

Eng. Petrov V.V.  
Eng. Kashirin V.I.  
Eng. Kalmykov A.V.  
(JSC «Izhorskie Zavody»)

## **Design Analysis Technique of Thermo-hydraulic Processes in Billibino NPP Reactor Unit on Lumped Parameter Model**

### **Annotation**

The thermal state of reactor plant is characterized by volume-averaged temperature and pressure of the coolant in circuit and by temperature of graphite stack. Time changing of these parameters is determined by a solution of a system of 18 ordinary differential equations, describing mass and energy variation in the coolant and graphite stack and also operation of basic elements and systems, such as nutritious water regulator, safety valves, guarding regulators, safety systems etc. For the account of peculiarities of an outflow at breakups in different spots of circuit within the framework of point model the different types of leaks are used. Phase state of the coolant in the circuit volume may be both single-phase and two-phase.

Инж. Петров В.В.  
 Инж. Каширин В.И.  
 Инж. Калмыков А.В.  
 (ОАО «Ижорские заводы»)

Методика расчетного исследования теплогидравлических процессов в реакторной установке Билибинской АЭС по модели сосредоточенных параметров

Тепловое состояние реакторной установки характеризуется усредненными по объему температурой и давлением теплоносителя в контуре и температурой графитовой кладки. Изменение этих параметров во времени определяется решением системы из 18 обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение массы и энергии в теплоносителе и графитовой кладке, а также работу основных элементов и систем, таких как регулятор питательной воды, предохранительные клапана, стерегущие регуляторы, системы безопасности и др. Для учета особенностей истечения при разрывах в разных точках контура в рамках точечной модели используются различные типы течей. Фазовое состояние теплоносителя в объеме контура может быть как однофазным, так и двухфазным.

1. Динамика теплоносителя

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{1}{V}(\Gamma N_{\Sigma} + a^2 J) \quad (1)$$

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{1}{V}(\Gamma N_{\Sigma} + a^2 J) \quad \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{M} \left( \frac{Q}{c_v} + \Gamma T J \right) \quad (2)$$

$$\frac{dM}{d\tau} = J \quad (3)$$

где P - давление теплоносителя в ОЦК,

t - температура теплоносителя в ОЦК,

M - масса теплоносителя в ОЦК,

V - геометрический объем ОЦК, включая барабан-

сепаратор и трубопроводы,

$N_{\Sigma}$ - суммарная тепловая мощность, подведенная к теплоносителю,

$J$  - скорость изменения массы теплоносителя в ОЦК,

$C_v$ - изохорная теплоемкость теплоносителя,

$\Gamma$  - коэффициент Грюнейзена теплоносителя,

$a$  - скорость звука.

$$J = G_{\text{пн}} + G_{\text{апэн}} + G_{\text{аспов}} - G_{\text{т}} - G_{\text{ср1}} - G_{\text{ср2}} - G_{\text{пр1}} - G_{\text{пр2}} - G_{\text{пр3}} - G_{\text{т1}} - G_{\text{т2}} \quad (4)$$

где:  $G_{\text{пн}}$  - расход, подаваемый питательным насосом,

$G_{\text{апэн}}, G_{\text{аспов}}$  - расход, подаваемый АПЭН, АСПОВ,

$G_{\text{т}}$  - расход пара на турбину,

$G_{\text{ср1}}, G_{\text{ср2}}$  - расход пара через первый и второй стерегущие регуляторы,

$G_{\text{пр1}}, G_{\text{пр2}}, G_{\text{пр3}}$  - расходы пара через предохранительные клапаны,

$G_{\text{т1}}, G_{\text{т2}}$  - расходы теплоносителя в места разрывов.

