

Павел КОЛАТ

Технический Университет, Острава

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ
АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ВОДО-ВОДЯНОГО ТИПА

Резюме. В статье описана динамическая нелинейная математическая модель для решения динамики вертикальных корпусных парогенераторов с двумя центральными вертикальными коллекторами, расположенными друг над другом, которая была разработана на Витковицком металлургическом и машиностроительном комбинате им. Клемента Готвальда в Остраве. Целью была оценка динамики вертикального парогенератора с учетом возможного производства этих перспективных типов для АЭС типа ВВЭР 1000. В статье описана программа вычислений для стационарной и динамической модели, дающая возможность решения переходных процессов в номинальных и аварийных состояниях атомной электростанции, во время которых происходит ускоренное и значительное изменение величин на входе и выходе. Результаты моделирования можно также использовать при подготовке документации по технике безопасности для производителя.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рост производства электрической энергии в ЧССР так же, как и в остальных промышленно развитых странах обеспечивается за счет развития атомной энергетики, причем отмечается повышение мощности единичного агрегата атомных электростанций (АЭС) и, тем самым, мощности единичного парогенератора (ПГ), что в свою очередь связано у горизонтальных типов с возрастающими требованиями к застроенному пространству и конструкции защитной оболочки.

Максимально возможный научно-технический прогресс в области атомного машиностроения в странах-членах СЭВ, производство новых прогрессивных конструкций, повышение качества, надежности и долговечности установок для АЭС привели к исследованиям и последующей разработке вертикального парогенератора с двумя центральными вертикальными коллекторами, расположенными над взаимно соединенными трубками теплообменной пластины. Парогенератор был разработан на предприятии концерна ВИТКОВИЦЕ - ВЖСКГ, г. Острава [2].

Исследованиями на моделях занималась также кафедра энергетики Горно-металлургического института (Технический университет) в рамках выполнения государственной научно-исследовательской темы "Исучение и разработка парогенератора вертикального типа" в дипломных работах и научных работах студентов [1]. Перед исследователями стояла цель выполнить комплексную оценку динамики вертикального ПГ для возможного изготовителя на предприятии ВЖСКГ.

Проект любого оборудования для атомной энергетики должен гарантировать его безопасную и надежную эксплуатацию. Кроме нормальной эксплуатации и запланированных переходных процессов, таких, как срабатывание, отключение и изменение мощности АЭС, могут проявляться и нежелательные процессы, которые возникают как результат аварийных повреждений. Проект системы мероприятий по технике безопасности должен поэтому исходить из подробных сведений о ходе всего спектра аварийных процессов, из которых наиболее важными считаются аварии, связанные с утечкой холодильного агента из I контура АЭС. При этом по экономическим причинам превалирует комплексное математическое моделирование и экспериментальная проверка только основных упрощающих предпосылок. Важным элементом с точки зрения безопасности является ПГ, который представляет собой технически сложную и значительно нагруженную систему. В работе представлена математическая модель для решения динамики вертикальных ПГ с 2 центральными вертикальными коллекторами, расположенными друг на другом, которые считаются наиболее перспективными типами вертикальных ПГ с точки зрения возможного применения на АЭС водо-водяного типа. Модель была разработана с учетом потребностей ВЖСКГ, где осуществляется производство для потребностей чехословацкой энергетики и на экспорт в страны СЭВ тяжелых компонентов АЭС, т.е. парогенераторов для блоков ВВЭР 440 и ВВЭР 1000, компенсаторов объема и частей реакторов. Кроме того, научно-исследовательский институт предприятия принимает участие в разработке конструктивных типов вертикальных парогенераторов.

2. ОПИСАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

Вертикальный парогенератор можно применять в системе с 2 и 4 циркуляционными петлями для реактора ВВЭР 1000 при единичной мощности ПГ 800 МВт и 1600 МВт. Такие варианты мощно-

