

CÁLCULOS TERMOHIDRÁULICOS

por

HORÁCIO NAKATA

RESUMO -- A metodologia utilizada no programa NATCON para cálculo de convecção natural em reatores de pesquisa tipo MTR é descrita, juntamente com os dados de entrada e opções de cálculo disponíveis.

INTRODUÇÃO

Os reatores de pesquisa tipo MTR são projetados de modo a possibilitar a operação segura tanto em regime normal como em regime de transientes normais e anormais. Entre os limites observados estão a temperatura de ebulição localizada (ONB), o nível de fluxo de calor para ocorrência de perda de refrigeração por convecção (DNB) e o limite de pressão nas placas para ponto crítico de colapso da estrutura mecânica.

Em caso de desligamento da bomba do circuito primário, o núcleo deverá ter capacidade de refrigeração por convecção natural, sem violar os níveis de segurança citados acima. Nos reatores tipo MTR, o critério de ebulição localizada é o mais limitante, o qual uma vez ultrapassado pode provocar obstrução do canal e ocasionamento de superaquecimento e dano do combustível. Tem portanto o presente trabalho o objetivo de expor e exercitar uma metodologia de cálculo de margem de segurança afim de evitar tais ocorrências, quando em regime de refrigeração em convecção natural, em caso de parada de bomba do circuito primário.

O programa a ser utilizado foi desenvolvido em Ohio State University por R.S. Smith, e adaptado ao IBM-PC-AT em linguagem Fortran 77, no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN.

METODOLOGIA DE CÁLCULO EM CONVECÇÃO NATURAL

O programa NATCON calcula a força de empuxo ocasionada pelo aquecimento da coluna de água e iterativamente procura igualá-la à força de resistência viscosa do fluxo ascendente por meio de pesquisa de fluxo mássico estacionário.

A força de empuxo é calculada em cada um dos intervalos axiais ao longo da altura do núcleo, com a equação:

$$P_{\text{empi}} = (\rho_{\text{pisc}} - \rho_i)g\Delta Z_i$$

onde ρ_{pisc} = densidade da água na piscina,

ρ_i = densidade da água no intervalo i ,

g = aceleração da gravidade,

ΔZ_i = dimensão do intervalo i .

Em cada intervalo axial é também calculada a força de resistência viscosa e a perda de pressão total na coluna que é dada por :

$$P_{\text{visc}} = \left(\frac{W_{\text{in}}}{A} \right)^2 \left[\frac{1}{2\rho_{\text{in}}} + \sum_i \frac{f\Delta Z_{\text{in}}}{\rho_i D_h} + \frac{1}{\rho_{\text{out}}} \right] / 2 .$$

onde W_{in} = fluxo mássico na entrada da coluna,

A = área de escoamento na coluna,

ρ_{in} = densidade da água na entrada da coluna,

ρ_i = densidade da água no intervalo i ,

D_h = diâmetro hidráulico do canal,

ρ_{out} = densidade da água na saída da coluna,

f = fator de fricção.

O valor conservativo de 0.5/Ref. 2/foi utilizado para a perda de pressão na entrada, e na saída foi considerada velocidade nula.

O cálculo da temperatura é efetuado, assumindo-se distribuição de potência conhecida, para o intervalo ΔZ_i com a expressão:

$$T_{\text{wi}} = T_{\text{mi}} + Q_i / (h_i A)$$

onde T_{mi} = temperatura da água no intervalo i ,

Q_i = potência no intervalo i ,

h_i = coeficiente de transferência por convecção no intervalo i .

A temperatura central do combustível é dada por :

$$T_{\text{fi}} = T_{\text{wi}} + \frac{Q_i}{\frac{t_f}{k_f} + \frac{t_c}{k_c}}$$

onde t_f = meia espessura do combustível,

t_c = espessura do encamisamento,

k_f = condutividade térmica do combustível,

k_c = condutividade térmica do encamisamento.

Os valores de Nu e f são tabelados dentro do programa para dutos retangulares e interpolados para a geometria e condições de operação do reator.

A temperatura de saturação em cada intervalo axial é comparada com a temperatura de ebulição localizada. Conhecidos os valores de fluxo de calor, pressão e temperatura de saturação, a temperatura de ebulição localizada é dada por correlação publicada na referência 1, no sistema métrico inglês, de Bergles e Rosehnow.

$$\left(\frac{Q_i}{A}\right) = 15,6 P_i^{1,156} (T_{inc_i} - T_{sat_i})^{(2,30/P_i^{0,0234})}$$

onde T_{inc_i} = temperatura de ebulição localizada no intervalo i ,
 T_{sat_i} = temperatura de saturação no intervalo i ,
 P_i = pressão da água no intervalo i .

DESCRIÇÃO DAS ENTRADAS DO PROGRAMA NATCON

O programa NATCON pode ser rodado com vários casos em sequência, com diferentes parâmetros e opções. Ao final dos casos a serem executados o programa interrompe a execução quando lê o cartão contendo END entre as colunas 1 e 3.

Há duas opções de cálculo :

- Pesquisa de potência crítica para aparecimento de ebulição localizada, e
- Cálculo de margem de segurança para ocorrência de ebulição localizada dado o nível de potência.

A primeira opção é acionada com a leitura do valor de potência, CPWR, igual a ZERO, e a segunda com o valor desejado de CPWR diferente de zero.

