



DETERMINACION DE LA POTENCIA CRITICA DE LA CENTRAL NUCLEAR
DE EMBALSE.-

A. V. Galia - D. G. Parkansky.-

1.1 INTRODUCCION

En los reactores refrigerados por agua, es de fundamental importancia el análisis del flujo calórico crítico, ya que éste puede ser el límite más restrictivo en el nivel de potencia y en la seguridad del reactor. En un PWR o en un PHWR la base de diseño generalmente es un valor mínimo aceptado de la relación de "DNB" (DNBR), que es la relación entre el flujo calórico crítico y el flujo calórico local en condiciones normales de operación. El objeto de este trabajo consiste en determinar la potencia crítica, es decir, la potencia para la cual el $DNBR=1$, y el DNBR a potencia nominal y en condiciones de sobrepotencia para el canal más exigido del reactor de la Central Nuclear de Embalse.

1.2 LA CRISIS DE EBULLICION

El flujo calórico que se entrega a un refrigerante que circula no puede aumentarse indefinidamente, ya que de lo contrario se deteriorará el mecanismo de transferencia de calor, con lo cual se producirá un aumento brusco de la temperatura de la pared, fenómeno que se conoce con el nombre de "crisis de ebullición", y al flujo calórico justo antes de la crisis de ebullición se lo conoce con el nombre de flujo calórico crítico. La crisis de ebullición puede clasificarse en dos categorías según las condiciones de escurrimiento:

a) Crisis de ebullición en la región subenfriada o de bajo título:

La misma ocurre en el caso de flujos calóricos altos, que dan lugar al establecimiento de una capa de vapor aislante sobre la pared de la superficie calefactora, que deteriora el proceso de transferencia de calor. Debido a esto se registra un rápido aumento de la temperatura de la pared, produciéndose en general el quemado destructivo de la misma. Esta crisis de ebullición suele denominarse también DNB (Departure from Nucleate Boiling).

b) Crisis de ebullición en la región de títulos altos:

Esta tiene lugar para un flujo calórico menor que el descrito anteriormente. Por lo general la temperatura de la pared sufre un aumento menor que el que tiene lugar en el caso anterior y la misma no alcanza forzosamente niveles destructivos. Se la suele denominar también "dry-out".

1.3 CALCULO DE FLUJO CALORICO CRITICO

Para determinar el flujo calórico crítico se debe recu-

rrir a correlaciones basadas en datos experimentales, y como éstas sólo son válidas en el rango de parámetros para los cuales fueron desarrolladas, la extrapolación de las mismas para otros valores de dichos parámetros puede dar lugar a resultados alejados de la realidad. Existen dos tipos de enfoques para determinar correlaciones para el cálculo del flujo calórico crítico. El primero está basado en lo que se conoce como "hipótesis de las condiciones locales", y sugiere que el flujo calórico crítico depende esencialmente del título termodinámico. La segunda clase de correlaciones está basada en la hipótesis de que el valor del flujo calórico crítico depende en cierta medida de las condiciones corriente arriba del punto considerado. Dentro de las correlaciones del primer tipo, la que más se adapta a nuestras condiciones de trabajo es la correlación de Heizer, referencia (1), mientras que dentro de las correlaciones disponibles por nosotros, pertenecientes a la segunda clase, lo que más se adapta a nuestras necesidades es la correlación W-3, de L. Tong, referencia (2). Estas dos correlaciones también difieren en el siguiente aspecto: La correlación W-3 ha sido establecida mediante un ajuste del tipo de cuadros mínimos, existiendo una dispersión de $\pm 23\%$ de los datos experimentales, respecto de la curva más probable; mientras que la correlación de Heizer ha sido desarrollada de modo que la curva resultante abarque todos los puntos experimentales, prediciendo así el mínimo valor del flujo calórico crítico que provoca la crisis de ebullición.

II BREVE DESCRIPCION DEL CODIGO COBRA 3C

II.1 MEZCLADO ENTRE SUBCANALES

El código COBRA 3C calcula el flujo calórico y la entalpía de un refrigerante que circula por los subcanales de un manojo de barras de un elemento combustible, referencia (3).