Суммарная тепловая мощность, подведенная к теплоносителю

определяется соотношением:

$$N_{\Sigma} = N_{\text{т}} + N_{\text{тг}} + G_{\text{пн}}(i_{\text{пн}} - i_{\text{р}}) + G_{\text{апэн}}(i_{\text{апэн}} - i_{\text{р}}) + G_{\text{аспов}}(i_{\text{аспов}} - i_{\text{р}}) - (G_{\text{т}} + G_{\text{ср1}} + G_{\text{ср2}} + G_{\text{пр1}} + G_{\text{пр2}} + G_{\text{пр3}})(i'' - i_{\text{р}}) - G_{\text{т1}}(i_{\text{т1}} - i_{\text{р}}) - G_{\text{т2}}(i_{\text{т2}} - i_{\text{р}}) \quad (5)$$

где:  $i_{\text{р}}$  - средняя энтальпия теплоносителя в ОЦК,

$i_{\text{пн}}$  - энтальпия воды, подаваемая питательным насосом,

$i_{\text{аспов}}$  - энтальпия воды АСПОВ,

$i''$  - энтальпия насыщенного пара в ОЦК,

$i_{\text{т1}}, i_{\text{т2}}$  - энтальпия теплоносителя, уходящего в разрывы,

$N_{\text{т}}$  - мощность твэл, выделяемая непосредственно в теплоноситель,

$N_{\text{тг}}$  - тепловая мощность, передаваемая непосредственно в

теплоноситель в результате теплообмена между теплоносителем и

графитом.

## 2. Температура графитовой кладки

$$\frac{dt_{гр}}{d\tau} = \frac{N_{гр} - N_{тг}}{W_{гр}} \quad (6)$$

где:  $N_{гр}$  - мощность тепловыделений, выделяемых непосредственно в графите,

$W_{тг}$  - суммарный водяной эквивалент графита в активной зоне.

$$N_{тг} = K_{т}(t_{гр} - t) \quad (7)$$

Коэффициент пропорциональности  $K_{т}$  определяется в предположении о постоянстве во всем переходном процессе эффективного коэффициента теплопередачи от теплоносителя к графиту.

$$K_{т} = \frac{N_{гр0}}{t_{гр0} - t_0} \quad (8)$$

где:  $N_{гр0}, t_{гр0}, t_0$  - заданные параметры стационарного состояния

## 3. Мощность энерговыделений

$$N = N_{т} + N_{гр} \quad (9)$$

где:  $N_{т}$  - мощность, выделяемая непосредственно в теплоносителе (а в действительности в ТВЭлах).

После срабатывания аварийной защиты мощность реактора начинает падать и складывается из двух составляющих: остаточные тепловыделения от распада продуктов деления и энерговыделения за счет деления урана и плутония в процессе снижения нейтронного потока при введении стержней АЗ в активную зону. При этом одна часть тепловыделений от распада продуктов деления выделяется непосредственно в теплоносителе (фактически

в твэлах), а другая - в графитовой кладке.

Принято, что при срабатывании АЗ-1 и АЗ-II в последовательности АЗ-II - АЗ-1, характер изменения остаточных тепловыделений таков, как если бы процесс проходил со стационарного состояния с уровнем мощности, равным мощности на момент срабатывания АЗ-1.

С учетом вышеизложенного величины тепловыделений в теплоносителе  $N_T$  и в графите  $N_{ГР}$  определяются соотношениями:

$$N_T = N_0 \left[ \eta_{A32} \left( \eta_{A31R} (1 - \varepsilon_{ГР}) + \eta_{A31N} \right) \right] \quad (10)$$

$$N_{ГР} = N_0 \eta_{A32} \eta_{A31R} \cdot \varepsilon_{ГР} \quad (11)$$

где:  $\eta_{A32}$  - относительные энергосвыделения после срабатывания АЗ-II,

$\eta_{A31R}$  - относительные энергосвыделения от распада продуктов деления после срабатывания АЗ-1,

$\eta_{A31N}$  - то же за счет деления урана и плутония,

$\varepsilon_{ГР}$  - доля тепловыделений, выделяемая в графите ( $\varepsilon_{ГР} = \varepsilon(\tau_{РА31})$ ).

$$\eta_{A32} = \begin{cases} 1 & , \text{ при } \tau_{РА32} = 0 \\ 1 - 0,0445\tau & , \text{ при } 0 < \tau_{РА32} \leq 10 \\ \eta_2(\tau_{РА32}) & , \text{ при } \tau_{РА32} > 10 \end{cases} \quad (12)$$

где:  $\tau_{РА32}$  - время, прошедшее с начала срабатывания АЗ-II,

$\eta_2$  - заданная функция изменения остаточных энергосвыделений.

$$\eta_{A31R} = \begin{cases} 0,12 & , \text{ при } \tau_{РА31} = 0 \\ \eta_{1R}(\tau_{РА31}) & , \text{ при } \tau_{РА31} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\eta_{A31N} = \begin{cases} 0,88 & , \text{ при } \tau_{РА31} = 0 \\ \eta_{1N}(\tau_{РА31}) & , \text{ при } \tau_{РА31} > 0 \end{cases} \quad (14)$$

где:  $\tau_{РА31}$  - время, прошедшее с начала срабатывания АЗ-I,

$\eta_{1R}, \eta_{1N}, \varepsilon$  - заданные функции.