No caso de CPWR igual a ZERO o programa efetua pesquisa de potência crítica, começando com potência de 10 KW, seguido de cálculo a 50 KW, e a partir desse nível com incremento de 50 KW até atingir 300 KW, quando então o incremento é alterado para 100 KW. Uma vez ultrapassada a potência crítica, o programa pesquisa iterativamente a potência crítica e sua localização.

As saídas do programa podem ser direcionadas a um arquivo ou a impressora bastando modificar a instrução OPEN no programa.

Com a opção IPRT ativada, isto é, $IPRT > 0$, as saídas serão de utilidade para tracejar detalhadamente o processo iterativo, porém recomenda-se $IPRT=0$ para casos normais.

Encontram-se no Apêndice as definições de parâmetros de entrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ROHSENOW, W. M. e HARTNETT, J. P., Handbook of Heat Transfer, MacGraw-Hill, NY, 1973.
2. RESEARCH REACTOR CORE CONVERSION FROM THE USE OF HIGHLY ENRICHED URANIUM TO THE USE OF LOW ENRICHED URANIUM FUELS-GUIDE BOOK, IAEA - TECDOC-233, 1980.

APÊNDICE

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA NATCON

<u>Variável</u>	<u>Definição</u>
NN	Número de intervalos axiais no canal de refrigeração.
IPRT	Opção de saída detalhada. (recomenda-se ZERO)
TPOOL	Temperatura média da piscina. (°C)
FUELHT	Altura do combustível. (m)
FUELWT	Largura do combustível. (m)
FUELTK	Espessura do combustível. (m)
FUELK	Condutividade térmica do combustível. $(\frac{W}{m^{\circ}K})$
CLADTK	Espessura do Encamisamento. (m)
CLADK	Condutividade térmica do encamisamento. $(\frac{W}{m^{\circ}K})$
CHANHT	Altura do canal de refrigeração. (m)
CHANWT	Largura do canal de refrigeração. (m)
CHANTK	Espessura do canal de refrigeração. (m)
NSTDEL	Número de elementos normais.
NPLTSE	Número de placas nos elementos normais.
NCONEL	Número de elementos de controle.
NPLTCE	Número de placas no elemento de controle.
DELTA	Critério de convergência para igualar as forças de empuxo às forças viscosas.
VGUESS	Valor estimado inicial para velocidade do refrigerante. (m/s)
DEPTH	Coluna de água entre o fundo do núcleo e a superfície da piscina. (m)
RPEAK	Fator de pico radial do canal a ser calculado.
CPWR	Potência do núcleo. Se ZERO o programa pesquisa a potência crítica para a ebulição localizada.
ZR	Localização normalizada das fronteiras dos intervalos axiais, de baixo para cima. (NN+1 valores entre 0.0 e 1.0)
QVZ	Distribuição axial normalizada de potência do canal a ser calculado. (NN+1 valores entre 0.0 e 1.0) Opcionalmente pode entrar nas colunas 1-3: SIN : para perfil senoidal, BOT : para perfil senoidal acentuado no fundo do núcleo, TOP : para perfil senoidal acentuado no topo do núcleo.

APÊNDICE

Caso exemplo rodando o Programa NATCON para o reator IEA-R1.

Saídas de resultados para potência de 10,400 e 768,50 KW, com perfil senoidal com pico na região inferior.

1 IEA-R1 CNEN/IPEN BRASIL - BOTTOM SINE PROFILE

20= NN

0= IPRT

2.800000000E+01= TPSOL

6.050000000E-01= FUELHT

6.200000000E-02= FUELWT

5.100000000E-04= FUELTK

3.400000000E+02= FUELK

5.100000000E-04= CLADTK

2.200000000E+02= CLADK

6.250000000E-01= CHANHT

6.650000000E-02= CHANWT

2.890000000E-03= CHANTK

26= NSTDEL

18= NFLTSE

4= NCONEL

12= NFLTCE

1.000000000E-04= DELTA

3.000000000E-02= VSGUESS

7.500000000E+00= DEPTH

1.800000000E+00= RPEAK

.000000000E+00= CPWR(OPTIONAL FIXED POWER LEVEL)

.000000000E+00= ZR(1..NN+1)

5.000000000E-02

1.000000000E-01

1.500000000E-01

2.000000000E-01

2.500000000E-01

3.000000000E-01

3.500000000E-01

4.000000000E-01

4.500000000E-01

5.000000000E-01

5.500000000E-01

6.000000000E-01

6.500000000E-01

7.000000000E-01

7.500000000E-01

8.000000000E-01

8.500000000E-01

9.000000000E-01

9.500000000E-01

1.000000000E+00

BDT = BVZ(1..NN+1)