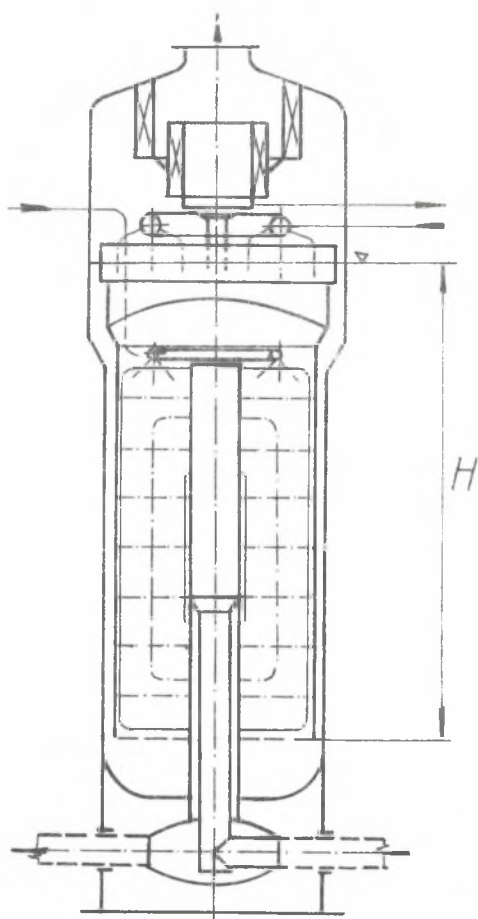


Рис. 1. Схема вертикального парогенератора

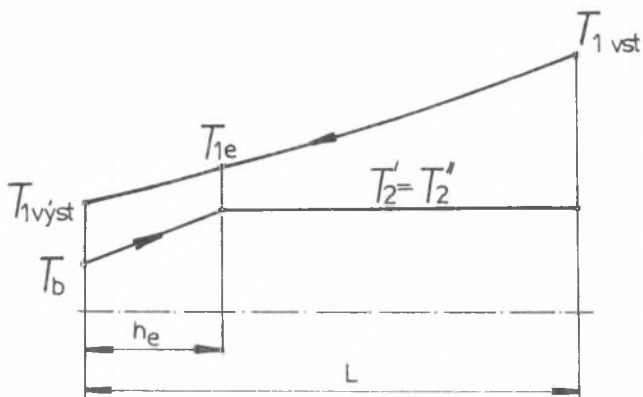


Рис. 2. Характеристики температур теплоносителей 1 и 2 контура в ПГ

сти удовлетворяют настоящим потребностям, а главные тенденции в будущем использовать АЭС для целей теплофикации. Схема собственно ПГ приведена на рис. 1, временная характеристика температуры теплоносителя I и II контура приведена на рис. 2.

Тело ПГ изготовлено из цилиндрического корпуса, закрытого с обеих сторон днищами с наплавленными штуцерами ввода и вывода для первого и второго контура. Внутрикорпусное устройство в ПГ образовано двумя центрически расположенными друг над другом вертикальными коллекторами. Из коллекторов выходят трубки в форме буквы С. По высоте теплообменника поперечно расположены дистанционные решетки, обеспечивающие равномерную циркуляцию и гасящие колебания трубок. В верхней части установлены сепараторы первой ступени, в которую входят центробежные сепараторы. Вторая ступень сепарации совмещена с отводом остаточной влаги из пара с помощью разделительной трубы, введенной под поверхность воды. Под системой грубых сепараторов кроме того расположена система аварийного питания на случай выхода из строя главного привода питающей воды.

3. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

Модель ПГ для потребностей производителя должна описывать переходные процессы более подробно, чем модель для изучения безопасной работы реактора. Другие требования ставятся и при анализе регулирования АЭС.

Проект динамической модели составлен так, чтобы можно было в упрощенной форме проводить расчеты переходных процессов не только при состояниях близких к номинальному, но чтобы модель можно было использовать и для решения аварийных процессов, во время которых происходит значительное изменение входных и выходных величин за короткий отрезок времени. Этому требованию может удовлетворять только нелинейная математическая модель, которая будет учитывать:

- возможность появления теплоносителя первого контура не только в жидком состоянии, но и в состоянии пароводяной смеси,
- возможность изменения направления теплового потока,
- возможность изменения направления потока теплоносителя первого контура.

Вывод модели выполнен на основе следующих упрощений:

- а/ процессы во втором контуре ПГ протекают при термодинамическом равновесии воды и пара,
- б/ не учитывается нестационарная передача тепла в коллекторах, внутренней разделительной трубе и в водоподводящем канале, а также предполагается совершенная теплоизоляция,
- в/ предполагается, что энтальпия отводимого из ПГ пара находится на пределе насыщения i_2'' ,
- г/ предполагается непрерывный дренаж ПГ, равный σ /% паропроизводительности m_p ,
- д/ пучок теплообменных трубок замещен гипотетической трубкой со средней длиной L ,
- е/ первый контур ПГ моделируется как система с распределенными параметрами,
- ж/ во втором контуре предполагаются сосредоточенные параметры за исключением участка экономайзера,
- з/ предполагается совершенное смешивание недогретой питающей воды и насыщенной жидкости, отделенной в сепараторе, с жидкостью в водоподающем канале.

Математическим выражением нестационарных процессов в вертикальном ПГ является система парциальных дифференциальных уравнений, выражающая основные физические закономерности передачи количества движения, энергии и массы у носителя первого и второго контура включая динамику поверхности.

Вазу нелинейного динамического вертикального ПГ с учетом перечисленных выше упрощений составляет, таким образом, следующая система уравнений:

передача количества движения теплоносителя первого контура

$$\frac{1}{S_1} \cdot \frac{\partial \dot{m}_T}{\partial z} + \frac{\partial \rho_1}{\partial z} = \rho_1 \varphi - \frac{\lambda \cdot \dot{m}_T \cdot |\dot{m}_T|}{2 \cdot \rho \cdot S_1^2 \cdot u_c} \quad \text{для воды} \quad (1)$$

$$\frac{1}{S_1} \cdot \frac{\partial \dot{m}_T}{\partial z} + \frac{\partial \rho_1}{\partial z} = \rho_1 \varphi - \frac{\lambda \cdot \phi \cdot \dot{m}_T \cdot |\dot{m}_T|}{2 \cdot \rho_1 \cdot S_1^2 \cdot d_c} \quad \begin{array}{l} \text{для холодоагента} \\ \text{в состоянии смеси} \\ \text{пар-вода} \end{array} \quad (2)$$

