

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ СОПРЯЖЕННЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ КОНТУРАХ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

С.А. Замятин, А.Н. Семененко

Нижегородский государственный технический университет, г. Н. Новгород



В работе предлагается математическая модель, описывающая теплогидравлические процессы, происходящие в системе аварийного расхолаживания установок АСТ. Проведен временной анализ переходных режимов, связанных с вводом в действие системы аварийного расхолаживания при аварии с полным внешним обесточиванием станции при работе на номинальной мощности. Сделан вывод о работоспособности САРХ реакторной установки Горьковской АСТ.

Повышенные требования к безопасности установок с реактором АСТ-500 и отсутствие опыта эксплуатации придают большое значение теоретическому прогнозированию характера протекания теплогидравлических переходных процессов, возникающих в контурах атомной станции теплоснабжения (АСТ) в аварийных режимах работы, а также функциональных возможностей той или иной системы безопасности по ликвидации последствий аварии.

В данной работе приводится математическая модель переходных режимов, связанных с вводом в действие системы аварийного расхолаживания (САРХ) Горьковской АСТ (ГАСА) при аварии с полным внешним обесточиванием станции при работе на номинальной мощности.

Принципиальная схема САРХ ГАСА приведена на рис. 1.

В рассматриваемой аварийной ситуации при внезапном пропадании принудительной циркуляции теплоносителя по промежуточному и сетевому контурам при помощи быстродействующих задвижек 3 производится отсечение контура теплопотребителя от сетевых теплообменников (СТО) и с открытием арматуры 5 организуется естественная циркуляция аварийного запаса воды из бака 2 через СТО 1, который в данном случае играет роль теплообменника расхолаживания. Отвод тепла в СТО 1 осуществляется за счет выпаривания охлаждающей среды в атмосферу. При этом проектом ГАСА обеспечивается возможность перехода промежуточного контура на режим естественной циркуляции среды по прежнему тракту. Оборудование САРХ имеет каждая из трех петель нормального теплоотвода ГАСА. Отсечные задвижки сети и арматура САРХ запитаны от источников надежного энергоснабжения.

© С.А. Замятин, А.Н. Семененко, 2004

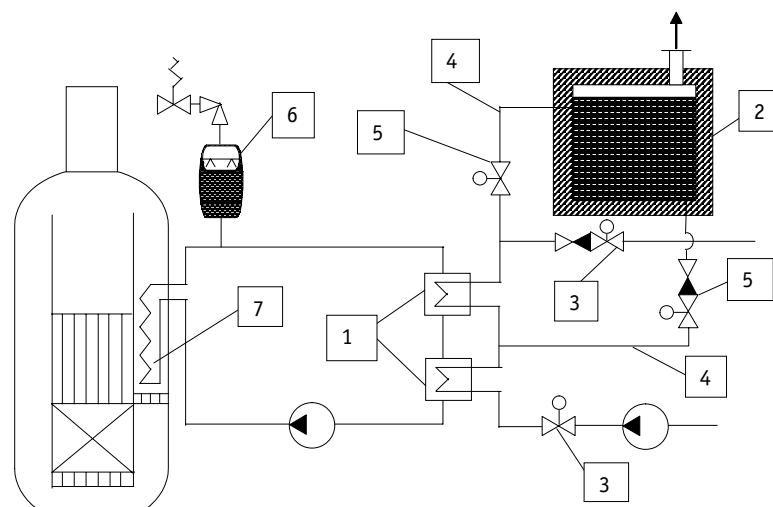


Рис. 1. Принципиальная схема САРХ Горьковской АСТ: 1 – сетевой теплообменник; 2 – бак аварийного запаса воды; 3 – быстродействующая задвижка сетевого контура; 4 – трубопроводы САРХ; 5 – арматура САРХ; 6 – паровой компенсатор давления промконтура; 7 – встроенный теплообменник I-II контуров

Наличие естественной циркуляции (ЕЦ) по всем контурам ГАСТ в процессе расхолаживания реакторной установки (РУ) обуславливает тепловую связь между ними и взаимозависимость всех основных теплогидравлических параметров. Это обстоятельство определяет комплексный подход к решению поставленной задачи математического моделирования переходных процессов теплогидродинамики не в одном, отдельно взятом контуре, а в объединенной системе сложных сопряженных теплопередающих контуров.