* CASE NO: 1

0 IEA-R1 CNEN/IPEN BRASIL - BOTTOM SINE PROFILE

10000 POWER= 10.00 KW

+-----

ITER	BUOYF	FRICF	DELTF	TOUT	VBUESS	MD3T						
1	.147477E+01	.231510E+02	-.216762E+02	.294529E+02	.300000E-01	.574776E-02						
2	.163815E+01	.207358E+02	-.190971E+02	.296144E+02	.270000E-01	.517298E-02						
3	.970315E+01	.329072E+01	.641243E+01	.371114E+02	.478613E-02	.916984E-03						
4	.426724E+01	.759118E+01	-.332394E+01	.322042E+02	.103701E-01	.198653E-02						
5	.528595E+01	.611545E+01	-.829500E+00	.331515E+02	.846377E-02	.162159E-02						
6	.574452E+01	.562663E+01	.117892E+00	.335668E+02	.782984E-02	.150013E-02						
7	.568322E+01	.568740E+01	-.418713E-02	.335132E+02	.790872E-02	.151525E-02						
8	.568530E+01	.568532E+01	-.201134E-04	.335151E+02	.790602E-02	.151473E-02						
0 1	HEIGHT	HT FLUX	Q/NODE	H T COEF	TFUEL	C/L	T WALL	T WATER	PRESSURE	STAT P	T SAT	T INCIPI
	M	W/M 2	KW	W/(M2 K)	C	C	C	C	KPA	KPA	C	C
1	.000	109.	.0004	802.6	26.16	26.16	28.03	174.51	174.51	115.93	116.07	
2	.030	312.	.0012	802.9	28.52	28.52	28.16	174.51	174.51	115.93	116.16	
3	.061	486.	.0018	803.4	28.96	28.96	28.39	174.51	174.51	115.93	116.21	
4	.091	627.	.0024	804.1	29.45	29.45	28.72	174.51	174.51	115.93	116.24	
5	.121	732.	.0027	804.9	29.98	29.97	29.13	174.51	174.51	115.93	116.27	
6	.151	803.	.0030	805.9	30.51	30.51	29.58	174.51	174.51	115.93	116.28	
7	.182	838.	.0031	806.9	31.04	31.04	30.07	174.51	174.51	115.93	116.29	
8	.212	842.	.0032	808.0	31.54	31.54	30.57	174.51	174.51	115.93	116.29	
9	.242	815.	.0031	809.0	32.00	32.00	31.06	174.51	174.51	115.93	116.29	
10	.272	764.	.0029	810.0	32.40	32.40	31.53	174.51	174.51	115.93	116.27	
11	.303	691.	.0026	810.9	32.75	32.75	31.96	174.51	174.51	115.93	116.26	
12	.333	604.	.0023	811.7	33.03	33.03	32.34	174.51	174.51	115.93	116.24	
13	.363	507.	.0019	812.2	33.25	33.25	32.67	174.51	174.51	115.93	116.21	
14	.393	406.	.0015	812.7	33.41	33.41	32.94	174.51	174.51	115.93	116.18	
15	.424	307.	.0012	813.0	33.50	33.50	33.15	174.51	174.51	115.93	116.15	
16	.454	215.	.0008	813.3	33.55	33.55	33.31	174.51	174.51	115.93	116.12	
17	.484	136.	.0005	813.4	33.57	33.57	33.41	174.51	174.51	115.93	116.08	
18	.514	72.	.0003	813.5	33.56	33.56	33.47	174.51	174.51	115.93	116.04	
19	.545	26.	.0001	813.6	33.54	33.54	33.50	174.51	174.51	115.93	116.00	
20	.575	6.	.0000	813.6	33.52	33.52	33.51	174.51	174.51	115.92	115.96	

10.00KW REACTOR COOLED BY NATURAL CONVECTION(516 PLATES AT .0349KW PER PLATE)
MARGIN TO INCIPIENT BOILING: 82.44 C 148.39 F AT THE NODE NO. 20

CHANNEL DIMENSIONS:	WIDTH	THICKNESS	HEIGHT	AREA	HYDRAULIC DIAMETER
(M)	.0665600	.0028700	.6050000	.0001924	.0055395
(FT)	.2184363	.0094016	1.9849081	.0020712	.0181744

AFTER 5 ITERATIONS, PRESSURES: BUOYANT= 5.68530 FRICITION= 5.68532 PA
= .11874 = .11874 LB/FT 2

VELOCITY(IN,OUT)CM/S= .791 .792 FLOWRATE(KG/S)= .00151, WATER TEMPERATURE(IN,OUT)DEG C= 28.0 33.5
FT/S= .0259 .0260 (LB/SEC)= .00334 DEG F= 82.4 92.3

