO-3110 khi khởi động lại các máy bơm KO СУЗ đã không được đóng;

vòng làm nguội СУЗ đã không được khử khí;

độ ổn định hoạt động của vòng làm nguội СУЗ đã không được kiểm tra;

giữa các lần rút các nhóm thanh đã không giữ một khoảng thời gian 2 phút;

việc gần đến trạng thái tới hạn đã không được kiểm tra đều;

thủ tục tháo cạn (bơm vào) vòng làm nguội СУЗ, vốn dẫn đến sự thay đổi trạng thái vùng hoạt, đã không được đánh giá đầy đủ.

Cần lưu ý thêm rằng, để bảo đảm an toàn khi gần đến trạng thái tới hạn cần phải kiểm tra trạng thái lò phản ứng và thực hiện nghiêm quy định về tốc độ rút các thanh (thời gian giữ).

19.2.2. Rắc rối ở tổ máy số 4 NMĐHN Kursk, ngày 8 tháng 4 năm 1999

Tổ máy đã được đưa vào trạng thái tới hạn sau khi sửa chữa. Khi rút thanh РР 32-15 đã ghi nhận sự suy giảm không kiểm soát được của chu kỳ lò phản ứng, điều đó dẫn đến khởi động БАЗ.

Theo hướng dẫn, khi bắt đầu rút các thanh cần xác định trình tự rút, nghĩa là xác định trình tự chuyển trạng thái lò phản ứng, vốn giúp thực hiện an toàn quá trình đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn, phải luôn luôn chấp hành quy định hạn chế tốc độ đưa độ phản ứng vào và yêu cầu duy trì hệ số không đồng đều. Trình tự chuyển trạng thái lò phản ứng đã được xác định trên cơ sở tính toán theo chương trình МКУ. Đã tính toán kiểm tra lại theo chương trình БОКР, những tính toán này đã khẳng định rằng, hệ số không đồng đều đối với nhóm đã cho là từ 2,53 đến 3,26, nằm trong mức hạn chế là 3,5. Trình tự rút các thanh nêu trên được đánh giá là hợp lý và được khuyên dùng.

Trong thời gian chuyển vào trạng thái tới hạn, qua chừng 15 s sau khi rút thanh РР 32-15 thì thiết bị bảo vệ khẩn cấp đã khởi động. Theo các số liệu ДРЕГ cung cấp, có thể đánh giá rằng, khoảng thời gian từ tín hiệu cảnh báo đầu tiên của УЗСП-1 đến lúc hình thành АЗСР, БАЗ và АЗ-5 là gần 10 – 12 s. Như vậy, khoảng thời gian từ lúc rút thanh РР 32-15 đến lúc xuất hiện tín hiệu cảnh báo đầu tiên của kênh bảo vệ theo tốc độ tăng công suất trong chế độ khởi động là gần 4 – 6 s. Theo các mức đặt phát tín hiệu cảnh báo và tín hiệu khẩn cấp trong các kênh АЗСМ và

АЗСП thì việc sử lý các số liệu của ДРЕГ cho phép đánh giá độ phản ứng được đưa vào là 0,3 – 0,6 $\beta_{эф}$.

Theo các kết quả khảo sát thì các nguyên nhân của tình huống khẩn cấp là:

trình tự rút các thanh sai đã dẫn đến hậu quả làm mất chính xác các tính toán theo chương trình МКУ;

nhân viên vận hành không tuân thủ các yêu cầu của mục 7.18.5, Quy định công nghệ vận hành về thời gian giữ giữa các lần rút các nhóm thanh;

không tuân thủ yêu cầu của Quy trình loại trừ các sự cố thiết kế, các tình huống khẩn cấp và các vi phạm vận hành bình thường ở các tổ máy số 3 và số 4 NMĐHN Kursk trong việc đưa nhanh các thanh СУЗ vào vùng lắp đặt các buồng ion hoá của các kênh, mà theo đó hình thành các tín hiệu cảnh báo về tốc độ tăng công suất.