уравнение сохранения массы теплоносителя 1 контура

$$S_1 \cdot \frac{\partial \rho_1}{\partial z} + \frac{\partial \dot{m}_T}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

уравнение сохранения энергии теплоносителя 1 контура

$$\dot{m}_T \frac{\partial i_1}{\partial z} + S_1 \rho_1 \cdot \frac{\partial i_1}{\partial z} - S_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial z} = \mp |q_1| \quad (4)$$

закономерности для теплопередачи

$$q_1 - q_2 = n \cdot \tilde{\pi} \cdot d_s \cdot \frac{d_e - d_i}{2} \cdot \rho_{st} \cdot c_{st} \cdot \frac{\partial T_{st}}{\partial z} \quad (5)$$

$$q_1 = \alpha_1 \cdot \tilde{\pi} \cdot d_i \cdot n \cdot (T_1 - T_{st}) \quad (6)$$

$$q_2 = \alpha_2 \cdot \tilde{\pi} \cdot d_e \cdot n \cdot (T_{st} - T_2) \quad (7)$$

уравнение сохранения общей массы теплоносителя 2 контура

$$\dot{m}_w(\tau) - (1 + \sigma) \cdot \dot{m}_p(\tau) - \dot{m}_{pv}(\tau) = \frac{d}{d\tau} \left[V_c \cdot \rho_2'' + (V - V_e - V_2'') \cdot (\rho_2' - \rho_2'') + V_e \cdot (\rho_e - \rho_2'') + V_k \cdot (\rho_k - \rho_2'') \right] \quad (8)$$

уравнение общей энергии теплоносителя 2 контура

$$\dot{m}_w(\tau) \cdot i_w(\tau) - \dot{m}_p(\tau) \cdot (i_2''(\tau) + \sigma \cdot i_2(\tau)) - \dot{m}_{pv}(\tau) \cdot i_2(\tau) + P_e(\tau) + P_v(\tau) + P_{ок}(\tau) = \frac{d}{d\tau} \left[V_c \rho_2'' \cdot u_2'' + (V - V_e - V_2'') \cdot (\rho_2' \cdot u_2' - \rho_2'' \cdot u_2'') + V_e \cdot (\rho_e \cdot u_e - \rho_2'' \cdot u_2'') + V_k \cdot (\rho_k \cdot u_k - \rho_2'' \cdot u_2'') \right] \quad (9)$$

уравнение передачи массы насыщенного пара над поверхностью

$$\dot{m}_w(\tau) - \dot{m}_p(\tau) - \dot{m}_{pv}(\tau) = (V_c - V - V_t) \cdot \frac{\partial p_2''}{\partial p_2} \cdot \frac{dp_2}{d\tau} - p_2'' \cdot \frac{dH}{d\tau} \cdot (S(H) + S_R(H)) \quad (10)$$

уравнение передачи массы и энергии теплоносителя 2 контура в области экономайзера :

$$(c(\tau) + \sigma) \cdot \dot{m}_p(\tau) \cdot (t_6(\tau) - t_2(\tau)) + P_e(\tau) = \frac{d}{d\tau} (p_2 V_e \cdot t_e) \quad (11)$$

уравнение для статической зависимости изменений объема пара под поверхностью воды

$$dV_2'' = \frac{\partial V_2''}{\partial p_2} \cdot dp_2 + \frac{\partial V_2''}{\partial m_2} \cdot dm_2 + \frac{\partial V_2''}{\partial h_2} \cdot \frac{dh_2}{S_e} \quad (12)$$

Уравнения /1/ - /4/ описывают теплоноситель первого контура, уравнения /5/, /6/, /7/ в упрощенной форме моделируют теплопередачу через теплообменные плоскости, уравнения /8/ - /12/ описывают динамическое поведение второго контура.

Величины, входящие в уравнения /1/ - /7/, представляют собой функции двух переменных τ, z , где τ - время, а Z - координата длины. Уравнения, описывающие второй контур, представляют собой обычные дифференциальные уравнения, а величины, входящие в них, являются составными функциями времени. Вся система уравнений /1/ - /12/ должна решаться одновременно совместно с известными начальными и граничными условиями.

Целью решения является определение временных характеристик параметров теплоносителя 1 контура на выходе из парогенератора $\dot{m}_{1\text{вых.}} / \tau /$, $i_{1\text{вых.}} / \tau /$, $P_{1\text{вых.}} / \tau /$, временной характеристики теплопроизводительности из 1 во 2 контур $P / \tau / = P_e / \tau / + P / \tau /$ и временной характеристики параметров теплоносителя второго контура, в первую очередь $P_2 / \tau /$ и высоты уровня в парогенераторе $H / \tau /$.

4. ОПИСАНИЕ ПЕРВОГО КОНТУРА

Динамика первого контура и передача тепла описаны уравнениями /1/ - /7/. Для обычных случаев однофазового теплоносителя действует уравнение /1/. Уравнение /2/, действительное для двухфазной смеси, возможно только в чрезвычайных случаях крупной аварии на первом контуре. Формулы /6/ и /7/ представляют собой граничные условия для решения уравнения /5/, которое выражает тепловой баланс стенки.