1CORE POWER= 400.00 KW

+-----

ITER	BUOYF	FRICF	DELTF	TOOT	VGUESS	MDCT							
1	.450639E+02	.296583E+02	.354056E+02	.621376E+02	.510917E-01	.978676E-02							
2	.400703E+02	.336284E+02	.644190E+01	.590364E+02	.562069E-01	.107676E-01							
3	.371440E+02	.365196E+02	.624399E+00	.571344E+02	.596727E-01	.114711E-01							
4	.365534E+02	.365319E+02	.315680E-01	.569440E+02	.602668E-01	.115466E-01							
5	.368431E+02	.366431E+02	.843364E-04	.569372E+02	.602809E-01	.115493E-01							
0 I	HEIGHT	HT FLUX	B/NODE	H T	CDEF	TFUEL	D/L	T WALL	T WATER	PRESSURE	STAT P	T SAT	T INCIP
	M	W/M 2	KW	W/(M2 K)	C	C	C	C	C	KPA	KPA	C	C
1	.000	4351.	.0163	802.9	33.23	33.22	28.17	174.51	174.51	115.92	116.71		
2	.030	12493.	.0469	804.3	43.32	43.29	28.82	174.51	174.50	115.92	117.22		
3	.061	19446.	.0729	806.9	52.54	52.50	30.07	174.50	174.50	115.92	117.52		
4	.091	25064.	.0940	810.6	60.65	60.59	31.80	174.50	174.50	115.92	117.72		
5	.121	29293.	.1099	814.2	67.48	67.41	33.91	174.50	174.50	115.92	117.85		
6	.151	32106.	.1204	818.2	72.92	72.84	36.30	174.50	174.50	115.92	117.94		
7	.182	33535.	.1258	822.4	76.90	76.83	38.85	174.50	174.49	115.92	117.98		
8	.212	33662.	.1263	826.6	79.46	79.39	41.47	174.49	174.49	115.92	117.98		
9	.242	32610.	.1223	830.9	80.67	80.59	44.04	174.49	174.49	115.92	117.95		
10	.272	30542.	.1146	834.9	80.64	80.57	46.50	174.49	174.49	115.92	117.89		
11	.303	27651.	.1037	838.6	79.53	79.47	48.77	174.49	174.49	115.92	117.80		
12	.333	24150.	.0906	841.0	77.58	77.52	50.78	174.49	174.49	115.92	117.68		
13	.363	20267.	.0760	843.1	74.94	74.90	52.51	174.49	174.48	115.92	117.54		
14	.393	16236.	.0609	844.7	71.86	71.83	53.93	174.48	174.48	115.92	117.38		
15	.424	12281.	.0461	846.0	68.58	68.55	55.04	174.48	174.48	115.92	117.20		
16	.454	8617.	.0323	847.0	65.34	65.32	55.85	174.48	174.48	115.92	117.01		
17	.484	5435.	.0204	847.6	62.38	62.37	56.39	174.48	174.48	115.92	116.80		
18	.514	2898.	.0109	848.0	59.91	59.90	56.72	174.48	174.48	115.92	116.57		
19	.545	1134.	.0043	848.2	56.12	56.12	56.88	174.48	174.48	115.92	116.34		
20	.575	229.	.0009	848.3	57.18	57.18	56.93	174.48	174.47	115.92	116.12		

400.00KW REACTOR COOLED BY NATURAL CONVECTION(516 FLATES AT 1.3953KW PER PLATE)
 MARGIN TO INCIPIENT BOILING: 37.32 C 67.18 F AT THE NODE NO. 10

CHANNEL DIMENSIONS:	WIDTH	THICKNESS	HEIGHT	AREA	HYDRAULIC DIAMETER	
	(M)	.0665800	.0028900	.6050000	.0001924	.0055395
	(FT)	.2184383	.0094816	1.9849021	.0020712	.0181744

AFTER 5 ITERATIONS. PRESSURES: BUOYANT=36.84314 FRICTION=36.84305 PA
 = .76949 = .76949 LB/FT 2

VELOCITY(IN. OUT)CM/S= 6.028 6.096 FLOWRATE(KG/S)= .01155. WATER TEMPERATURE(IN. OUT)DEG C= 28.0 56.9
 FT/S= .1978 .2000 (LB/SEC)= .02546 DEG F= 82.4 134.5

```

C     NATURAL CONVECTION IN MTR RESEARCH REACTORS (BY R.S.SMITH)
C           OHIO STATE UNIVERSITY
C     FORTRAN77 (MS FORTRAN) VERSION: AUG86-IPEN/BRAZIL H.NAKATA
C
C     IMPLICIT REAL*8 (A-H,K,L,M,O-Z)
C     INTEGER OUFILF
C     REAL*4 NUSSEL,NU
C     DIMENSION QVZ(21),Z(21),DZ(21),ZR(21),DIN(21),TAVE(21),VG(30)
C     X ,DELTF(30),HCI(30),TWALL(30),P(30),TSAT(30),TINCIP(30),PSTAT(30)
C     X ,QFLUX(30),TITLE(10)
C
C ----- NAMELIST FOR FORTRAN IV -----
C     NAMELIST /INPUT/NN,IPRT,TPOOL,FUELHT,FUELWT,FUWLTK,FUELK,CLADTK,
C     X CLADK,CHANHT,CHANWT,CHANTK,NSTDEL,NFLTSE,NCONEL,NFLTCE,DELTA,
C     X VGUESS,DEPTH,RPEAK,CPWR,ZR,QVZ
C ----- COMMON FOR FORTRAN77 (MICROSOFT) -----
C     COMMON/INLST/NN,IPRT,TPOOL,FUELHT,FUELWT,FUWLTK,FUELK,CLADTK,
C     X CLADK,CHANHT,CHANWT,CHANTK,NSTDEL,NFLTSE,NCONEL,NFLTCE,DELTA,
C     X VGUESS,DEPTH,RPEAK,CPWR,ZR,QVZ,LAST,PROF
C     PI = 3.14159
C     TGC=2.0
C     RPEAK=1.0
C     CPWR=0.0
C     IPRT=0
C     ICASE=0
C ----- FOR FORTRAN77 -----
C     INFILE = 7
C     OPEN(INFILE,FILE='NATCON.DAT')
C     OUFILF = 6
C --- OPTIONS FOR OUTPUT FILE DEFINITION -----
C     OPEN(OUFILF,FILE='NATCON.OUT',STATUS='NEW')
C     OPEN(OUFILF,FILE='LPT1')
C     WRITE(*,2)
C     WRITE(OUFILF,3)
C 2 FORMAT('1',10('/),
C     X 7X,'*****'/
C     X 7X,'*',55X,'**'/
C     X 7X,'*                               N A T C O N                               **/'
C     X 7X,'*',55X,'**'/
C     X 7X,'*****'/
C 3 FORMAT('1',29('/),
C     X40X,'*****'/
C     X40X,'*',55X,'**'/
C     X40X,'*                               N A T C O N                               **/'
C     X40X,'*',55X,'**'/
C     X40X,'* N A T U R A L   C O N V E C T I O N   P R O G R A M **/'
C     X40X,'*',55X,'**'/40X,'*',55X,'**'/
C     X40X,'*                               O H I O   S T A T E   U N I V E R S I T Y   -   R . S .   S M I T H                               **/'
C     X40X,'*                               F O R T R A N 7 7   V E R S I O N   -   I P E N / B R A Z I L   -   H . N A K A T A                               **/'
C     X40X,'*****'/
C
C     ENTER PARAMETERS
C
C 11 FORMAT(10A8)
C
C ----- FOR FORTRAN77 -----
C     500 CALL READIN(INFILE,OUFILF,TITLE)
C ----- FOR FORTRAN IV -----
C     READ(S,11) TITLE
C 500 READ(S,INPUT)
C
C     IF (NN.EQ.0) GOTO 9999
C     ICASE=ICASE+1