Những tính toán sau rắc rối, bằng các chương trình hiện đại ba chiều SADCO và BARS, khẳng định rằng, trình tự đã chọn là sai. Trong quá trình đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn, hệ số không đồng đều phân bố dòng nơtron đã vượt quá giá trị cho phép, khi rút thanh cuối cùng 32-15 là bằng khoảng ~ 17, trong khi đó độ hiệu dụng của thanh được rút ra vượt quá 1,5 $\beta_{эф}$. Dù không coi nhẹ lỗi của nhân viên vận hành đã không tuân thủ thời gian giữ cần thiết giữa các lần rút thanh và cách thức rút từng bước, cũng cần lưu ý đến sự không hoàn thiện của các chương trình khuếch tán hai chiều МКУ và БОКР, vốn được sử dụng để xác định trình tự đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn. Thật vậy, theo các nguyên nhân được chỉ ra trong mục 17, chúng không cung cấp được những đánh giá tin cậy về các hệ số không đồng đều, và tương ứng là, độ hiệu dụng của các thanh khi đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn.

Theo kết quả nghiên cứu các rắc rối kèm theo tăng công suất không kiểm soát được, đã áp dụng các biện pháp cảnh báo sự xuất hiện các rắc rối tương tự khi tiếp tục vận hành РБМК-1000.

Tài liệu tham khảo phần III

1. **Доллежаль Н.А., Емельянов И.Я**. Канальный ядерный энергетический реактор. М., Атомиздат, 1980 г.
2. **Михайлов М.Н., Ухаров С.Г., Потанова В.П. и др**. Управляющие системы канальных водографитовых реакторов. Доклад на международной научно-

технической конференции «Канальные реаторы: проблемы и решения», Москва-Курчатов, 19 – 22 октября 2004 г.

3. **Исаев Н.В. и др**. Влияние выгорающих примесей в графите на показатели РБМК-1000, Атомная энергия, т.59, вып. 4, 1985 г.
4. **F. Seitz and J.S Koehler**. The Theory of Lattice Displacements Produced During Irradiation. Proceeding of the Second United Nations International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy. Vol. 7, pp. 615 – 633, USA, 1958.
5. **W.A. Meyer**. Stored Energy in Irradiated Graphite, University of Missouri, Research Reactor Facility, December 10, 1986.
6. **Белянин Л.А., Лебедев В.Н., Рязанцев Е.П., Гарусов Ю.В. и др**. Безопасность АЭС с канальными реакторами. Реконструкция активной зоны., М., Энергоатомиздат, 1997 г.
7. **Канальный** ядерный энергетический реактор РБМК, Москва, Изд-во "ГУПНИКИЭТ", 2006 г.
8. **Kachanov V.M., Kuzmin A.N., Jitarev V.E**. RBMK graphite reator: uniform configurations of U(1.8, 2.0, or 2.4% ^{235}U)O_2 fuel assemblies, and configurations of U(2.0% ^{235}U)O_2 assemblies with empty channels, water columns, and boron or thorium absorbers, with or without water in channels. In: NEA Nuclear Science Committee International Handbook of Evaluated Criticality Safty Benchmark Experiments, Volume IV, LEU-COMP-THERM-060, 2003.
9. **Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев Ц.А., Соловьев С.Л**. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М, изд-во МЭИ, 2003.

