

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ОТСЕЧЕННОМ НЕГЕРМЕТИЧНОМ ПАРОГЕНЕРАТОРЕ В СОСТАВЕ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ СУДОВОЙ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В.И. Королев

*Государственная морская академия (ГМА) им. адм. С.О. Макарова,
г. Санкт-Петербург*



Существенной проблемой при эксплуатации судовых реакторных установок (РУ) атомных ледоколов является разгерметизация трубной системы парогенераторов (ПГ). Обычно наработка до первого отказа составляет 40–70 тысяч часов. В дальнейшем поток отказов имеет систематический характер. Всего зафиксировано около 200 случаев отказов ПГ с образованием течей в трубной системе. При наличии негерметичной секции в ПГ на действующей РУ регламентом эксплуатации предусматривается процедура надежного отсечения данного ПГ по питательной воде и пару. Это необходимо для недопущения попадания загрязненного радиоактивными нуклидами теплоносителя в пароводяной цикл. Для локализации трубной системы негерметичного ПГ сначала дистанционно закрывается его отсечной клапан по питательной воде, затем остатки питательной воды выпариваются в стояночный конденсатор. После продувки трубной системы ПГ закрываются его паровые задвижки. В дальнейшем внутренняя полость трубной системы текущего ПГ постепенно заполняется теплоносителем. Заполнение происходит до тех пор, пока давления между первым и вторым контурами не сравняются. Далее маневрирование РУ недопустимо, поскольку может привести к разрыву трубной системы аварийного парогенератора из-за расширения воды в замкнутом объеме. В этой связи целесообразно заранее оценивать имеющийся интервал времени до введения ограничений на маневрирование РУ – критического времени $\tau_{кр}$.

Рассмотрим физические процессы, происходящие в отсеченном негерметичном парогенераторе. Пусть в момент времени $\tau = \tau_0^{(1)}$ трубная система негерметичного ПГ отсечена по второму контуру запорной арматурой и в ней установилось давление $p_{П,н}$. При этом давление теплоносителя в межтрубном пространстве составляет $p_T \approx \text{const}$. Под действием перепада давлений во внутреннюю полость трубок ПГ поступает теплоноситель с начальным расходом $G_{ПЧ,0}^{(1)}$.

На рисунке 1 показана схема процесса изотермического сжатия теплоносителя в трубной системе отсеченного негерметичного парогенератора в координа-

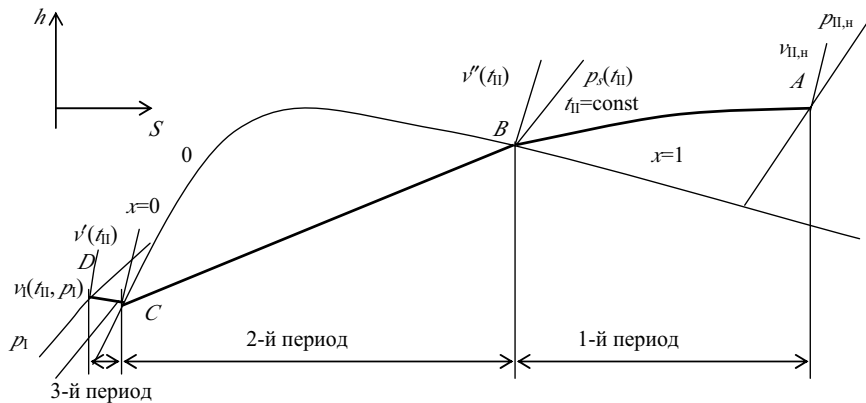


Рис. 1. Схема процесса изотермического сжатия теплоносителя в трубной системе отсеченного негерметичного парогенератора в координатах h,s -диаграммы

тах h, s -диаграммы. Процесс заполнения трубной системы теплоносителем можно разделить на три характерных периода.

Первый период. В начальный момент времени (на рис. 1 точка A) давление в трубной системе отсеченного парогенератора значительно меньше, чем в первом контуре $p_{II,n} \ll p_I$, и горячий теплоноситель, поступающий через неплотность в трубной системе, вскипает в полости трубок ПГ. Перегретый пар заполняет объем внутри трубной системы ПГ и имеет температуру примерно равную температуре теплоносителя на выходе из реактора $t_{II} \approx t_2$.