Начальные и граничные условия выражены отношениями

$$p_1(\tilde{t}_0, z); \dot{q}_1(\tilde{t}_0, z); m_{\Sigma}(\tilde{t}_0, z); T_1(\tilde{t}_0, z); T_{21}(\tilde{t}_0, z); q_1(\tilde{t}_0, z) = q_2(\tilde{t}_0, z) \\ T_2(\tilde{t}_0, z); p_2(\tilde{t}_0, z); m_{\Sigma}(\tilde{t}_1, z_0); p_1(\tilde{t}_1, z_0); \dot{q}_1(\tilde{t}_1, z_0); p_2(\tilde{t}_1, z); T_2(\tilde{t}_1, z)$$

Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений выполнено по методу конечных разностей, который заключается в том, что производные по координате z и по времени \tilde{t} заменим конечными разностями, а неизвестные величины рассчитываем по выбранным достаточно малым шагам длины ΔZ в интервале $\langle 0; L \rangle$ и шагам времени $\Delta \tau$ в интервале $\langle 0; \tau_m \rangle$

Выбор шага времени связан с выбором шага длины условием стабильности и конвергенции решения системы уравнений /1/ - /7/ - рис. 3.

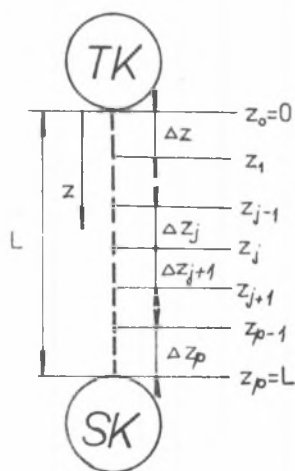


Рис. 3. Разделение средней теплообменной трубки на шаги по длине

5. РЕШЕНИЕ ВТОРОГО КОНТУРА

Эту часть паргенератора /вертикального/ можно разделить на пространство над уровнем воды, наполненное насыщенным паром с объемом V_1'' , и пространство под поверхностью, которое образовано паро-водяной смесью объемом $V' + V_2''$, объемом жидкости на участке экономайзера V_e и объемом жидкости в водоподающем канале V_b .

Для общего объема действительно

$$V_c = V_b + V_e + V' + V_1'' + V_2'' = const. \quad /13/$$

$$V_e = f(h_e); \quad V_b = f(H); \quad V = f(H)$$

выражает прямую зависимость от длины участка экономайзера и высоты уровня в ПГ, а в модели совместно с зависимостями для поверхностей уровней в теплообменном и водоподающем канале $S = f(H)$ и $S_b = f(H)$ учитывают конструкторскую компоновку второго контура ПГ.

Динамическое поведение теплоносителя 2 контура описывают уравнения /8/ - /12/. Эти уравнения образует система дифференциальных уравнений для решения величин $p_2, H, V_e, V_2'', \dot{m}_h$ при нестационарном процессе. Решение возможно только в случае, если известны начальные и граничные условия

$$p_2(t_0); \quad H(t_0); \quad h_e(t_0); \quad V_2''(t_0); \quad c(t_0); \quad \dot{m}_h(t_0) = \dot{m}_p(t_0)$$

$$\dot{m}_w(t); \quad \dot{m}_r(t); \quad t_w(t); \quad P_e(t); \quad P_v(t)$$

Обработкой получим систему линейных алгебраических уравнений для некачеств $\Delta p_2; \Delta H; \Delta V_e; \Delta V_2''; \Delta \dot{m}_h$. Ее решение возможно любым конечным методом решения, например, методом Гаусса, Крамера или методом обратной матрицы.

Для решения второго контура ПГ необходимо знать граничные условия $P_e(t); P_v(t)$, которые являются результатом расчета системы уравнений первого контура ПГ. Обе системы затем должны решаться на каждом шаге времени параллельно.

В предложенной динамической модели ПГ предполагается знание начальных статических характеристик, причем в первую очередь объема водяного компонента под уровнем V_{20}'' и зависимости:

$$\left(\frac{\partial V_2''}{\partial p_2} \right); \quad \left(\frac{\partial V_2''}{\partial \dot{m}_h} \right); \quad \left(\frac{\partial V_2''}{\partial h_e} \right)$$

при различных значениях давления, паропроизводительности и длины участка экономайзера, что позволяет моделировать второй контур ПГ как систему с сосредоточенными параметрами. В дей-

ствительности 2 контур ПГ - это сложная трехразмерная система, причем как с точки зрения термодинамических, так и гидравлических условий. Последние, кроме того, при нестационарных процессах изменяются. Точное решение циркуляции в ПГ в полном объеме при данных условиях невозможно. Поэтому была использована /1/ упрощенная модель циркуляции теплоносителя 2 контура с помощью естественной циркуляции внутри ПГ при кипении жидкости.

6. АККУМУЛЯТИВНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПГ

В главную систему уравнений необходимо ввести объем тепла, освобожденного или поглощенного металлическими частями конструкции ПГ. Изменение аккумулированного тепла во времени в уравнении /9/ может быть в общем виде сформулировано:

$$P_{ak}(\tau) = \frac{d}{d\tau} \left\{ \sum_{j=1}^k m_j \cdot c_j [T_j(\tau) - T_{mj}(\tau)] \right\} /14/$$

где $(m_j \cdot c_j)$ - водяное значение -той части
 $T_{mj}(\tau)$ - температура носителя, окружающего -тую часть
 $T_j(\tau)$ - средняя температура -той металлической части

С точки зрения коэффициента теплопередачи необходимо различать, идет ли речь об освобождении или аккумулировании тепла, а также омывается ли данная часть конструкции паром или пароводяной смесью. По этой причине были металлические вещества ПГ разделены на части над поверхностью омываемые паром, под поверхностью омываемые водой, коллекторы и внутрикорпусное устройство. Для определения тепла, освобожденного или поглощенного, использовалась простая модель нестационарной теплопроводности в стенке, описанная уравнением Фурье. С помощью ее решения можно получить выражение для аккумулированного тепла /1,3/ в зависимости от значений критерия Фурье-Биота.

7. СТАЦИОНАРНОЕ СОСТОЯНИЕ - ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Стационарный и динамический расчет непосредственно связаны между собой и поэтому необходимо, чтобы они исходили из идентичного физико-математического описания с опусканием временных зависимостей.

Итерационный расчет стационарного состояния запрограммирован и включен в состав общей программы как ее часть. Перед первым тактом расчета динамики проводится дополнительный расчет всех необходимых значений стационарного состояния при выборе различных исходных состояний ПГ. Результатом являются значения p_1 , \dot{m}_1 , T_1 , $T_{ст}$, T_2 , q_1 и q_2 на отдельных участках по длине трубки. Графическое изображение перечисленных характеристик для номинального начального состояния приведено на рис. 4.

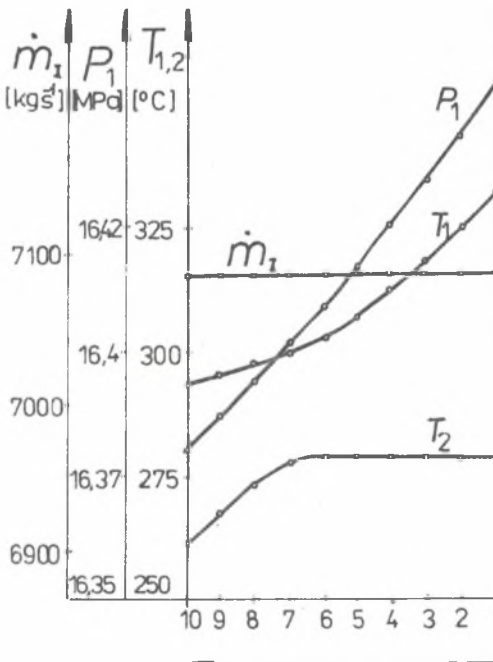


Рис. 4. Характеристика контрольных величин по длине трубки при стационарном состоянии

8. УСЛОВИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПГ

В расчетную программу были включены и отдельные условия регулирования, которые модифицируют граничные условия второго контура ПГ

- регулирование питания

Применяется трехимпульсное регулирование питания ПГ с аварийным дополнением воды при снижении уровня и с перекрытием клапана питания при повышении уровня с учетом функции сепараторов.

- предохранительные клапаны

Предполагалось использование предохранительной системы с 8 импульсными предохранительными клапанами, которые будут по 4 установлены на идентичные уровни давления по открытию и закрытию клапана.

- Перекрытие паровода

В программу включено перекрытие паровода от предохранителей при падении уровня, повышении давления в паровом коллекторе и при обратном течении пара.

9. ПРОГРАММА ВЫЧИСЛЕНИЙ

Комплексная математическая модель для решения динамики вертикального ПГ была разработана на языке ФОРТРАН и отлажена на ЭВМ IC L - 2960. В программе из считанных входных данных рассчитываются необходимые параметры и как первый шаг расчета проводится расчет стационарного состояния ПГ. После дорасчета начальных условий и контроля условия стабильности решение дифференциальных уравнений входит в фазу динамического расчета. Здесь в каждом такте на основе граничных условий рассчитываются значения параметров теплоносителя первого контура $p_1, \dot{m}_T, \dot{i}_1, T_{ст}, q_1$ и q_2 на отдельных участках, а на основе параметров на последнем участке и потери давления на выходе вычисляются параметры теплоносителя первого контура на выходе из ПГ. После расчета величины аккумулированного тепла и по прохождении подпрограммы, воспроизводящей условия регулирования, следует расчет второго контура ПГ с распечаткой результатов.

Расчет термодинамических и физических свойств воды и пара проводится в соответствии с процедурами, приведенными в /3/.