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

АЗ	bảo vệ sự cố.
а.з.	vùng hoạt
АЗРТ	bảo vệ sự cố của cụm thiết bị lò phản ứng theo các thông số công nghệ
АЗС	bảo vệ sự cố theo tốc độ
АЗСП	bảo vệ sự cố theo tốc độ tăng công suất trong dải khởi động
АЗСР	bảo vệ sự cố theo tốc độ tăng công suất trong dải làm việc
АКНП	thiết bị kiểm tra dòng nơtron
АР	thiết bị điều chỉnh tự động
АРМ	thiết bị tự động điều chỉnh công suất
АЭС	nhà máy điện hạt nhân (NMĐHN)
БАЗ	bảo vệ sự cố nhanh
БИК	buồng ion hoá bên sườn
БРУ-К	cơ cấu cảm ứng tác động nhanh của các bình ngư
БСМ	giảm nhanh công suất (РБМК)/hệ thống giảm công suất bằng bor (ВВЭР)
БЩУ	bảng điều khiển trung tâm
ВВЭР	lò năng lượng nước-nước
ВКУ	các thiết bị trong lòng lò phản ứng
ВРД	cảm biến trong lòng lò phản ứng
ВРД-в	cảm biến theo chiều cao trong lòng lò phản ứng
ВРД-р	cảm biến theo chiều hướng tâm trong lòng lò phản ứng
ВХР	chế độ hoá học nước đầu vào
ГЗЗ	khoá chặn chính
ГПЗ	khoá hơi chính
ГЦК	vòng tuần hoàn chính
ГЦН	máy bơm tuần hoàn chính
ДКЭВ	cảm ứng kiểm soát toả năng lượng
ДКЭ (в)	detector kiểm soát toả năng lượng (theo chiều cao)
ДКЭ(р)	detector kiểm soát toả năng lượng (theo chiều hướng tâm)
ДП	chất hấp thụ bổ sung
ДПЗ	cảm biến nạp trực tiếp
ДПК	chất hấp thụ bổ sụng dạng cụm
ЗРК	van điều chỉnh hãm
ИК	buồng ion hoá

ИРГ khí phóng xạ trơ
КГО kiểm tra độ kín vỏ bọc
КД thiết bị điều áp
КИУМ hệ số sử dụng công suất đặt
КМПЦ vòng tuần hoàn cưỡng bức nhiều lần
КНИ kênh đo nơtron
КОСУЗ vòng làm nguội СУЗ
КРБ kiểm soát an toàn phóng xạ
КРО bộ phận điều chỉnh dạng cụm
КСКУЗ hệ thống tổng hợp kiểm soát điều khiển vào bảo vệ
ЛАЗ bảo vệ sự cố nội vùng
ЛАР thiết bị tự động điều chỉnh nội vùng
ЛАР-БИК các thanh điều chỉnh tự động của buồng ion hoá bên sườn
ЛАЭС Nhà máy điện hạt nhân Leningat
МКУ mức công suất tối thiểu kiểm soát được
НЗ khoá có áp
НК ống góp có áp
НТД tài liệu kỹ thuật-định mức
ОЗР dự trữ vận hành độ phản ứng
ОПБ các quy tắc chung bảo đảm an toàn nhà máy điện hạt nhân
ОР bộ phận điều chỉnh
ОТВС bó nhiên liệu (BNL) đã cháy
ОЭТВС bó nhiên liệu (BNL) urani-erbi đã cháy
ПБЯ РУ quy tắc an toàn hạt nhân cụm thiết bị lò phản ứng
ПЗ bảo vệ trước
ПКР hệ số hơi của độ phản ứng
ПК-РР tái điều hoà của các thanh РР
ППР sửa chữa theo kế hoạch định trước
ПС СУЗ các thanh hấp thụ điều khiển và bảo vệ
РБМК lò phản ứng công suất lớn dạng kênh
РГК ống góp dạng nhóm phân phối
РЗМ máy bốc xếp
РОМ cơ cấu giảm tải và hạn chế công suất
РП khoảng không trong lò phản ứng
РР bộ điều chỉnh bằng tay
РУ cụm thiết bị lò phản ứng
РЩУ bảng điều khiển dự phòng

САОЗ hệ thống làm nguội khẩn cấp vùng hoạt
САОР hệ thống làm nguội khẩn cấp lò phản ứng
СВП các thanh hấp thụ cháy
СВРК hệ thống kiểm soát trong lòng lò phản ứng
СКП hệ thống kiểm soát thay đảo nhiên liệu
СКУЗ hệ thống kiểm soát điều khiển và bảo vệ
СЛА hệ thống cách ly (khoanh vùng) sự cố
СРК van điều chỉnh-chặn
СТВС BNL chưa sử dụng
СУЗ hệ thống điều khiển và bảo vệ
СФКРЭ (в) hệ thống vật lý kiểm soát phân bố toả năng lượng theo chiều cao
СФКРЭ(р) hệ thống vật lý kiểm soát phân bố toả năng lượng theo chiều hướng tâm
СЦК hệ thống kiểm soát tập trung
СЦР phản ứng dây chuyền tự duy trì
ТВК caset nhiên liệu
ТВС bó nhiên liệu (BNL)
ТВСА bó nhiên liệu thay thế
твэл thanh nhiên liệu
ТГ máy phát tuabin
ТК kênh công nghệ
УЗ-ЗАР bảo vệ theo suy giảm dự trữ độ phản ứng
УРБ giảm tải khẩn cấp tổ máy
УСП thanh hấp thụ rút ngắn
УТВС bó nhiên liệu đã được chuẩn định
ЭТВС bó nhiên liệu urani erbi
ЯЭУ cụm thiết bị năng lượng hạt nhân