```

```

1 FORMAT ('1 *****'/
X      ' * * * * *')
X      ' * * * * *'
X      ' * * * * *'
X      ' * * * * *'
X      ' *****')
WRITE(*,1) ICASE
WRITE(*,12) TITLE
WRITE(OUFILE,1) ICASE
WRITE(OUFILE,12) TITLE
12 FORMAT(1H0,10A8)
DTINCP=1000.0
NEWCAS=0
DTOTAL=10.0
DINC=50.0
IF(CPWR.GT.0.0) DTOTAL=CPWR
NN1=NN+1
DO 18 I=1,NN1
IF(PROF.EQ.'SIN') QVZ(I)=SIN(PI*ZR(I))
IF(PROF.EQ.'BOT') QVZ(I)=SIN(PI*ZR(I))*(ZR(NN1)-ZR(I))
IF(PROF.EQ.'TOP') QVZ(I)=SIN(PI*ZR(I))*ZR(I)
18 CONTINUE
SUM = 0.0
DO 19 I=1,NN
I1=I+1
19 SUM=SUM+0.5*(QVZ(I)+QVZ(I1))*(ZR(I1)-ZR(I))
C
C UNHEATED LENGTH
C
UNHTZ=(CHANHT-FUELHT)
C----- CANCELLED FOR FORTRAN 77 -----
C WRITE(OUFILE,INPUT)
C
CAREA=CHANWT*CHANTK
HYDIAM=4.0*CAREA/(2.0*(CHANWT+CHANTK))
CALL WATER(OUFILE,TF00L,RHOIN,DVISIN,CPIN,KIN)
PROTT=101326.0+9.8*RHOIN*DEPTH
C
C SYSTEM CALCULATION
C
501 ITR=0
WRITE(*,99) DTOTAL
99 FORMAT(//' CORE POWER=',F8.2,' KW'/' ',22('_'))
WRITE(OUFILE,9) DTOTAL
9 FORMAT(//' CORE POWER=',F8.2,' KW'/' ',22('_'))
IDONE=0
NPLATE=NSTDEL*NPLTSE+NCNEL*NPLTCE
OPLATE=DTOTAL*RPEAF/FLOAT(NPLATE)
CALL FFCON(OUFILE,FFC,NUSSEL,CHANWT,CHANTK)
DO 20 I=1,NN1
I1=I-1
Z(I)=ZR(I)*FUELHT
IF(1.EQ.1)GOTO 20
DZ(I1)=Z(I)-Z(I1)
C
C HEAT PER AXIAL NODE: KW
C
QIN(I1)=OPLATE*DZ(I1)*0.5*(QVZ(I1)+QVZ(I))/(FUELHT*SUM)
C
C LOCAL HEAT FLUX: W/M**2
C
OFLUX(I1)=1000.0*QIN(I1)/(2.0*FUELWT*DZ(I1))
20 CONTINUE
C