В данной математической модели с целью получения единообразного алгоритма использован методический прием, при котором величина  $\tau_{РА31}$  и  $\tau_{РА32}$  описываются дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d\tau_{PA31}}{d\tau} = C_{\tau A31} \quad (15)$$

$$\frac{d\tau_{PA32}}{d\tau} = C_{\tau A32} \quad (16)$$

с начальными условиями  $\tau_{PA31}(0) = 0$   
 $\tau_{PA32}(0) = 0$

Правые части (15) и (16) определяются соотношениями, описывающими работу автоматики РУ:

$$C_{\tau A31} = \begin{cases} 1, & \text{при } H_{ур} < H_{урA31} \text{ или } P < P_{A31} \\ & \text{или } \tau_{PA31} > 0 \text{ или } \tau > \tau_{A31} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (17)$$

где:  $H_{ур}$  - положение уровня в барабан-сепараторе,

$P$  - давление в контуре,

$H_{урA31}$  - уставка на срабатывание АЗ-1 по уровню в барабане

$P_{A31}$  - уставка на срабатывание АЗ-1 по давлению в контуре,

$\tau_{A31}$  - заданный момент срабатывания АЗ-1 по внешним причинам.

$$C_{\tau A32} = \begin{cases} 1, & \text{при } G_{пн} < G_{пнA32} \text{ или } \tau_{рстк} > 0 \\ & \text{или } \tau_{PA32} > 0 \text{ или } \tau_{A32} > 0 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (18)$$

где:  $G_{пн}$  - расход, подаваемый в контур питательными насосами,

$G_{пнA32}$  - уставка на срабатывание АЗ-II по расходу питательного насоса,

$\tau_{рстк}$  - время, прошедшее после закрытия стопорного клапана турбины,

$\tau_{A32}$  - заданный момент срабатывания АЗ-II по внешним причинам.

#### 4. Питательный узел

Расход  $G_{пн}$ , подаваемый в контур питательным насосом в общем случае определяется как корень уравнения:

$$P = \Delta P_{НАС}(G_{пн}) = \Delta P_{СОПР}(G_{пн}) \quad (19)$$

где:  $P$  - давление в реакторе,

$\Delta P_{НАС}(G_{пн})$  - заданная характеристика питательного насоса,

$\Delta P_{СОПР}(G_{пн})$  - сопротивление тракта подачи питательной воды, определяемое сопротивлением питательного узла

$$\Delta P_{СОПР}(G_{пн}) = \sum_{ЭЖВ} \frac{G_{пн}^2}{2\rho_{ПВ} S_{ЭЖВ}^2} \quad (20)$$

где:  $\sum_{ЭЖВ}$  - эквивалентное местное сопротивление питательного узла,

$\rho_{ПВ}$  - плотность питательной воды,

$S_{ЭЖВ}$  - площадь приведения.

Изменение во времени степеней открытия клапанов и задвижек описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dh_1}{d\tau} = \begin{cases} U_1, & \text{при } |U_1| < \frac{1}{T_1} \text{ и } 0 < h_1 < 1 \\ \frac{1}{T_1}, & \text{при } U_1 \geq \frac{1}{T_1} \text{ и } 0 < h_1 < 1 \\ -\frac{1}{T_1}, & \text{при } U_1 \leq -\frac{1}{T_1} \text{ и } 0 < h_1 < 1 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (26)$$

$h_1(0) = h_{10}$  - заданная константа

$$\frac{dh_2}{d\tau} = \begin{cases} U_2, & \text{при } |U_2| < \frac{1}{T_2} \text{ и } 0 < h_2 < 1 \\ \frac{1}{T_2}, & \text{при } U_2 \geq \frac{1}{T_2} \text{ и } 0 < h_2 < 1 \\ -\frac{1}{T_2}, & \text{при } U_2 \leq -\frac{1}{T_2} \text{ и } 0 < h_2 < 1 \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (27)$$