Пусть начальный удельный объем пара в трубной системе равен $v_{II,n}$. По мере увеличения массы пара в трубной системе его удельный объем уменьшается до $v''(t_{II})$ и растет давление в полости трубок ПГ вплоть до давления насыщения при температуре пара $p_s(t_{II})$. В результате в точке B (см. рис. 1) образуется сухой насыщенный пар. По опыту эксплуатации длительность первого периода протечки может составлять 50–200 часов.

Второй период. При достижении в трубной системе давления насыщения дальнейшее повышение давления прекращается, поскольку в паре начинается конденсация влаги и за счет этого удельный объем влажного пара снижается (плотность растет) при неизменном давлении. Данный период продолжается вплоть до полной конденсации пара в точке C (рис.1) и заполнения трубной системы кипящим конденсатом с удельным объемом $v'(t_{II})$. Давление на протяжении всего периода не изменяется и равно давлению насыщения при температуре конденсата

$$p_{II}^{(2)} = p_s(t_{II}) \approx \text{const}.$$

По опыту эксплуатации длительность второго периода протечки может достигать двух-трех месяцев. В течение второго периода протечки давление в трубной системе практически не растет, но контроль продолжается с почасовой записью в журнале оператора. Окончание второго периода оператор идентифицирует по началу роста давления при постоянной мощности РУ. С этого момента контроль за текущим ПГ усиливается и экспериментально определяется безопасная скорость подъема мощности.

Третий период. Трубная система отсеченного негерметичного ПГ полностью заполнена теплоносителем (водой). Удельный объем среды в ПГ уменьшается из-за продолжающегося поступления теплоносителя через неплотность в трубной системе. Давление в ПГ вновь повышается вплоть до давления в I контуре $p_{II}^{(3)} = p_I$. При этом в точке D (рис. 1) удельный объем теплоносителя будет $v_{II}^{(3)} = v(t_{II}, p_I)$.

Квазистационарный процесс изотермического сжатия среды в трубках отсеченного ПГ моделируется в координатах h, s -диаграммы кривой $ABCD$ (см. рис.1). При этом процесс AB – изотермическое сжатие перегретого пара в трубной системе – начинается от параметров при заданных начальных условиях с момента времени $\tau = \tau_0^{(1)}$ и продолжается до момента $\tau = \tau_{N_1}^{(1)}$. Процесс BC – конденсация пара в трубной системе (изобарный процесс) – начинается с момента времени $\tau = \tau_{N_1}^{(1)} = \tau_0^{(2)}$ и заканчивается к моменту времени $\tau = \tau_{N_2}^{(2)}$. Процесс CD – изотермическое сжатие теплоносителя (воды) в трубной системе ПГ – начинается с момента времени $\tau = \tau_{N_2}^{(2)} = \tau_0^{(3)}$ и заканчивается к моменту времени $\tau = \tau_{N_3}^{(3)}$.

Следует отметить, что время заполнения трубной системы парогенератора теплоносителем и подъем давления в трубках до давления в первом контуре в общем случае зависят от начальных условий ($p_{II,н}, t_{II}$), начальной интенсивности течи $G_{пч,0}^{(1)}$ и ее развития во времени, а также режимов эксплуатации РУ за данный период.

Протечки в трубной системе ПГ классифицируются по интенсивности, размерам и характеру изменения во времени (см. рис. 2). С точки зрения проницаемости течи (по размерам) различают *водяную течь (или макронеплотность)*, когда теплоноситель проникает в рабочее тело, и *газовую неплотность (или микротечь)*, когда в рабочее тело проникают только газообразные радиоактивные продукты из теплоносителя.

По характеру проявления течи (изменению во времени) могут быть *однократными*, т.е. проявляющимися однократно с последующим длительным перерывом. Математической моделью данного вида течи может быть неэлементарная функция сигнум:

$$f_3(\tau) = \text{sign}(f_{3,0}). \quad (1)$$

Функция принимает значение $f_{3,0}$ на некотором интервале времени $\Delta\tau_1$, затем она равна нулю (т.е. течь сворачивается и ее проходное сечение равно нулю) на интервале времени $\Delta\tau_2$ и вновь течь проявляется через интервал времени $\Delta\tau_1$.

У *пульсирующей течи* периодически изменяется интенсивность. Математическая модель пульсирующей (периодической) течи может быть представлена в виде

$$f_3(\tau) = 0,5 f_{3,0} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T} \tau\right) \right]. \quad (2)$$

Постоянные течи длительный период остаются на одном уровне, т.е. эквивалентное проходное сечение течи $f_{3,0} \approx \text{const}$.