На рис. 5 изображены характеристики относительных параметров /приведенных к номинальному состоянию/ при переходе со статического на динамический расчет во времени $\tau = 0$ при

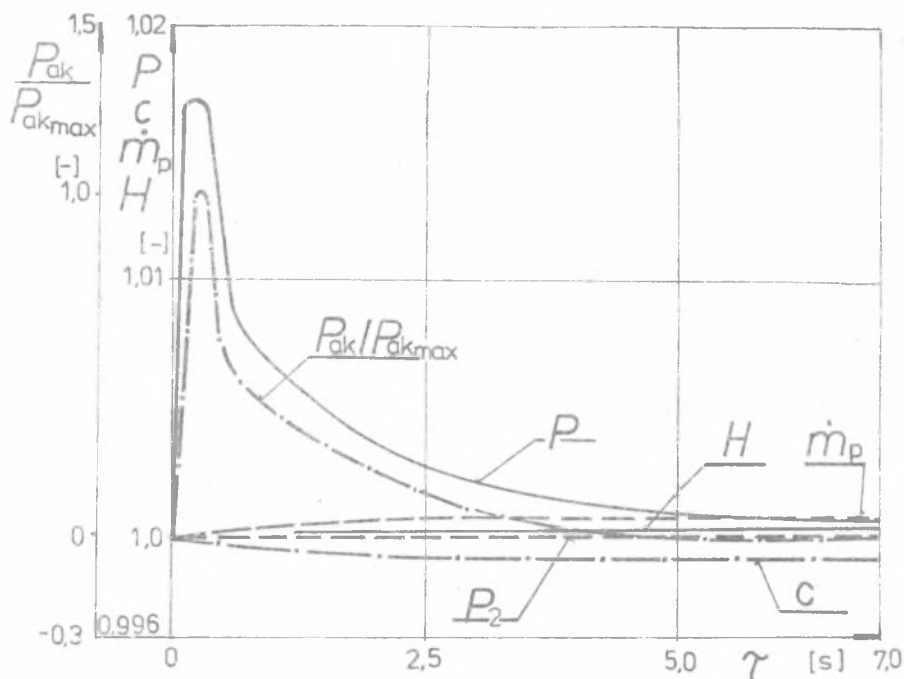


Рис. 5. Характеристики относительных параметров при переходе со статического на динамический расчет

константных граничных условиях. В характеристике теплопроизводительности наблюдается "удар", результатом которого является и пик у аккумулированного тепла. В программе вычислений с целью исключить воздействие подобных "ударов" проводится несколько вычислительных шагов с помощью динамической системы с шагом $\Delta \zeta = 0$, и только потом выбирается шаг $\Delta \zeta > 0$.

На рис. 6 изображены характеристики отдельных параметров ПГ при скачкообразном падении температуры теплоносителя 1 контура, входящего в ПГ, с 331°C до 320°C во времени $\zeta = 0$ /соответствует упрощенному случаю скачкообразного падения мощности реактора/

На рис. 7 зынесены характеристики одинаковых параметров про скачкообразном падении объема входящего теплоносителя первого контура на 50% во времени $\zeta = 0$ /соответствует упрощенной ситуации при выпадении