El modelo analítico desarrollado por COBRA tiene en cuenta el mezclado entre subcanales adyacentes a partir de dos tipos de caudales transversales. El primero es el que se origina por la redistribución del caudal cuando tratan de igualarse las presiones en los distintos subcanales, e incluye también al canal transversal inducido por aletas y alambres enrollados. El segundo es el caudal de mezclado turbulento, producido por el movimiento caótico del refrigerante entre los subcanales adyacentes. Ambos tipos de caudales transportan energía y cantidad de movimiento entre los subcanales adyacentes, y como resultado de ello surge una tendencia a la igualación de las velocidades y las entalpías del refrigerante que circula por los distintos subcanales. Como una aproximación se supone que el caudal transversal de mezclado turbulento viene dado por

$$W_{ij} = \beta S_{ij} \bar{G}$$

donde W_{ij} es el caudal másico de mezclado turbulento por unidad de longitud, S_{ij} es el paso entre barras y β el parámetro de mezclado turbulento. Este parámetro ha resultado ser el que más influencia tiene en

los resultados que se obtienen con el COBRA 3C, y debido a su importancia se ha intentado elaborar un modelo para predecir un valor adecuado de β , aunque los resultados no han sido enteramente satisfactorios. No obstante, se ha llegado a estimar que el valor de β debe estar comprendido entre 0.006 y 0.02 para la mayoría de los casos, referencia (4).

En este trabajo se adoptan dos correlaciones para β , originadas en trabajos distintos. La primera ha sido desarrollada por D. S. Rowe y sus colaboradores, referencia (5), y la segunda por Rodgers y Rosehart, referencia (6).

III

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

El elemento combustible del reactor de Embalse está constituido por 12 manojos de 37 barras de UO_2 refrigeradas con D_2O , con una barra central y las 36 restantes dispuestas en 3 anillos con 6, 12 y 18 barras respectivamente. Los cálculos se realizaron teniendo en cuenta que la diferencia de presión entre los colectores de entrada y de salida debe mantenerse constante. Como a medida que se aumenta la potencia entregada a un canal se genera más vapor, y por lo tanto aumenta la resistencia hidrodinámica del canal, para que la caída de presión sea constante debe disminuir el caudal de refrigerante. Esto genera una curva que da la relación existente entre la potencia entregada y el caudal de refrigerante que circula. Tanto esta curva como los demás datos necesarios para efectuar los cálculos fueron tomados de la referencia (7).

III.1

CALCULOS REALIZADOS Y CONCLUSIONES

Se han efectuado cálculos al 100% de la potencia nominal y a 115% de dicha potencia, para determinar el DNBR mínimo, y cálculos para determinar la potencia crítica. Para poder comparar los resultados obtenidos con ambas correlaciones para el cálculo del flujo calórico crítico, consideramos una curva límite inferior para la W-3, teniendo en cuenta que la dispersión de los puntos experimentales es de $\pm 23\%$. Se señala que en la referencia (7) también se considera una curva límite inferior para la determinación del flujo calórico crítico.

Como se puede apreciar en la Tabla I, para los cálculos al 100% de la potencia nominal, el valor del DNBR mínimo obtenido con la curva más probable de la correlación W-3 concuerda con el que figura en el IPS para el mismo tipo de curva. Considerando las curvas límites inferiores, el valor de DNBR mínimo que se obtiene con la correlación de Heizer concuerda con el que se obtendría con la curva límite inferior que figura en el IPS; mientras que el valor obtenido con la correlación W-3 es algo menos conservativa. Al 115% de la potencia nominal, que es el valor de la sobrepotencia de diseño para el reactor de Embalse, los resultados obtenidos en todos los casos son aceptables, ya que los criterios actuales de diseño, según la referencia (6), estiman que el valor de DNBR mínimo adecuado para las condiciones de sobrepotencia de diseño debe ser 1,3.

Observando la Tabla II se comprueba que el valor de la

potencia crítica obtenido con la curva más probable de la correlación W-3 es mas conservativo que el que se obtiene con el mismo tipo de curva para la correlación que figura en la referencia (7). Si en cambio consideramos las curvas límites inferiores vemos que el valor obtenido con la W-3 coincide con el que figura en la referencia (7), mientras que los valores obtenidos con la correlación de Healzer son ligeramente menos conservativos.