Рис. 2. Классификация течей в трубной системе парогенератора

Развивающиеся течи интенсивно нарастают по определенному закону (как правило, экспоненциальному). По опыту эксплуатации величина протечки может увеличиваться в 5–10 раз от минимально контролируемой 100 г/ч до 1 кг/ч. Моделью данного вида течи может быть соотношение вида

$$f_3(\tau) = f_{3,0} \cdot e^{a\tau}, \quad (3)$$

где $f_{3,0}$ – начальное эквивалентное проходное сечение течи в трубной системе, зафиксированное на начальной стадии натечки теплоносителя; a – коэффициент, учитывающий темп развития течи (увеличения сечения течи во времени), может быть равным 0,001–0,0015; T – период течи; τ – текущее время.

В соответствии с концепцией «течь перед разрушением» микротрещины развиваются в макротрещины и соответственно газовая неплотность – в малую течь. При этом максимальной разгерметизацией считается размер критического сквозного дефекта, соответствующего течи через круглое отверстие с эквивалентным диаметром 4 мм. Надежно контролируемая течь соответствует эквивалентному диаметру 0,36 мм. Размер минимально контролируемой течи принят из условия, что средства радиационного контроля атомного судна надежно регистрируют течь в размере не менее 0,5 кг/ч.

Допустим, в момент времени $\tau = \tau_0^{(1)}$ текущий парогенератор отсечен по питательной воде и пару, смежный ЦНПК переведен на МО и затем остановлен. При этом давление в отсеченном ПГ установилось $p_{II} = p_{II,n}$ при температуре $t_{II,n}$. Начальный удельный объем среды в трубной системе отсеченного ПГ определим из выражения

$$v_{II,n} = V_{II}^{II} / m_0, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (4)$$

где $m = m_0$ – начальная масса оставшейся в парогенераторе среды (вода, пар); V_{II}^{II} – объем трубной системы отсеченного ПГ (от задвижки по питательной воде до паровой).

Оценим величину начальной течи в трубной системе из следующих соображений. Допустим за времена $\Delta\tau_1^{(1)}$ давление в отсеченном ПГ увеличилось на $\Delta p_{II,1}^{(1)}$. При этом необходимо, чтобы температура теплоносителя на выходе активной зоны не менялась в течение рассматриваемого времени, т.е. $t_{II} = \text{const}$. Изменение давления среды в ПГ через время $\Delta\tau_1^{(1)}$ определим из соотношения

$$\Delta p_{II,1}^{(1)} = - \left(\frac{\partial p_{II}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} \left(\frac{V_{II}^{II}}{m_0 + \bar{G}_{II,0}^{(1)} \cdot \Delta\tau_1^{(1)}} - \frac{V_{II}^{II}}{m_0} \right). \quad (5)$$

Из выражения (5) найдем величину начальной течи в трубной системе:

$$\bar{G}_{II,0}^{(1)} = - \frac{\Delta p_{II,1}^{(1)} \cdot m_0^2}{\left[- \left(\frac{\partial p_{II}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} V_{II}^{II} + \Delta p_{II,1}^{(1)} m_0 \right] \Delta\tau_1^{(1)}}, \quad (6)$$

где $-\left(\frac{\partial p_{II}}{\partial v}\right)_{t=\text{const}}$ – частная производная изменения давления в трубной системе по изменению удельного объема при постоянной температуре.

При начальном давлении в отсеченном негерметичном ПГ $p_{II} = p_{II,n}$ и температуре среды $t_{II,n}$ начальную массу среды в трубной системе можно найти из соотношения

$$m_0 = \frac{V_{\text{ПГ},0}^{\text{II}}}{v(p_{\text{II},\text{H}}, t_{\text{II},\text{H}})}, \text{ кг.} \quad (7)$$

С учетом (7) выражение (6) можно привести к виду

$$\bar{G}_{\text{ПЧ},0}^{(1)} = - \frac{\Delta p_{\text{II},1}^{(1)} \cdot V_{\text{ПГ},0}^{\text{II}}}{\left[\frac{\Delta p_{\text{II},1}^{(1)}}{v(p_{\text{II},\text{H}}, t_{\text{II},\text{H}})} - \left(\frac{\partial p_{\text{II}}^{(1)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} \right] \cdot [v(p_{\text{II},\text{H}}, t_{\text{II},\text{H}})]^2 \Delta \tau_1^{(1)}}. \quad (8)$$

Изменение давления в отсеченном ПГ на i -ом интервале времени для j -го периода $\Delta \tau_i^{(j)}$ можно представить в виде полного дифференциала:

$$\Delta p_{\text{II},i}^{(j)} = \left(\frac{\partial p_{\text{II}}^{(j)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} \Delta v_{\text{II},i}^{(j)} + \left(\frac{\partial p_{\text{II}}^{(j)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}} \Delta t_{\text{II},i}^{(j)}, \quad (9)$$

где $\left(\frac{\partial p_{\text{II}}^{(j)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}}$, $\left(\frac{\partial p_{\text{II}}^{(j)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}}$ – частные производные изменения давления в трубной системе соответственно по изменению удельного объема среды в ней при постоянной температуре и по изменению температуры среды при постоянном удельном объеме.