$h_2(0) = h_{20}$  - заданная константа

$$\frac{dh_{10}}{d\tau} = \begin{cases} \frac{1}{T_{10}}, & \text{при } h_{10} > 0 \text{ и } \tau > \tau_{РАЗ1} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (28)$$

$h_{10}(0) = 1$  - заданная константа

$$\frac{dh_{13}}{d\tau} = \begin{cases} \frac{1}{T_{13}}, & \text{при } h_{13} < 1 \text{ и } \tau > \tau_{pA31} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (29)$$

$$h_{13}(0) = 0$$

$$\frac{dh_{14}}{d\tau} = \begin{cases} -\frac{1}{T_{14}}, & \text{при } h_{14} > 0 \text{ и } \tau > \tau_{pA31} \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (30)$$

$$h_{14}(0) = 1$$

Величины  $T_1, T_2, T_{10}, T_{13}, T_{14}$  являются заданными константами.

$$U_1 = U_2 = K_{106}(D_p - G_{пн}) - K_{109}H_{yp} + K_{107} \frac{d}{d\tau}(D_p - G_{пн}) - K_{123} \frac{dH_{yp}}{d\tau} \quad (31)$$

где:  $D_p$  - расход пара,

$K_{106}, \dots, K_{123}$  - заданные константы-параметры настройки регулятора.

#### 5. Стопорный клапан турбины

$$G_{стк} = \begin{cases} G_{то} & \text{при } \tau_{рстк} = 0 \\ 0 & \text{при } \tau_{рстк} > 0 \end{cases}$$

где:  $\tau_{рстк}$  - время, прошедшее после посадки стопорного клапана.

$$\frac{d\tau_{рстк}}{d\tau} = G_{стк} \quad (35)$$

с начальным условием  $\tau_{рстк}(0) = 0$

где правая часть  $G_{стк}$  определяется соотношением, описывающим работу автоматики РУ.

#### 6. Стерегающий регулятор

Изменение во времени степеней открытия клапанов стерегающего регулятора описываются дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dh_p}{d\tau} = \frac{1}{T_p} \operatorname{sign} \left( \frac{p - p_{1н}}{p_{1к} - p_{1н}} - H_p \right) \quad (39)$$



$$\frac{dH_{от}}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{T_{от}}, \text{ при } [\tau_{рАЗ1} > \tau_{зот1} \text{ или } \tau_{рАЗ2} > \tau_{зот2} \\ \text{или } P > P_{от}] \text{ и } H_{от} < 0 \\ -\frac{1}{T_{от}}, \text{ при } [\tau_{рАЗ1} \leq \tau_{зот1} \text{ и } \tau_{рАЗ2} < \tau_{зот2} \\ \text{или } P \leq P_{от} \text{ и } H_{от} > 0] \\ 0, \text{ в остальных случаях} \end{cases} \quad (40)$$

с начальными условиями:

$$H_p(0) = \frac{P_0 - P_{1н}}{P_{1к} - P_{1н}}$$

$$H_{от}(0) = 0$$

где:  $P_0$  - номинальное давление в контуре,

$\tau_{зот1}$  - задержка начала открытия отсечных клапанов после срабатывания АЗ-1,

$\tau_{зот2}$  - то же после срабатывания АЗ-II,

$P_{от}$  - уставка на срабатывание отсечного клапана по давлению в контуре,

$\tau_{от}, P_{к}, P_{1н}$  - заданные константы.

## 7. Предохранительные клапана

Расход через предохранительный клапан определяется по формуле критического истечения насыщенного пара:

$$G_{пр} = A_{пр} P / \sqrt{T_{абс}} \quad (41)$$

где:  $P$  - давления в контуре,

$T_{абс}$  - абсолютная температура пара,

$A_{пр}$  - заданная константа.