MỤC LỤC

Trang
LỜI NÓI ĐẦU
Phần 1. CƠ SỞ VẬT LÝ LÒ PHẢN ỨNG NƠTRON NHIỆT
1. NHỮNG KIẾN THỨC CẦN THIẾT TRONG VẬT LÝ HẠT NHÂN
1.1. Những đại lượng cơ bản và đơn vị nguyên tử của các đại lượng đó
1.2. Các dạng tương tác của các hạt cơ bản
1.3. Các hạt chủ yếu trong hạt nhân
1.4. Các tiên đề mô hình nguyên tử của Bor
1.5. Các nuclit
1.6. Năng lượng liên kết hạt nhân
1.7. Thu nhận năng lượng hạt nhân
1.8. Các dạng phân rã phóng xạ cơ bản của các hạt nhân
1.9. Định luật phân rã phóng xạ các hạt nhân
1.10. Tác động của lực hạt nhân trong hạt nhân
1.11. Các hạt nhân bền và không bền
1.12. Mô hình giọt của hạt nhân
1.13. Các mô hình khác của hạt nhân
2. NHỮNG KIẾN THỨC CẦN THIẾT TRONG VẬT LÝ NƠTRON
2.1. Nơtron
2.2. Các đặc tính của trường nơtron
2.3. Tiết diện hiệu dụng của tương tác
2.4. Tiết diện vĩ mô
2.6. Tương tác của các nơtron với các hạt nhân
2.7. Sự phụ thuộc của tiết diện vào nhiệt độ môi trường
2.8. Phân hạch hạt nhân
2.9. Các nuclit phân hạch và nuclit tái sinh
2.11. Tốc độ phản ứng và quá trình tỏa năng lượng trong lò phản ứng
2.12. Tỏa năng lượng dư
2.13. Làm chậm và hình thành phổ nơtron trong vùng hoạt
2.13.1. Phổ các nơtron phân hạch
2.13.2. Phổ các nơtron được làm chậm
2.13.3. Phổ các nơtron nhiệt
3. NHỮNG KHÁI NIỆM CƠ BẢN CỦA VẬT LÝ LÒ PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

3.1.Chất làm chậm nơtron
3.2. Khả năng làm chậm
3.3. Hệ số làm chậm
3.4. Hệ số tái sinh nơtron trong môi trường vô tận k_∞
3.5. Công thức bốn thừa số
3.6. Hệ số tái sinh hiệu dụng
3.7. Hiệu ứng làm chậm
3.8. Ảnh hưởng của khối phản xạ
3.9. Phân bố không gian của các dòng nơtron nhanh và nơtron nhiệt

4. NGUYÊN LÝ TÍNH TOÁN LÒ PHẢN ỨNG
4.1. Tính toán chuyển dịch các nơtron và các phép gần đúng được sử dụng
4.2. Dạng tổng quát của phương trình khuếch tán
4.3. Phương trình vi phân cho các nơtron nhiệt và giải phương trình đó cho các dạng hình học đơn giản
4.4. Phép gần đúng theo độ tuổi-khuếch tán
4.5. Các điều kiện tới hạn trong phép gần đúng theo độ tuổi-khuếch tán
4.6. Độ tuổi nơtron
4.7. Diện tích dịch chuyển của các nơtron
4.8. Phép gần đúng khuếch tán đa nhóm

5. CÁC HIỆU ỨNG ĐỘ PHẢN ỨNG
5.1. Khái niệm độ phản ứng
5.2. Khái niệm hiệu ứng và hệ số độ phản ứng
5.4. Điều hòa độ phản ứng