Расход теплоносителя через неплотность в трубной системе зависит от перепада давлений между первым p_{I} и вторым p_{II} контурами в текущем парогенераторе. При этом дефект может иметь большую протяженность по отношению к ее ширине и глубине. В работе [1] показано, что в коротких каналах падение давления у выходной кромки тем больше, чем короче канал. При этом течение становится метастабильным, а из-за возрастания перепада давления в канале увеличивается массовый расход течи. По всей длине канала образуется метастабильный поток перегретой жидкости, сопровождаемый резким падением давления и температуры. Чем больший перепад давлений устанавливается при истечении, тем больше будет расход истекающей жидкости во внутренний объем трубной системы. При консервативном подходе можно принять, что давление за каналом скачкообразно изменяется до противодействия. В этой связи можно принять модель истечения через дефект, при которой давление с внешней стороны дефекта к внутренней меняется скачкообразно. Примем для оценок расчетную зависимость вида

$$G_{\text{ПЧ}}(p_{\text{II}}) = \mu \cdot f_3 \sqrt{\frac{2(p_{\text{I}} - p_{\text{II}})}{\bar{v}}} = f_3^* \sqrt{\frac{2(p_{\text{I}} - p_{\text{II}})}{\bar{v}}} = f_3^* \sqrt{\frac{2}{\bar{v}}} \sqrt{p_{\text{I}} - p_{\text{II}}}, \quad (10)$$

где f_3 – эквивалентное сечение неплотности; μ – коэффициент расхода для течи; \bar{v} – средний удельный объем истекающего в пространство трубной системы теплоносителя.

Для начального момента времени $\tau = \tau_0^{(1)}$ расход теплоносителя через неплотность в трубной системе определяется из выражения

$$G_{\text{ПЧ},0}^{(1)} = \mu \cdot f_3 \sqrt{\frac{2(p_{\text{I}} - p_{\text{II},\text{H}})}{\bar{v}}} = f_3^* \sqrt{\frac{2}{\bar{v}}} \sqrt{p_{\text{I}} - p_{\text{II},\text{H}}}. \quad (11)$$

Найдем отношение расходов для двух режимов при условии, что сечение течи не изменяется $f_{3,0} \approx \text{const}$:

$$\frac{G_{\text{ПЧ},1}^{(1)}}{G_{\text{ПЧ},0}^{(1)}} \approx \sqrt{\frac{p_{\text{I}} - p_{\text{II},1}}{p_{\text{I}} - p_{\text{II},\text{H}}}} = \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{\text{II},1}}{p_{\text{I}} - p_{\text{II},\text{H}}}}, \text{ откуда } G_{\text{ПЧ},1}^{(1)} = G_{\text{ПЧ},0}^{(1)} \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{\text{II},1}}{p_{\text{I}} - p_{\text{II},\text{H}}}}, \quad (12)$$

где $\Delta p_{II,1} = p_{II,1} - p_{II,n}$ – изменение давления в трубной системе в процессе натечки теплоносителя при $\tau_1^{(1)} = \tau_0^{(1)} + \Delta\tau_1^{(1)}$.

Пусть величина начальной протечки для первого периода за время $\Delta\tau_1^{(1)}$ составляет $G_{пч,0}^{(1)}$, кг/ч. В дальнейшем *течь имеет постоянный характер*. Для любого момента времени по аналогии с выражением (12) величина протечки в i -ый момент времени для первого периода составит

$$G_{пч,i}^{(1)} = k_G G_{пч,(i-1)}^{(1)} \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{II,i}^{(1)}}{p_I - p_{II,(i-1)}}} = k_G G_{пч,0}^{(1)} \sqrt{\frac{p_I - p_{II,i}^{(1)}}{p_I - p_{II,n}}} = k_G G_{пч,0}^{(1)} \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_1} \Delta p_{II,i}^{(1)}}{p_I - p_{II,n}}}. \quad (13)$$