В основу математической модели (ММ) теплогидродинамики ввода в действие и функционирования САРХ ГАСТ положены следующие условия:

- уравнение гидродинамики (нестационарное уравнение движения);
- уравнение нестационарной передачи в активной зоне и теплообменниках;
- уравнение материального баланса;
- уравнение транспортного запаздывания для описания тепловой динамики в трубопроводах и на участках, где отсутствует теплопередача.

Объект исследования рассматривается в одномерном приближении. Контур разбивался на расчетные участки, на каждом из которых все теплофизические параметры теплоносителя в данный момент времени процесса расхолаживания считаются либо постоянными (участки без теплообмена с сопряженными контурами), либо изменяющимися по линейному закону (участки активной зоны и теплообменников). По проведенным предварительным оценкам потери тепла в окружающую среду и тепловая мощность, передаваемая вдоль контуров посредством теплопроводности, составят соответственно не более 0,1% и 0,0001% от переносимой контурами мощности. Поэтому влиянием этих двух факторов на теплогидродинамику системы при реализации ММ пренебрегалось. Выбор количества участков разбиения расчетной схемы того или иного контура проводился, исходя из следующих принципов:

- наличие на участке источника тепла или тепловой связи с сопряженным участком;
- отличие в геометрических или иных конструктивных характеристиках от предыдущего участка контура;

- пространственное расположение участка;
- наличие арматуры или другого оборудования, имеющего значительное гидравлическое сопротивление.

За положительное направление расхода теплоносителя по контуру принималось направление, соответствующее штатному режиму работы каждого из сопряженных контуров.

В общем виде система уравнений, описывающих теплогидродинамику j -го контура, состоящего из k участков, имеет следующий вид.

Уравнение гидродинамики

$$\Delta P_{HH,j} = H_{дв,j} - \Delta P_{pr,j} + P_{H,j}, \quad (I)$$

где $\Delta P_{HH,j} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{L_i}{S_i} \right) \frac{dG_j}{d\tau}$ – инерционный напор по j -му контуру; dG_j – приращение расхода по j -му контуру за время $d\tau$; L_i и S_i – соответственно длина и площадь проходного сечения i -го участка j -го контура; $H_{дв,j} = g \sum_{i=1}^k \left\{ \bar{\rho}_i L_i \text{sign} \left[\cos(\vec{g}\vec{U}) \right] \right\}_j$ – движущий напор ЕЦ по j -му контуру; g – ускорение силы тяжести; $\bar{\rho}_i$ – плотность теплоносителя на i -м участке, определяемая по средней температуре рабочей среды в нем; $\text{sign} \left[\cos(\vec{g}\vec{U}) \right]_i$ – параметр, определяющий знак проекции вектора скорости теплоносителя на направление действия силы тяжести \vec{g} на i -м участке j -го контура; $\Delta P_{pr,j}$ – суммарные гидравлические потери напора; $\Delta P_{H,j}$ – остаточный напор насоса j -го контура, создаваемый при его выбеге до полного останова.

Было принято, что спад напора насоса при выбеге описывается экспоненциальным законом с фиксированной постоянной времени, определяемой динамическими характеристиками насоса. При отсутствии в контуре средства принудительной циркуляции величина $\Delta P_{H,j}$ в уравнении (I) принимается равной нулю.

При составлении ММ гидродинамики подключения и функционирования собственно контура САРХ ввиду сложности происходящих переходных процессов рассматривались 4 последовательные этапа его ввода в действие (см. рис. 1).

1 этап. Происходит постепенное падение давления в сетевом контуре за счет останова насоса; закрываются быстродействующие задвижки (БДЗ) сети, затем открывается арматура САРХ. Падение давления после каскада СТО за счет открытия арматуры САРХ на подъемной ветке контура незначительно; срабатывания обратного канала на «горячей» ветке сетевого контура не происходит.