## 8. Система АСПОВ

$$G_{аспов} = \begin{cases} 0, \text{ если } \tau_{расп} < \tau_{засп} \text{ или} \\ \sum_{i=1}^6 A_{гакп i} (P_{аспов} - P)^{i-1} \text{ - в остальных случаях} \end{cases} \quad (44)$$

где:  $\tau_{расп}$  - время, прошедшее после выработки сигнала на срабатывание АСПОВ,

- $\tau_{засп}$  - запаздывание срабатывания АСПОВ,  
 $\tau_{асп}$  - заданный момент принудительного отключения АСПОВ,  
 $P_{аспо}$  - заданное давление в системе АСПОВ,  
 $A_{гаспi}$  - заданные константы.

$$\frac{d\tau_{расп}}{d\tau} = C_{асп} \quad (45)$$

с начальным условием  $\tau_{расп}(0) = 0$ ,  
 где правая часть  $C_{асп}$  определяется соотношением, описывающим работу автоматики РУ.

#### 9. Аварийный питательный насос

$$\begin{aligned}
 & 0, \text{ если } \tau_{рапн} = 0 \text{ или } \tau \geq \tau_{апн} \\
 & \sum_{i=1}^{\epsilon} A_{гапнi} (P_{апно} - P)^{i-1} \text{ в остальных случаях} \quad (47)
 \end{aligned}$$

- где:  $\tau_{рапн}$  - время работы АПЭН,  
 $\tau_{апн}$  - заданный момент принудительного отключения АПЭН,  
 $P_{апно}$  - заданное давление в системе АПЭН,  
 $A_{гапнi}$  - заданные константы.

$$\frac{d\tau_{рапн}}{d\tau} = C_{тапн} \quad (48)$$

с начальным условием  $\tau_{рапн}(0) = 0$ ,  
 где правая часть  $C_{тапн}$  определяется соотношением, описывающим работу автоматики РУ.

#### 10. Расчет расходов пароводяной смеси в течь

Расчет производится по методике с использованием соотношений для критического сечения:

$$G = f \sqrt{\frac{K_* P_*}{v_*}} \quad (55)$$

$$P_* = \epsilon * P_0 \quad (56)$$

$$\varepsilon_* = \left( \frac{2}{\kappa_* + 1} \right)^{\kappa_* - 1} \quad (57)$$

$$v_* = v_*'' x_* - v_*' (1 - x_*) \quad (58)$$

$$x_* = \frac{i_* - i_*'}{i_*'' - i_*'} \quad (59)$$

$$\kappa_* = 3,198 e^{-0,921 \beta_*} \quad (60)$$

$$\beta_* = \left[ 1 + \left( \frac{1}{x_*} - 1 \right) \left( \frac{v_*'}{v_*''} \right) \right]^{-1} \quad (61)$$

где:  $P_0$  - давление торможения в конце тракта течи, непосредственно перед отверстием истечения,

$P_*$  - критическое давление,

$v_*', v_*, v_*''$  - удельные объемы соответственно воды, пара и смеси,

$i_*', i_*, i_*''$  - энтальпии соответственно воды, пара и смеси,

$\kappa_*$  - показатель изоэнтропы в критическом сечении,

$x_*, \beta_*$  - весовое и объемные паросодержания.

Уравнения (55)-(61) дополняются уравнением для гидравлических потерь по тракту течи, записанными в виде:

$$P - P_0 = \frac{\xi}{F^2} \cdot \frac{G^2 \bar{v}}{2} \quad (62)$$

С учетом (56) уравнение (62) можно переписать в виде:

$$F(P_*) = P - \frac{P_*}{\varepsilon_*} - \frac{\xi}{F^2} \cdot \frac{G^2 \bar{v}}{2} = 0 \quad (66)$$

Решение этого уравнения на интервале  $[1, P]$  позволяет определить  $P^*$  и затем по соотношению (55) определить  $G$ .

## 11. Алгоритм расчета

Описанная математическая модель динамики РУ представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{d\vec{Y}}{d\tau} = \vec{F}(\vec{Y}, \tau) \quad (75)$$

Вектор  $\vec{Y}$  состоит из 20 компонент:

$P, t, M, \tau_{гр}, \tau_{рз1}, \tau_{рз2}, h_1, h_2, h_{10}, h_{23}, h_{14}, G_{п}, \tau_{рстк}, H_{р1}, H_{от1}, H_{р2}, H_{от2}, \tau_{расп}, \tau_{рапн}, \tau_{кр}$ .

Для решения системы ( 75) используется алгоритм RK45, реализующий метод Рунге-Кутты 4-5 порядка с автоматическим выбором шага интегрирования.