Величина протечки в конце первого периода равна величине протечки в начале второго и третьего периодов (при условии неизменности проходного сечения течи):

$$G_{пч,N_1}^{(1)} = G_{пч,N_2}^{(2)} = k_G G_{пч,0}^{(1)} \sqrt{\frac{p_I - p_s(t_{II})}{p_I - p_{II,n}}}. \quad (14)$$

В любой i -ый момент времени величина протечки для третьего периода оценивается из соотношения

$$G_{пч,i}^{(3)} = k_G G_{пч,(i-1)}^{(3)} \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{II,i}^{(3)}}{p_I - p_{II,(i-1)}}} = k_G G_{пч,0}^{(3)} \sqrt{\frac{p_I - p_{II,i}^{(3)}}{p_I - p_s(t_{II})}} = k_G G_{пч,0}^{(3)} \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_{II,i}^{(3)}}{p_I - p_s(t_{II})}}. \quad (15)$$

Величина протечки в конце третьего периода $G_{пч,N_3}^{(3)} = 0$.

Здесь $i=1, 2, 3, \dots, N_1$ – количество интервалов времени для первого периода натечки; $i=1, 2, 3, \dots, N_3$ – количество интервалов времени для третьего периода натечки; k_G – поправка на расход теплоносителя, получаемая при контроле роста давления в реальном времени (учитывает отклонение температуры среды в трубной системе от среднестатистической и адекватность используемой математической модели реальному процессу).

Представим выражение $\left[1 - \frac{\Delta p_{II}}{p_I - p_{II,n}}\right]^{0,5}$ в виде первых двух членом бинома Ньютона:

$$\left[1 + \left(-\frac{\Delta p_{II}}{p_I - p_{II,n}}\right)\right]^{0,5} \approx 1 - 0,5 \left(\frac{1}{p_I - p_{II,n}} \Delta p_{II}\right) - 0,125 \left(\frac{1}{p_I - p_{II,n}} \Delta p_{II}\right)^2 + \dots \quad (16)$$

Средний расход течи на интервале времени $\Delta\tau_i^{(j)}$ для j -го периода, где $j=1,3$, с учетом выражения (16)

$$\begin{aligned} \bar{G}_{пч,i}^{(j)} &= 0,5 G_{пч,(i-1)}^{(j)} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{II,i}^{(j)}}{p_I - p_{II,(i-1)}}}\right) \approx \\ &\approx 0,5 G_{пч,(i-1)}^{(j)} \left[2 - 0,5 \left(\frac{1}{p_I - p_{II,(i-1)}} \Delta p_{II,i}^{(j)}\right) - 0,125 \left(\frac{1}{p_I - p_{II,(i-1)}} \Delta p_{II,i}^{(j)}\right)^2 + \dots\right] \approx \\ &\approx G_{пч,(i-1)}^{(j)} \left[1 - 0,25 \left(\frac{1}{p_I - p_{II,(i-1)}} \Delta p_{II,i}^{(j)}\right) + \dots\right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Для первого и третьего периодов на интервале времени $\Delta\tau_i^{(j)}$ изменение давления в трубной системе можно определить по формуле (9):

$$\Delta p_{\Pi,i}^{(j)} = - \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(j)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} \left(v_{\Pi,i}^{(j)} - v_{\Pi,i-1}^{(j)} \right) + \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(j)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}} \left(t_{\Pi,i}^{(j)} - t_{\Pi,i-1}^{(j)} \right). \quad (18)$$

При этом из-за непрерывной натечки теплоносителя удельный объем среды в трубной системе регулярно изменяется. Температура среды изменяется вместе с температурой теплоносителя, омывающего трубки (например, из-за изменения мощности, циркуляции теплоносителя, регулирования средней температуры и т.д.), и носит случайный характер.

Подставив в выражение (18) значение удельного объема через интервал времени $\Delta\tau_i^{(j)}$, получим

$$\Delta p_{\Pi,i}^{(j)} = - \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(j)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} v_{\Pi,i-1}^{(j)} \left[\frac{V_{\Pi\Gamma,0}^{\Pi}}{V_{\Pi\Gamma,0}^{\Pi} + 0,5G_{\Pi\Gamma,i-1}^{(j)} v_{\Pi,i-1}^{(j)} \Delta\tau_i^{(j)} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\Delta p_{\Pi,i}^{(j)}}{p_1 - p_{\Pi,i-1}^{(j)}}} \right)} - 1 \right] + \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(j)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}} \left(t_{\Pi,i}^{(j)} - t_{\Pi,i-1}^{(j)} \right). \quad (19)$$