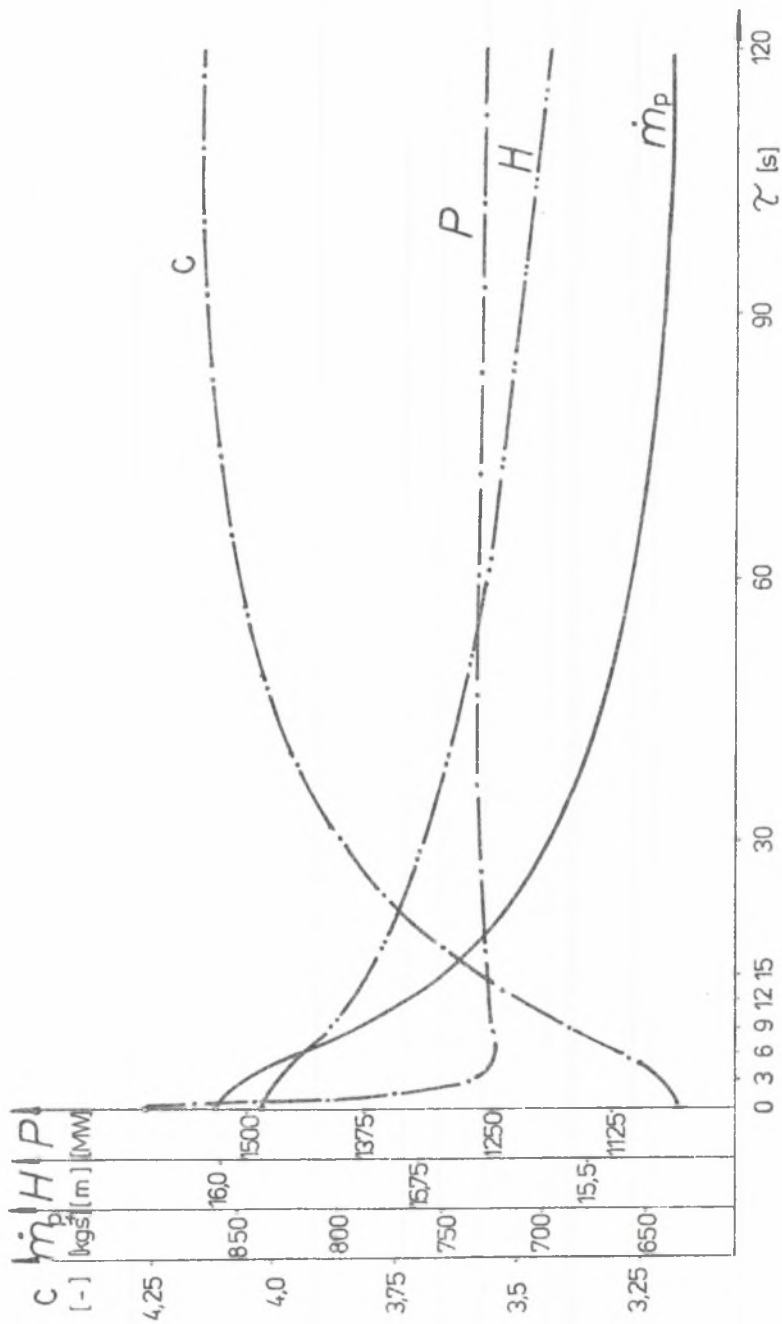


Рис. 6. Характеристики контрольных величин в ПГ при скачкообразном падении температуры теплоносителя 1 контура

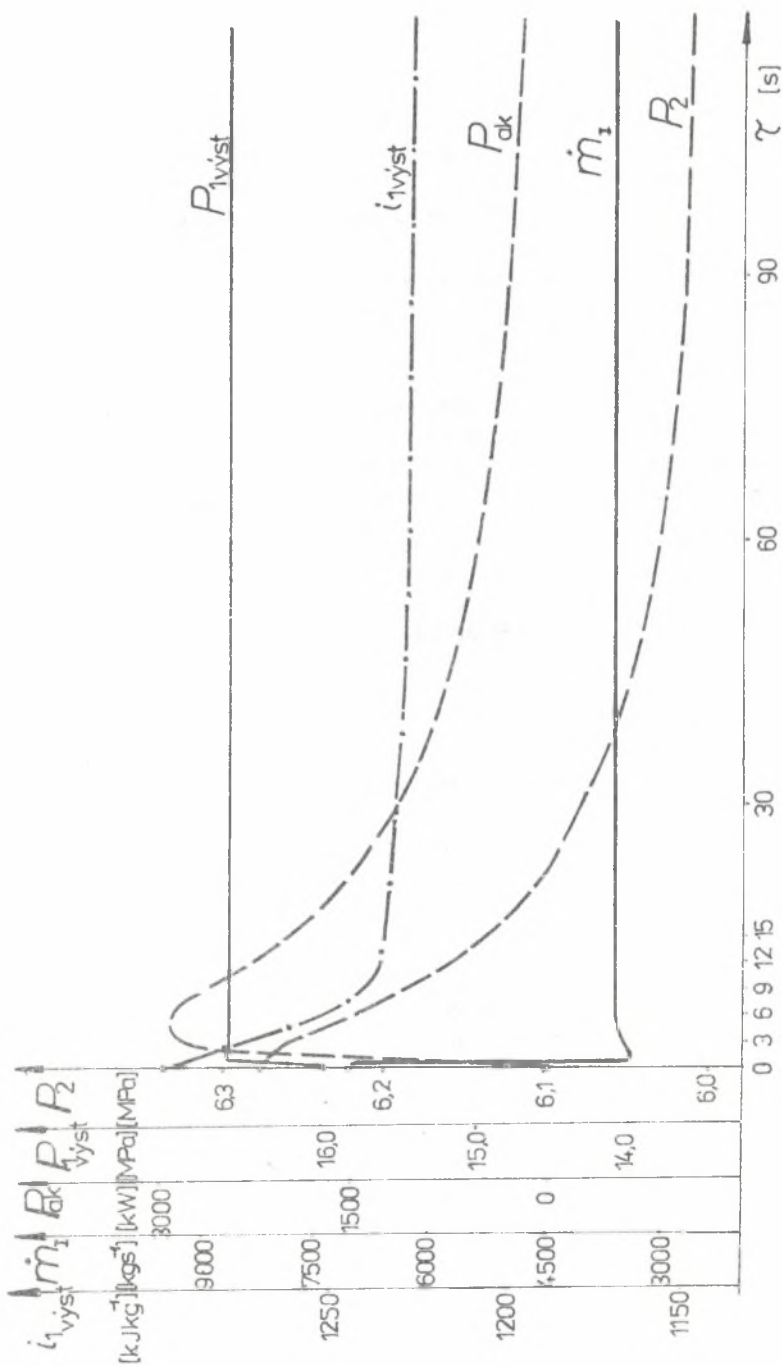


Рис. 7. Характеристики контрольных величин в ПГ при скачкообразном изменении наденни потока массы теплоносителя 1 кон- тура

10. ВЫВОДЫ

Вертикальный парогенератор представляет собой довольно сложный конструкционный элемент, от которого в значительной степени зависит надежность хода АЭС в целом. При решении вопросов безопасности эксплуатации ядерного реактора водо-водяного типа с вертикальными парогенераторами можно использовать описанную модель для решения аварийных и рабочих ситуаций. Основным источником неточностей является сложность геометрии, а тем самым и гидродинамических и термокинетических условий во втором контуре, что приводит к определенной степени неопределенности при определении теплопроводности. С помощью соответствующей корреляции для теплопроводности по теплообменным трубкам, полученной от замеров на измерительных стендах, можно добиться достаточно точных результатов при моделировании динамики ПГ в ненормальных и аварийных состояниях.