```

```

C      ITERATE ON VELOCITY TO BALANCE BUOYANT WITH FRICTION FORCES
C      AND ENTRANCE/EXIT LOSSES
C
25  ITR=ITR+1
    IF (ITR.GT.30) STOP
    VG(ITR)=VGUESS
    RHOV=RHOIN*VGUESS
    RV2G=RHOV**2/TGC
    REYNUM=RHOV*HYDIAM
    MDOT=RHOIN*CAREA*VGUESS
5   FORMAT (I5, B(1X, E13.6))
4   FORMAT (//3X, ' ITR', 4X, ' BUOYF', 9X, ' FRICF', 9X, ' DELTF', 10X, ' TOUT', 9X,
X      ' VGUESS', 9X, ' MDOT')
C
C      ENTRANCE LOSS (SHARP EDGED)
C
C      FRICF=0.5/RHOIN
C
C      UNHEATED LENGTH (CORE BOTTOM) PRESSURE DROP
C
    REYNO=REYNUM/DVISIN
    FF=FFC/REYNO
    FRICF=FRICF+FF*0.5*UNHTZ/(HYDIAM*RHOIN)
    BUOYF=0.0
    CPOLD=CPIN
    TIN=TFOOL
C
    DO 30 I=1, NN
    TOUT=TIN+QIN(I)/(MDOT*CPOLD)
    TAVE(I)=(TIN+TOUT)/2.0
    CALL WATER (OUFILE, TAVE(I), RHOI, DVISI, CPI, KI)
    BUOYF=BUOYF+9.8*(RHOIN-RHOI)*DZ(I)
    REYNO=REYNUM/DVISI
    FF=FFC/REYNO
    FRICF=FRICF+FF*DZ(I)/(HYDIAM*RHOI)
C
C      ACTUAL AND INCIPIENT WALL TEMPS
C
    AZ=2.0*CHANWT*DZ(I)
    HCI(I)=KI*NUSSEL/HYDIAM
    TWALL(I)=TAVE(I)+1000.0*QIN(I)/(HCI(I)*AZ)
    F(I)=PBOTT-FRICF*RV2G
    VI=VGUESS*RHOIN/RHOI
    PSTAT(I)=F(I)-RHOI*VI**2/TGC
    CALL WTSAT (PSTAT(I), TSAT(I))
    TINCIP(I)=TSAT(I)+(556.61*DFLUX(I)/
X      (F(I)**1.156)**(P(I)**0.0234/2.62845))/1.8
    TIN=TOUT
    IF (IPRT.EQ.0) GOTO 30
    WRITE (OUFILE, 111)
111  FORMAT (' ADDITIONAL DEBUG OUTPUT ONLY')
    WRITE (OUFILE, 5) I, TOUT, TAVE(I), RHOI, DVISI, CPI, FFC, F(I), TSAT(I)
    WRITE (OUFILE, 5) ITR, HCI(I), TWALL(I), TINCIP(I), BUOYF, REYNO, FF, FRICF
30  CPOLD=CPI
C
C      UNHEATED LENGTH (CORE TOP) PRESSURE DROP AND
C      EXIT LOSS ADDED IN & CORRECTED TO N/M 2 FROM M 3/KG
C
    FRICF=FRICF+FF*0.5*UNHTZ/(HYDIAM*RHOI)
    FRICF=(FRICF+.0/RHOI)*RV2G
    DELTF(ITR)=BUOYF-FRICF
    IF (ITR.EQ.1) WRITE (*, 4)
    IF (ITR.EQ.1) WRITE (OUFILE, 4)

```

```

WRITE(* ,5) ITR, BUOYF, FRICF, DELTF(ITR), TOUT, VGUESS, MDDT
WRITE(OUFILE,5) ITR, BUOYF, FRICF, DELTF(ITR), TOUT, VGUESS, MDDT
IF(DABS(DELTF(ITR)/DELTF(I)).LT.DELTA) IDONE=1
IF(IPRT.EQ.0.AND.IDONE.EQ.0) GOTO 36
WRITE(OUFILE,6)
6 FORMAT('0 I HEIGHT HT FLUX Q/NODE H T COEF TFUEL C/L T WALL '
X , ' T WATER PRESSURE STAT P T SAT T INCIP')
WRITE(OUFILE,8)
8 FORMAT(' M W/M 2 KW W/(M2 K) C C '
X , ' C KPA KPA C C')
DO 35 I=1,NN
F1=F(I)/1000.0
F2=PSTAT(I)/1000.0
TFCL=TWALL(I)+QFLUX(I)*(FUELTK/FUELK+CLADTK/CLADK)
35 WRITE(OUFILE,7) I, Z(I), QFLUX(I), QIN(I), HCI(I), TFCL, TWALL(I)
X , TAVE(I), F1, F2, TSAT(I), TINCIP(I)
IF (IDONE.EQ.1) GOTO 50
7 FORMAT(14, 3X, F6.3, 2X, F6.0, 2X, F6.4, 2X, F6.1, 2X, 3(2X, F6.2), 4X,
X 4(2X, F6.2))
36 IF(ITR.EQ.1) GOTO 40
ITR1=ITR-1
VGUESS=VG(ITR)-(VG(ITR1)-VG(ITR))*DELTF(ITR)/
X (DELTF(ITR1)-DELTF(ITR))
GOTO 25
40 IF(DELTF(ITR).LT.0.0) VGUESS=VGUESS*0.9
IF(DELTF(ITR).GE.0.0) VGUESS=VGUESS*1.1
GOTO 25
C
C
C PRINT RESULTS
50 VOUT=RHOIN*VGUESS/RHOI
IF(NEWCAS.EQ.0) DTOLD=DTINCP
NINCP=1
DO 52 I=1,NN
TEMP = TINCIP(I)-TWALL(I)
IF(TEMP.GT.DTINCP) GOTO 52
DTINCP=TEMP
NINCP=I
52 CONTINUE
DF=DTINCP*1.8
CWF=CHANWT/0.3048
CTF=CHANTK/0.3048
FLF=FUELHT/0.3048
CAREAF=CAREA/0.0929
HYDM=HYDIAM/0.3048
BF=BUOYF/47.88
FRF=FRICF/47.88
VGS=VGUESS*100.0
VD=VOUT*100.0
VGF=VGS/30.48
VOF=VD/30.48
MSF=MDDT/0.4536
TWF=(TPOOL+273.15)*1.8-459.67
TOF=(TOUT +273.15)*1.8-459.67
WRITE(* ,60) CTOTAL, NPLATE, QPLATE, DTINCP, DF, NINCP
WRITE(OUFILE,60) CTOTAL, NPLATE, QPLATE, DTINCP, DF, NINCP
WRITE(OUFILE,61) CHANWT, CHANTK, FUELHT, CAREA, HYDIAM, CWF, CTF
X , FLF, CAREAF, HYDM
WRITE(* ,62) ITR, BUOYF, FRICF, BF, FRF
WRITE(OUFILE,62) ITR, BUOYF, FRICF, BF, FRF
WRITE(OUFILE,63) VGS, VD, MDDT, TPOOL, TOUT, VGF, VOF, MSF, TWF, TOF
60 FORMAT('////1X, F10.2, *KW REACTOR COOLED BY NATURAL CONVECTION*
X 15, * PLATES AT *FB.4, *KW PER PLATE*/9X, *MARGIN TO INCIPIENT *