С учетом (17) выражение (19) можно переписать в следующем виде:

$$\Delta p_{\Pi,i}^{(j)} = - \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(j)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} v_{\Pi,i-1}^{(j)} \left[\frac{V_{\Pi\Gamma,0}^{\Pi}}{V_{\Pi\Gamma,0}^{\Pi} + G_{\Pi\Gamma,i-1}^{(j)} v_{\Pi,i-1}^{(j)} \Delta\tau_i^{(j)} \left(1 - 0,25 \frac{\Delta p_{\Pi,i}^{(j)}}{p_1 - p_{\Pi,i-1}^{(j)}} \right)} - 1 \right] + \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(j)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}} \left(t_{\Pi,i}^{(j)} - t_{\Pi,i-1}^{(j)} \right). \quad (20)$$

Для любого i -го интервала времени по аналогии с выражением (20) можно записать:

- первый период

$$\Delta p_{\Pi,i}^{(1)} = - \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(1)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} v_{\Pi,i-1}^{(1)} \left[\frac{V_{\Pi\Gamma,0}^{\Pi}}{V_{\Pi\Gamma,0}^{\Pi} + G_{\Pi\Gamma,i-1}^{(1)} v_{\Pi,i-1}^{(1)} \Delta\tau_i^{(1)} \left(1 - 0,25 \frac{\Delta p_{\Pi,i}^{(1)}}{p_1 - p_{\Pi,i-1}^{(1)}} \right)} - 1 \right] + \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(1)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}} \left(t_{\Pi,i}^{(1)} - t_{\Pi,i-1}^{(1)} \right); \quad (21)$$

- второй период

$$\Delta p_{\Pi,i}^{(2)} = \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(2)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}} \left(t_{\Pi,i}^{(2)} - t_{\Pi,i-1}^{(2)} \right); \quad (22)$$

• третий период

$$\Delta p_{\Pi,i}^{(3)} = - \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(3)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}} v_{\Pi,(i-1)}^{(3)} \left[\frac{V_{\Pi,0}^{\Pi}}{V_{\Pi,0}^{\Pi} + G_{\Pi,0}^{(3)} v_{\Pi,(i-1)}^{(3)} \Delta \tau_i^{(3)} \left(1 - 0,25 \frac{\Delta p_{\Pi,1}^{(3)}}{p_1 - p_{\Pi,(i-1)}^{(3)}} \right)} - 1 \right] + \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(3)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}} (t_{\Pi,i}^{(3)} - t_{\Pi,(i-1)}^{(3)}). \quad (23)$$

Выражения (21) и (23) для j -го периода ($j = 1, 3$) можно привести к квадратному уравнению следующего вида:

$$\Delta p_{\Pi,i}^{(j)} = 0,5 A_{\tau,(i-1)}^{(j)} - \sqrt{0,25 \left(A_{\tau,(i-1)}^{(j)} \right)^2 - 4 \left(B_{\tau,(i-1)}^{(j)} + D_{(i-1)}^{(j)} \right)}, \quad (24)$$

$$\text{где } A_{\tau,(i-1)}^{(j)} = 4 \left(p_1 - p_{\Pi,(i-1)}^{(j)} \right) \left(\frac{V_{\Pi,0}^{\Pi}}{G_{\Pi,0}^{(j)} v_{\Pi,(i-1)}^{(j)} \Delta \tau_i^{(j)} + 1} + 1 \right) + \alpha_{1,j} v_{\Pi,(i-1)}^{(j)} + \alpha_{2,j} \left(t_{\Pi,i}^{(j)} - t_{\Pi,(i-1)}^{(j)} \right);$$

$$B_{\tau,(i-1)}^{(j)} = \alpha_{2,j} \frac{V_{\Pi,0}^{\Pi}}{G_{\Pi,0}^{(j)} v_{\Pi,(i-1)}^{(j)} \Delta \tau_i^{(j)}} \left(t_{\Pi,i}^{(j)} - t_{\Pi,(i-1)}^{(j)} \right) \left(p_1 - p_{\Pi,(i-1)}^{(j)} \right);$$

$$D_{(i-1)}^{(j)} = \left(p_1 - p_{\Pi,(i-1)}^{(j)} \right) \left[\alpha_{1,j} v_{\Pi,(i-1)}^{(j)} + \alpha_{2,j} \left(t_{\Pi,i}^{(j)} - t_{\Pi,(i-1)}^{(j)} \right) \right]; \alpha_{1,j} = - \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(j)}}{\partial v} \right)_{t=\text{const}};$$

$$\alpha_{2,j} = \left(\frac{\partial p_{\Pi}^{(j)}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}}.$$