6. QUÁ TRÌNH CHÁY, NHIỄM ĐỘC VÀ TẠO XỈ CỦA LÒ PHẢN ỨNG
6.2. Tích tụ và thoát ^{135}Xe
6.3. Ảnh hưởng của xenon đến hoạt động của các lò phản ứng trong các chế độ chuyển tiếp
6.4. Dao động xenon
6.5. Nhiễm độc ^{149}Sm
6.6. Nhiễm độc lò phản ứng do các nuclit khác
6.7. Độ cháy

7. NGUYÊN LÝ ĐỘNG HỌC LÒ PHẢN ỨNG
7.1. Mô hình đơn giản nhất của động học lò phản ứng
7.2. Phương trình động học điểm
7.3. Giải các phương trình động học điểm
7.4. Sự phụ thuộc của chu kỳ lò phản ứng vào độ phản ứng
7.5. Một số khía cạnh thực tế áp dụng phương trình động học lò phản ứng

8. ĐIỀU CHỈNH LÒ PHẢN ỨNG
8.1. Các bộ phận điều chỉnh, СУЗ
8.2. Các dạng thanh hấp thụ
8.3. Độ hiệu dụng của các thanh hấp thụ
8.4. Gia tăng nơtron trong lò phản ứng dưới tới hạn
8.5. Sự phụ thuộc của dòng vào tốc độ đưa độ phản ứng vào, khi đưa lò phản ứng vào МКУ
Tài liệu tham khảo phần I
Phần II. NHỮNG ĐẶC ĐIỂM VẬT LÝ VÀ VẬN HÀNH WWER
9. THIẾT BỊ WWER
9.1. Những đặc tính vật lý-nhiệt cơ bản của WWER
9.2. Vỏ lò phản ứng và các trang bị bên trong vỏ lò
9.3. Vùng hoạt
9.4. Các hệ thống điều khiển và bảo vệ
9.5. Hệ thống kiểm soát lò phản ứng
10. NHỮNG ĐẶC ĐIỂM CỦA CÁC ĐẶC TÍNH VẬT LÝ NƠTRON VÀ VẬT LÝ NHIỆT CỦA VÙNG HOẠT WWER
10.1. Đặt nhiệm vụ khi lựa chọn kết cấu vùng hoạt WWER
10.2. Bảo đảm an toàn khi dẫn thoát nhiệt khỏi vùng hoạt
10.3. Tối ưu hóa độ không đồng đều phân bố tỏa năng lượng của các mẻ nhiên liệu
10.4. Những đặc điểm của các đặc tính vật lý-nơtron WWER
10.5. Điều chỉnh
11. CÁC PHƯƠNG PHÁP TÍNH TOÁN CÁC ĐẶC TÍNH VẬT LÝ-NƠTRON CỦA CÁC MẺ NHIÊN LIỆU
12. CÁC VẤN ĐỀ VẬN HÀNH
12.1. Điều khiển và kiểm soát việc điều khiển vùng hoạt khi đưa lò phản ứng vào trạng thái phát công suất
12.2. Điều khiển và kiểm soát vùng hoạt khi lò phản ứng phát công suất
12.3. Điều khiển và kiểm soát vùng hoạt khi dừng lò theo kế hoạch
12.4. Rút axit boric nhờ các phin lọc trao đổi ion
12.5. Bảo đảm trạng thái dưới tới hạn vùng hoạt của lò phản ứng đã dừng
12.6. Ảnh hưởng của xenon và samari đến việc điều chỉnh trong các chế độ chuyển tiếp.
12.7. Khử các dao động xenon
13. CÁC VẤN ĐỀ AN TOÀN
13.1. Các rối loạn hạt nhân