```

```

X 'BOILING:',F8.2,' C',F8.2,' F AT THE NODE NO.',I3)
61 FORMAT(/// CHANNEL DIMENSIONS: WIDTH THICKNESS ',
X ' HEIGHT AREA HYDRAULIC DIAMETER'/20X,' (M) ',
X 5(1X,F10.7)/20X,' (FT)',5(1X,F10.7))
62 FORMAT(/// AFTER',I4,' ITERATIONS, PRESSURES: BUOYANT='
X ',F8.5,' FRICTION=',F8.5,' FAT/41X,'=',F8.5,9X,'=',F8.5,
X ' LB/FT 2')
63 FORMAT(/// VELOCITY (IN,OUT) CM/S=',2F7.3,' FLOWRATE (KG/S)=' ,F8.5,
X ', WATER TEMPERATURE (IN,OUT) DEG C=',2F7.1/17X,' FT/S=',2F7.4,
X 7X,' (LB/SEC)=' ,F8.5,27X,' DEG F=' ,2F7.1)
IF (NEWCAS.EQ.3) GOTO 500
D2INCP=DABS(DTOLD-DTINCP)
IF (DTINCP.GT.0.0.AND.NEWCAS.EQ.0) GOTO 65
DINC=DINC+DTINCP/D2INCP
NEWCAS=NEWCAS+1
DTOLD=DTINCP
DTINCP=1000.0
65 DTOTAL=DTOTAL+DINC
IF (CPWR.GT.0.0) GOTO 500
IF (DTOTAL.GT.50.0 .AND. DTOTAL.LT.61.0) DTOTAL=50.0
IF (DTOTAL.GT.251.0 .AND. NEWCAS.EQ.0) DINC=100.0
GOTO 501
9999 CONTINUE
STOP
END

```

```

C
C ===== SUBROUTINE READIN (FOR FORTRAN77) =====
C

```

```

SUBROUTINE READIN(INFILE,OUFILE,TITLE)
IMPLICIT REAL*8(A-H,K,L,M,O-Z)
INTEGER OUFILE
REAL*4 COMM(15)
REAL*4 COMMEN(19)
DIMENSION ZR(21),QVZ(21),TITLE(10)
COMMON/INLST/NN,IPRT,TPOOL,FUELHT,FUELWT,FUWLTK,FUELK,CLADTK,
X CLADK,CHANHT,CHANWT,CHANTK,NSTDEL,NFLTSE,NCONEL,NFLTCE,DELTA,
X VQUESS,DEPTH,RFPEAK,CPWR,ZR,QVZ, LAST, PROF
LAST=' '
PROF=' '
10 FORMAT(A3,15A4)
20 FORMAT(1X,A3,19A4)
11 FORMAT(10A8)
21 FORMAT('1',10A8)
13 FORMAT(120 ,15A4)
14 FORMAT(E20.10,15A4)
23 FORMAT(1X, 120 ,15A4)
24 FORMAT(1X,1PE20.10,15A4)
READ(INFILE,10) LAST , COMMEN
IF (LAST.EQ.'END') STOP
BACKSPACE INFILE
READ(INFILE,11) TITLE
WRITE(OUFILE,21) TITLE
READ(INFILE,13) NN , COMM
WRITE(OUFILE,23) NN , COMM
READ(INFILE,13) IPRT , COMM
WRITE(OUFILE,23) IPRT , COMM
READ(INFILE,14) TPOOL , COMM
WRITE(OUFILE,24) TPOOL , COMM
READ(INFILE,14) FUELHT , COMM
WRITE(OUFILE,24) FUELHT , COMM
READ(INFILE,14) FUELWT , COMM
WRITE(OUFILE,24) FUELWT , COMM
READ(INFILE,14) FUELTK , COMM