Por otro lado, analizando las Tablas III, IV y V puede decirse que los resultados que se obtienen empleando los distintos β no exhiben diferencias apreciables, si bien los valores de potencia crítica obtenidos con el β de Rodgers son ligeramente más conservadores.

Es necesario destacar que si bien las dos correlaciones empleadas para el cálculo de flujo calórico crítico son las que más se adaptan a nuestras condiciones de trabajo, el rango de presiones en el que fue desarrollada la correlación de Healzer no incluye a la presión de operación del reactor de Embalse. Con relación a la correlación W-3 nuestras condiciones de operación nos ubican fuera del rango de las longitudes y fuera del rango de títulos termodinámicos. Creemos que ésta última es la limitación más importante, ya que con títulos del 20% (con la W-3 obtenemos DNBR = 1 para títulos de ese orden) nuestra configuración de flujo sería anular, mientras que la correlación ha sido desarrollada para flujo con burbujas.

Para finalizar, nos parece interesante señalar que en ninguno de los casos considerados la potencia crítica obtenida es inferior al 130% de la potencia nominal.-

REFERENCIAS:

- (1) Mayinger, F.: "Steady State CHF in Water Cooled Reactors", "Two Phase Flows and Heat Transfer with Application to Nuclear Reactor Design Problems", ed. by J. J. Ginoux. Mc Graw-Hill (1978).
- (2) Tong, L. S.: "Boiling Crisis and Critical Heat Flux", AEC Critical Review Series, TID-25887 (1972).
- (3) Rowe, D. S.: "COBRA 3C": A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements", BNWL - 1695 (1973).
- (4) Rowe, D. S.: "Cross-Flow Mixing Between Parallel Flow Channels During Boiling", BNWL-371, Pt. 1 (1967).
- (5) Rowe, D. S.: BNWL-371, Pt. 2 (1967).
- (6) Weisman, J.: "Elements of Nuclear Reactor Design", Cap. VII, Elsevier (1977).
- (7) Informe Preliminar de Seguridad para la Central Nuclear de Embalse, (1978).

Potencia nominal					115% potencia nominal		
Relación de "DNB" mínima					Relación de "DNB" mínima		
Correlación flujo crítico					Correlación flujo crítico		
Curva más probable		Curva límite inferior			Curva más probable		Curva límite inferior
W-3	IPS	W-3	IPS	Healzer	W-3	W-3	Healzer
3.62	3.55	2.72	2.02	2.01	2.72	2.09	1.72

Tabla I: Valores de DNBR mínimo

Potencia crítica (% potencia nominal)				
Correlación flujo crítico				
Curva más probable		Curva límite inferior		
W-3	IPS	W-3	IPS	Healzer
135	156	131	132	140

Tabla II: Valores de potencia crítica.-

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
Correlación parámetro β	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
% Pot. nominal	135	135	140	139
DNBR mínimo	1.004	0.970	1.021	0.976

TABLA III: Valores de potencia crítica con los distintos β

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
Correlación parámetro β	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
DNBR mínimo	3.62	3.63	2.01	2.01

TABLA IV: Resultados obtenidos al 100% con los distintos β

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
Correlación parámetro β	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
DNBR mínimo	2.72	2.72	1.752	1.752

TABLA V: Resultados obtenidos al 115% con los distintos β

Potencia nominal					115% potencia nominal		
Relación de "DNBR" mínima					Relación de "DNBR" mínima		
Correlación flujo crítico					Correlación flujo crítico		
Curva más probable		Curva límite inferior			Curva más probable		Curva límite inferior
W-3	IPS	W-3	IPS	Healzer	W-3	W-3	Healzer
3.62	3.55	2.72	2.02	2.01	2.72	2.09	1.72

Tabla I: Valores de DNBR mínimo

Potencia crítica (% potencia nominal)				
Correlación flujo crítico				
Curva más probable		Curva límite inferior		
W-3	IPS	W-3	IPS	Healzer
135	156	131	132	140

Tabla II: Valores de potencia crítica.-

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
% Pot. nominal	135	135	140	139
DNBR mínimo	1.004	0.970	1.021	0.976

TABLA III: Valores de potencia crítica con los distintos β

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
DNBR mínimo	3.62	3.63	2.01	2.01