Модель можно использовать самостоятельно или как часть динамики 1 контура при подготовке документации по технике безопасности при производстве перспективных типов вертикальных парогенераторов для блоков ВВЭР 1000 на предприятии концерна ВИТКОВИЦЕ - ВЖСНГ.

Использованные символы и обозначения

H	/m/	высота уровня
L	/m/	длина среднего ряда труб
\dot{m}	/kg.s ⁻¹ /	поток массы
S	/m ² /	площадь
P	/kW/	теплопроизводительность
T	/°C/	температура
V	/m ³ /	объем
c	/kJ.kg ⁻¹ °C/	удельная теплоемкость
d _e	/m/	наружный диаметр трубки
d _i	/m/	внутренний диаметр трубки
d _s	/m/	средний диаметр трубки
g	/m.s ⁻² /	ускорении гравитации
i	/J.kg ⁻¹ /	энтальпия
h	/m/	длина участка
n	/-/	число теплообменных трубок
c	/-/	кратность циркуляции
o	/-/	относительный дренаж
p	/MPa/	давление

q	$/\text{кВт}\cdot\text{м}^{-1}/$	теплопроизводительность на 1 м длины
v	$/\text{м}^3\cdot\text{кг}^{-1}/$	удельный объем
u	$/\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}/$	удельная внутренняя энергия
z	$/\text{м}/$	координата длины
α	$/\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{°C}/$	коэффициент теплопроводности
ρ	$/\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}/$	удельная масса
τ	$/\text{с}/$	время
$\phi\cdot\lambda^*$	$/-'/$	коэффициент трения двухфазного носителя

Индексы и знаки

' - кипящая вода; " - насыщенный пар; 1 - над поверхностью;
 2 - под поверхностью; I - первый; II - второй; ак - аккумуляция;
 e - область экономайзера; b - водоподающий канал; h - уровень;
 p - паровой; pV - предохранительные клапаны; с - общий;
 x - паро-водяная смесь; W - питающая вода; V - область испарения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фукала Л.: Динамическая нелинейная модель вертикального парогенератора для АЭС ВВЭР 1000. Práce SVOČ, VŠB Ostrava, 1988.
- [2] Ганак Д.: Парогенераторы с принадлежностями для АЭС ВВЭР 1000. Výzkumná zpráva VZŠKG Ostrava, 1981.
- [3] Колат П.: Моделирование эксплуатационных и аварийных состояний в компенсаторе объема АЭС ВВЭР 1000 - Темелин. Výzkumná zpráva, VŠB Ostrava, 1986.
- [4] Убра О., Лидицки Б.: Парогенераторы ПТВ - 1000 М. Výzkumná zpráva, ČVUT Praha, 1981.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Gwynar

MODELOWANIE PROCESÓW PRZEJŚCIOWYCH W PIONOWYCH WYTWORNICACH PARY
ELEKTROWNI JĄDROWYCH Z REAKTORAMI WODNYMI CIŚNIENIOWYMI

S t r e s z c z e n i e

W artykule przedstawiono nieliniowy model matematyczny do obliczeń dynamiki pionowych wytwornic pary z dwoma centralnymi kolektorami pionowymi, usytuowanych jeden nad drugim, który był opracowany w Vitkowskim kombinacie metalurgicznym im. Klementa Gottwalda w Ostrawie. Celem modelu była ocena dynamiki pionowej wytwornicy pary z uwzględnieniem możliwości produkcji tych perspektywicznych typów wytwornic dla elektrowni jądrowych z reaktorami typu WWER 1000. W artykule opisano program obliczeń dla modelu statycznego i dynamicznego, pozwalający na obliczenia procesów przejściowych w stanach różnych od nominalnego i stanach awaryjnych elektrowni jądrowej, w czasie których zachodzą znaczne zmiany wielkości na wejściu i wyjściu. Wyniki modelowania można także wykorzystać przy opracowaniu dokumentacji dotyczącej analizy bezpieczeństwa.

MODELING OF TRANSIENT PROCESSES IN THE VERTICAL STEAM PRODUCERS
IN THE NUCLEAR POWER STATIONS WITH WATER PRESSURE REACTOR

S u m m a r y

Nonlinear mathematical model of the dynamics of vertical steam producers with two control vertical collectors situated one over the other is present. It has been obtained in the metalurgic concern in Ostrava. The objective of the model is to estimate a dynamics of the vertical steam producers taking into account possibility of production for the nuclear power station with reactors type WWER 1000. A program for static and dynamic calculation in the states different than the nominal one and disastrous states of nuclear power stations is described. Results of modeling could be used also to report the intrinsic safety analysis.