```

```

X          988.5,985.8,983.3,980.3,977.3,973.7,970.2,966.7,963.2,
X          955.1,946.7,937.2,928.1,918.0,890.4,859.4,825.7,785.2,
X          735.5,678.7/
DATA DYNVIS/179.E-5,155.E-5,131.E-5,112.E-5,98.E-5,86.E-5,
X          76.5E-5,68.2E-5,61.6E-5,56.2E-5,51.3E-5,
X          47.1E-5,43.0E-5,40.1E-5,37.2E-5,34.7E-5,32.7E-5,
X          30.6E-5,26.7E-5,24.4E-5,21.9E-5,19.8E-5,18.6E-5,
X          15.7E-5,13.6E-5,12.0E-5,10.7E-5,9.51E-5,8.68E-5/
DATA CP/4.225,4.208,4.195,4.186,4.179,4.179,4.174,4.174,4.174,
X          4.174,4.179,4.179,4.183,4.186,4.191,4.195,4.199,4.204,
X          4.216,4.227,4.250,4.271,4.296,4.371,4.467,4.585,4.731,
X          5.024,5.703/
DATA TCON/.566,.575,.585,.595,.604,.614,.623,.630,.637,.644,.649,
X          .654,.659,.665,.668,.673,.675,.678,.684,.685,.685,.685,
X          684,.677,.665,.646,.616,.574,.517/
IF (TEMP.LT.T(1)).OR.TEMP.GT.T(29)) GOTO 200
DO 10 I=2,29
10 IF (TEMP.LT.T(I)) GOTO 15
15 I1=I-1
RHO =DEN(I1) + (DEN(I) -DEN(I1)) *(TEMP-T(I1))/(T(I)-T(I1))
DVIS=DYNVIS(I1)+(DYNVIS(I)-DYNVIS(I1))*(TEMP-T(I1))/(T(I)-T(I1))
SPHT=CP(I1) +(CP(I) -CP(I1)) *(TEMP-T(I1))/(T(I)-T(I1))
K =TCON(I1) +(TCON(I) -TCON(I1)) *(TEMP-T(I1))/(T(I)-T(I1))
RETURN
200 WRITE (OUFILE,1) TEMP,T(1),T(29)
1 FORMAT(' TEMPERATURE ',F10.2,' DEG C IS OUT OF RANGE(',2F8.2,')')
STOP
END

```

C
C
C

===== SUBROUTINE FFCON =====

```

C          SUBROUTINE FFCON(OUFILE,C,NU,W,THK)
C          IMPLICIT REAL*8(A-H,K,L,N,O-Z)
C          INTEGER OUFILE
C          REAL*4 NUSSEL(8),NU
C          DIMENSION RATIO(11),CON(11),RATON(8)
C
C          FRICTION FACTOR CONST FOR RECTANGULAR DUCT IN F/CON/REYNOLD NO.
C          FROM ECKERT & IRVINE, HT LAB U. MINN, 1957
C
C          NUSSELT NO. FOR RECTANGULAR DUCT (AVG. BETWEEN CONST C & CONST T)
C          FROM "CONV. HEAT & MASS TRANSFER", W.M.KAYS,1966
C
C          DATA CON/58.,63.,69.,72.5,77.,80.,83.,85.,88.,69.,96./
C          DATA RATIO/1.,2.,3.,4.,5.,6.3,8.,11.,15.,18.,100./
C          DATA NUSSEL/3.3,3.8,4.3,5.7,6.28,6.9,7.2,7.89/
C          DATA RATON/1.,2.2,4.,5.8,8.,13.8,19.,200./
C          IF (THK.GT.W) GOTO 200
C          WOT=W/THK
C          IF (WOT.LT.RATIO(11)) GOTO 9
C          C=CON(11)
C          GOTO 100
C          9 DO 10 I=3,11
C          10 IF (WOT.LT.RATIO(I)) GOTO 15
C          15 I1=I-1
C          C=CON(I1)+(CON(I)-CON(I1))*(WOT-RATIO(I1))/(RATIO(I)-RATIO(I1))
C          100 IF (WOT.LT.RATON(8)) GOTO 19
C          NU=NUSSEL(8)
C          RETURN
C          19 DO 20 I=2,8
C          20 IF (WOT.LT.RATON(I)) GOTO 25
C          25 I1=I-1
C          NU=NUSSEL(I1)+(NUSSEL(I)-NUSSEL(I1))*(WOT-RATON(I1))/

```

```

X                                     (RATION(I)-RATION(I1))
RETURN
200 WRITE(OUFILE,1)W,THK
1 FORMAT(' WIDTH(',FB,2,') CAN NOT BE LESS THAN THE THICKNESS(',
X FB,2,')')
STOP
END
C
C===== SUBROUTINE WTSAT =====9
C
SUBROUTINE WTSAT(PX,TSATX)
IMPLICIT REAL*8(A-H,K,L,M,O-Z)
DIMENSION T(30),P(30)
DATA T/
X 5., 10., 15., 20., 25.,
X 30., 35., 40., 45., 50.,
X 55., 60., 65., 70., 75.,
X 80., 85., 90., 95.,100.,
X105.,110.,115.,120.,125.,
X130.,135.,140.,145.,150./
DATA P/
X .008719E5, .012277E5, .017041E5, .02337E5, .03166E5,
X .04241E5, .05622E5, .07375E5, .09584E5, .12335E5,
X .15740E5, .19917E5, .2501E5, .3117E5, .3855E5,
X .4736E5, .5781E5, .7011E5, .8451E5, 1.0131E5,
X 1.2079E5, 1.4326E5, 1.6905E5, 1.9854E5, 2.3208E5,
X 2.7011E5, 3.130E5, 3.614E5, 4.155E5, 4.760E5/
DO 100 N=1,29
NN=N
NP1=N+1
IF(PX.LT.P(NP1)) GOTO 110
100 CONTINUE
110 CONTINUE
TSATX=T(NN)+(PX-P(NN))/(P(NP1)-P(NN))*(T(NP1)-T(NN))
RETURN
END
C===== END OF NATCON =====

```