При помощи уравнения (24) можно определить увеличение давления в процессе натечки для первого и третьего периодов. При этом признаком окончания первого периода является достижение в трубной системе давления, равного давлению насыщению при температуре среды в трубной системе отсеченного негерметичного парогенератора. Текущее время отсчитывается по счетчику $\tau_i^{(1)} = \tau_0^{(1)} + \sum_{i=1} \Delta \tau_i^{(1)}$, где $i = 1, 2, 3, \dots, N_1$. Окончание первого периода соответствует моменту времени $\tau_{N_1}^{(1)} = \tau_0^{(1)} + \sum_{i=1}^{N_1} \Delta \tau_i^{(1)}$.

Рост давления в течение первого периода определяется из соотношения

$$p_{\Pi,i}^{(1)} = p_{\Pi,n} + \sum_i \Delta p_{\Pi,i}^{(1)}. \text{ В конце первого периода давление равно } p_{\Pi,N_1}^{(1)} = p_{\Pi,n} + \sum_i^{N_1} \Delta p_{\Pi,i}^{(1)}.$$

Длительность второго периода натечки определяется исходя из условия, что натечка идет при постоянном расходе:

$$\Delta \tau_{N_2}^{(2)} = \frac{V_{\Pi,0}^{\Pi}}{k_G G_{\Pi,0}^{(1)}} \frac{v''(t_{\Pi,N_2}^{(2)}) - v'(t_{\Pi,N_2}^{(2)})}{\sqrt{\frac{p_1 - p_s(t_{\Pi,N_2}^{(2)})}{p_1 - p_{\Pi,n}}} \frac{v''(t_{\Pi,N_2}^{(2)}) \cdot v'(t_{\Pi,N_2}^{(2)})}{v''(t_{\Pi,N_2}^{(2)}) \cdot v'(t_{\Pi,N_2}^{(2)})}}, \quad (25)$$

где $(t_{\Pi,N_2}^{(2)})$ – средняя температура среды во втором контуре, принятая по результатам статистических наблюдений; v' , v'' – удельные объемы соответственно кипящей воды и насыщенного пара, определенные при средней статистической темпе-

ратуре; p_s – давление насыщения при среднестатистической температуре.

Если измеряемое давление в трубной системе устойчиво превышает давление насыщения при температуре во втором контуре и становится больше, чем соответствующее изменение давления из-за роста температуры среды в трубной системе, то это свидетельствует о начале третьего периода роста давления.

Для идентификации момента окончания второго периода натечки теплоносителя при наблюдении за давлением в реальном времени можно использовать соотношение

$$\left[p_{\Pi, \text{изм}}^{(2)} - p_s(t_{\Pi, i}^{(2)}) \right] \geq \left(\frac{\partial p_{\Pi}}{\partial t} \right)_{v=\text{const}} (t_{\Pi, i}^{(2)} - t_{\Pi, (i-1)}^{(2)}), \quad (26)$$

где $p_{\Pi, \text{изм}}^{(2)}$ – измеренное давление в трубной системе в i -ый момент времени.

Признаком окончания третьего периода является выравнивание давления между первым и вторым контурами в отсеченном парогенераторе. Текущее время от

считывается по счетчику $\tau_i^{(3)} = \tau_0^{(1)} + \sum_{i=1}^{N_1} \Delta \tau_i^{(1)} + \Delta \tau_{N_2}^{(2)} + \sum_{i=1} \Delta \tau_i^{(3)} = \tau_0^{(3)} + \sum_{i=1} \Delta \tau_i^{(3)}$, где $i = 1, 2, 3, \dots, N_3$. Окончание третьего периода соответствует моменту времени

$$\tau_{N_3}^{(3)} = \tau_0^{(1)} + \sum_{i=1}^{N_1} \Delta \tau_i^{(1)} + \Delta \tau_{N_2}^{(2)} + \sum_{i=1}^{N_3} \Delta \tau_i^{(3)}.$$