13.2. Khối lượng tới hạn cục bộ
13.3. Mất điều khiển phản ứng dây chuyền
13.4. Sai phạm dẫn thoát nhiệt khỏi vùng hoạt
Tài liệu tham khảo phần II
Phần III. ĐẶC ĐIỂM CỦA CÁC QUÁ TRÌNH VẬT LÝ VÀ VẬN HÀNH РБМК-1000
14. THIẾT BỊ РБМК-1000 (THIẾT KẾ ĐẦU)
14.1. Kết cấu kim loại của lò phản ứng và bảo vệ phóng xạ
14.2. Vùng hoạt
14.3. Thanh nhiên liệu sử dụng trong РБМК-1000
14.4. Bó nhiên liệu
14.5. Các chất hấp thụ bổ sung
14.5.1. Thanh hấp thụ bổ sung b.1814.00.000
14.5.2. Thanh hấp thụ bổ sung b.2641.00.000
14.6. Các thanh СУЗ
14.6.1. Các thanh СУЗ b.2091.00.000-01
14.6.2. Các thanh СУЗ b.2477.00.000-01
14.6.3. Thanh bảo vệ khẩn cấp nhanh (БАЗ) b. 2505.00.000
14.6.4. Thanh hấp thụ rút ngắn (УСП) b. 2093.00.000
14.6.5. Bộ phận điều chỉnh СУЗ dạng cụm b.2399.00.000
15. CÁC PHƯƠNG TIỆN ĐIỀU KHIỂN
15.1. Kiểm soát và điều chỉnh sự phân bố tỏa năng lượng trong vùng hoạt
15.1.1. Những tiên đề công nghệ kiểm soát gián đoạn sự phân bố
15.1.2. Cấu trúc kiểm soát và điều chỉnh phân bố tỏa năng lượng
16. ĐẶC ĐIỂM CỦA CÁC QUÁ TRÌNH VẬT LÝ РБМК-1000
16.1. Grafit, các đặc tính của grafit
16.2. Tỷ số urani-grafit
16.3. Các tính chất tái sinh của mạng các kênh РБМК-1000
16.4. Độ dài vận chuyển của các nơtron trong mạng РБМК-1000
16.5. Cân bằng nơtron. Sử dụng nhiên liệu urani-erbi
17. Các tính toán vật lý-nơtron, được thực hiện để bảo đảm vận hành РБМК-1000
18. CÁC QUAN ĐIỂM CÔNG NGHỆ CỦA VẤN ĐỀ AN TOÀN РБМК-1000
18.1. Đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn
18.1.1. Trạng thái dưới tới hạn của lò phản ứng
18.1.2. Quá trình đưa lò phản ứng vào trạng thái tới hạn
18.2. Nhiễm độc xenon và samari lò phản ứng РБМК-1000
18.2.1. Nhiễm độc tĩnh xenon

18.2.2. Nhiễm độc không ổn định xenon
18.2.3. Nhiễm độc samari
18.2.4. Nhiễm độc không ổn định samari
18.3. Hệ thống tin cậy dẫn thoát nhiệt từ các thanh nhiên liệu
18.4. Các hiệu ứng và các hệ số độ phản ứng của РБМК-1000.
Ảnh hưởng của sự thay đổi các thông số lò phản ứng đến độ phản ứng
18.4.1. Hiệu ứng (hệ số) nhiệt độ của độ phản ứng
18.4.2. Gia nhiệt cao hơn 180^0C. Hệ số độ phản ứng theo nhiệt độ grafit
18.4.3. Hệ số công suất của độ phản ứng
18.4.4. Hệ số hơi của độ phản ứng
18.5. Các hiệu ứng độ phản ứng khi cạn nước КМПЦ và КО СУЗ
18.5.1. Hiệu ứng độ phản ứng khi cạn nước КМПЦ
18.5.2. Hiệu ứng cạn nước của vòng СУЗ trong trạng thái dưới tới hạn
18.5.3. Hiệu ứng cạn nước vòng làm nguội СУЗ trong trạng thái dưới tới hạn của lò phản ứng khi phát công suất
19. AN TOÀN LÒ PHẢN ỨNG
19.1. Độ hiệu dụng của hệ thống điều khiển và bảo vệ РБМК-1000
19.2. Phân tích một số rắc rối đã xảy ra trong РБМК-1000
19.2.1. Rắc rối ở tổ máy số 1 NMĐHN Smolensk, ngày 21-22 tháng 11 năm 1992
19.2.2. Rắc rối ở tổ máy số 4 NMĐHN Kursk, ngày 8 tháng 4 năm 1999
Tài liệu tham khảo phần III
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT
MỤC LỤC