TABLA IV: Resultados obtenidos al 100% con los distintos β

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
DNBR mínimo	2.72	2.72	1.752	1.752

TABLA V: Resultados obtenidos al 115% con los distintos β

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
Correlación parámetro β	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
% Pot. nominal	135	135	140	139
DNBR mínimo	1.004	0.970	1.021	0.976

TABLA III: Valores de potencia crítica con los distintos β

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
Correlación parámetro β	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
DNBR mínimo	3.62	3.63	2.01	2.01

TABLA IV: Resultados obtenidos al 100% con los distintos β

Correlación flujo calórico crítico	W-3		HEALZER	
Correlación parámetro β	Rowe	Rodgers	Rowe	Rodgers
DNBR mínimo	2.72	2.72	1.752	1.752

TABLA V: Resultados obtenidos al 115% con los distintos β

Potencia nominal					115% potencia nominal		
Relación de "DNB" mínima					Relación de "DNB" mínima		
Correlación flujo crítico					Correlación flujo crítico		
Curva más probable		Curva límite inferior			Curva más probable	Curva límite inferior	
W-3	IPS	W-3	IPS	Healzer	W-3	W-3	Healzer
3.62	3.55	2.72	2.02	2.01	2.72	2.09	1.72

Tabla I: Valores de DNBR mínimo

Potencia crítica (% potencia nominal)				
Correlación flujo crítico				
Curva más probable		Curva límite inferior		
W-3	IPS	W-3	IPS	Healzer
135	156	131	132	140

Tabla II: Valores de potencia crítica.-

Correlaciones para el ¹⁰³parámetro de mezclado turbulento

ROWE

$$\beta = 0.0062 \left(\frac{D_c}{S_{ij}} \right) \times Re^{-0.1}$$

RODGERS

$$\beta = 0.0005 \left(\frac{D_c}{D_b} \right) Re^{0.1} \left(\frac{S_{ij}}{D_b} \right)^{-0.894}$$

Correlación W-3 de L. Tong para el cálculo del flujo
calórico crítico

$$\begin{aligned} \frac{q''_{\text{DNB,EU}}}{10^6} = & \left\{ (2.022 - 0.0004302P) + (0.1722 - 0.0000984P) \right. \\ & * e^{[(18.177 - 0.004129P)x]} \Big\} \\ & * [(0.1484 - 1.596x + 0.1729x|x|) G/10^6 + 1.037] \\ & * [1.157 - 0.869x] [0.2664 + 0.8357 e^{-3.151 D_c}] \\ & * [0.8258 + 0.000794 (H_{\text{SAT}} - H_{\text{in}})] \end{aligned}$$

Efecto de la no uniformidad del flujo calórico

$$q''_{\text{DNB,N}} = q''_{\text{DNB,EU}} / F$$

$$F = \frac{C}{q''_{\text{local}} [1 - e^{-C l_{\text{DNB,EU}}}] } \int_0^{l_{\text{DNB}}} q''(z) e^{-C(l_{\text{DNB,N}} - z)} dz$$

$$C = 0.44 \frac{(1 - x_{\text{DNB}})^{7.9}}{(G/10^6)^{1.72}} \text{ inch}^{-1}$$

¹⁰⁵
Correlación de Heizer para el cálculo del flujo
calórico crítico

$$q_{crit}'' = 10^6 A$$

$$\text{si } x < x_1$$

$$q_{crit}'' = [1.9 - 3.3x - 0.7 \tanh^2(3 \times 10^{-6} G)] A 10^6$$

$$x_1 < x < x_2$$

$$q_{crit}'' = [0.6 - 0.7x - 0.09 \tanh^2(2 \times 10^{-6} G)] A 10^6$$

$$x_2 < x < x_3$$

$$A = \left[1.1 - 0.1 \left(\frac{P-600}{400} \right)^{1.25} \right]$$

$$x_1 = 0.273 - 0.212 \tanh^2(3 \times 10^{-6} G)$$

$$x_2 = 0.5 - 0.269 \tanh^2(3 \times 10^{-6} G) + 0.0346 \tanh^2(2 \times 10^{-6} G)$$

$$x_3 = 0.657 - 0.1286 \tanh^2(2 \times 10^{-6} G)$$