Рост давления в трубной системе в течение третьего периода натечки определяется из соотношения $p_{\Pi, i}^{(3)} = p_{\Pi, \text{н}} + \sum_i \Delta p_{\Pi, i}^{(1)} + \sum_i \Delta p_{\Pi, i}^{(3)}$. В конце третьего периода давление в трубной системе отсеченного негерметичного парогенератора

$$p_{\Pi, N_3}^{(3)} = p_{\Pi, \text{н}} + \sum_i \Delta p_{\Pi, i}^{(1)} + \sum_i \Delta p_{\Pi, i}^{(3)} = p_1.$$

Приведенная в работе математическая модель процессов в отсеченном негерметичном парогенераторе может быть использована на атомных судах как моделирующая реальный процесс заполнения трубной системы отсеченного негерметичного ПГ теплоносителем. Она может быть реализована на персональном компьютере и при необходимости корректироваться по развитию реального процесса роста давления. Это важно, поскольку эксплуатируемые в настоящее время парогенераторы атомных судов имеют наработку, превышающую 70 тысяч часов, а следовательно, поток отказов ПГ будет неизменно расти. Кроме того математическая модель может быть использована в функционально-аналитических тренажерах, которые разрабатываются для подготовки персонала по эксплуатации атомных судов и других плавучих объектов с ядерной энергетической установкой.

Литература

1. Калайда Ю.А., Арсентьев В.В., Фисенко В.В., Цизин Б.М. Истечение теплоносителя при потере герметичности реакторного контура. – М.: Атомиздат, 1977. – 128 с.

Поступила в редакцию 8.12.2008

phase method in a contour with heavy lead-bismuth coolant is experimentally shown.

Techniques of definition of dynamic parameters of the automatic control system are developed and tested, tests for justification of system serviceability in steady-state conditions of nonisothermal circulating circuit, and also in conditions of a various types of the «provocations» deducing a circuit of the facility from an equilibrium condition on oxidizing potential of the coolant are carried out.

УДК 621.534: 519.7

Realization of the multiple-factor models of thermal conductivity in the multi-layer spherically symmetrical device with fuel element \ A.V. Saenko, A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 19 titles.

Mathematical models of the thermal stationary conductivity in the multi-layer spherically symmetrical device with fuel element are realized for different physical and technological conditions. Boundary-value problems on the thermal field calculation are solved with program system and recommendations on composition of fuel element are formulated.

УДК 536.24: 621.039.534

Thermo-Hydraulic Calculation of the Sodium-Water Steam-Generator for the Case of Steam-Generating Tube Removal and Plugging \ V.V. Hudasko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 11 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 17 titles.

A procedure for the thermo-hydraulic calculation of the sodium-water steam-generator is presented for the case of stem-generator tube removal and plugging. A comparison is given of the calculated data with the experimental ones. Good agreement has been obtained between the calculated and experimental data

УДК 621.039.534.6: 536.24

About Required Determination Accuracy of the Liquid-Metal Coolant Properties in the Fast Reactors \ Y.S. Yuriev, I.T. Afanasieva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages. – References, 7 titles.

The formulas to calculate temperature deviation of the fuel elements as a result of coolant property uncertainty have been obtained. The dispersive method was used to estimate comparatively the contribution of different deviation components. The conclusion about significance of geometric fuel element tolerances, a reactor power deviation, a heat capacity and a coolant density has been drawn.

УДК 621.311.25: 621.039

Model of the Turbine Stage \ A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References, 7 titles.

For calculations in real time the dynamics of NPP turbine department it is necessary to have model of the turbine stage. Due to permanent growth of the requirements to improve the accuracy of NPP simulator the problem arises to create model with accuracy 1% for the description of parameters of turbine stage. The present model is valid for all mode of operation for real time simulation. Results of calculations were compared with known data for some NPP turbines. It proves that the presented model of the turbine meets the requirements on the accuracy if there are data available about the turbine blade's angle for all turbine stages.

УДК 621.039.534

Mathematical Model of Processes in the Cut not Tight Steam Generator as a Part of the Operating Ship Reactor's Installation \ V.I. Korolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 2 illustrations. – References, 1 title.

While in service reactor's installation of a nuclear vessel regular depressurization of trumpet system of direct-flow steam generators is observed. For a non-admission of hit of the active heat-carrier in a steam-and-water cycle, a current steam and gas generator it is reliably cut on the second contour. Further the heat-carrier arrives in trumpet system of the cut steam and gas generator and at a given time completely fills its internal volume. After that moment restrictions on maneuvering are entered into avoidance неопределенности a steam and gas generator because of water expansion in the closed space. It is necessary to define the beginning of this moment. In article the mathematical model of process of growth of pressure in trumpet system of the cut not tight steam generator is developed at work reactor's installation at power levels of capacity.