2 этап. Арматура контура САРХ на его подъемной части открылась настолько, что расход по ней теплоносителя стал значительным (близким по величине к общему расходу через СТО). Происходит срабатывание обратного клапана на «горячей» ветке сети. Начинается расширение теплоносителя сетевого контура за счет разности давлений в контуре и баке САРХ (атмосфера).

3 этап. Закрыты БЗД сетевого контура. Происходит расширение теплоносителя в неотсекаемых от САРХ участках сети.

4 этап. Давление перед вторым по ходу теплоносителя сетевого контура СТО падает настолько, что сравнивается давлением, обусловленным весом столба воды в опускном участке контура САРХ. Открывается обратный клапан на опускном участке САРХ. Дальнейший отвод тепла происходит за счет нормального функционирования САРХ согласно проекту ГАСТ.

Для каждого из этих этапов составлялась своя ММ гидродинамики на базе уравнения (I) путем его незначительной модификации. Так, например, остаточный

напор насоса учитывался только на первых двух этапах ввода в действие САРХ, а для 2-го и 3-го этапов в качестве движущего напора циркуляции $H_{\text{ДВ}j}$ бралась разность давлений в сетевом контуре и баке САРХ.

Уравнение нестационарной теплопередачи в теплообменниках

$$V_k \bar{\rho}_k \frac{di_{\text{ВЫХ},k}}{d\tau} = G_j (i_{\text{ВХ},k} - i_{\text{ВЫХ},k}) \pm W_{j,M}, \quad (2)$$

где $V_k = L_k S_k$ – объем k -го участка j -го контура, на котором имеет место тепловая связь j -го контура с сопряженным m -м контуром; $\bar{\rho}_k$ – средняя плотность теплоносителя j -го контура на этом участке; $di_{\text{ВЫХ},k}$ – приращение энтальпии теплоносителя j -го контура на выходе k -го участка за промежуток времени $d\tau$; $i_{\text{ВХ},k}$, $i_{\text{ВЫХ},k}$ – соответственно энтальпия теплоносителя j -го контура на входе и выходе на k -го участка в предыдущий момент времени ($\tau - d\tau$); $W_{j,M}$ – мощность, передаваемая в теплообменнике от j -го контура к m -му или наоборот, рассчитываемая по методике [1].

Уравнение нестационарной теплопередачи в активной зоне [2]:

$$\frac{(M_r \bar{C}_r + M_T \bar{C}_T + M_c \bar{C}_c) di_{\text{ВЫХ},\text{аз}}}{\bar{C}_T d\tau} = W(\tau) - G_1 (i_{\text{ВЫХ}} - i_{\text{ВХ}})_{\text{аз}}, \quad (3)$$

где $W(\tau)$ – мощность остаточных тепловыделений в активной зоне реактора, рассчитываемая по формуле, рекомендованной в [3]; M_r , M_T , M_c – соответственно массы топлива, теплоносителя и конструкционных материалов внутри реактора; \bar{C}_r , \bar{C}_T , \bar{C}_c – средние удельные теплоемкости горючего, теплоносителя и стали; G_1 – расход теплоносителя основного контура через активную зону; $di_{\text{ВЫХ},\text{аз}}$ – приращение энтальпии теплоносителя на выходе из активной зоны за бесконечно малый промежуток времени $d\tau$; $i_{\text{ВХ}}$, $i_{\text{ВЫХ}}$ – соответственно энтальпия теплоносителя основного контура на входе и выходе из активной зоны в предыдущий момент времени ($\tau - d\tau$).

Уравнение транспортного запаздывания на k -м участке j -го контура использовалось в виде:

$$\frac{dT_{\text{ВЫХ},k}}{d\tau} = \frac{G_j}{\rho_k V_k} (i_{\text{ВХ},k} - i_{\text{ВЫХ},k}), \quad (4)$$

обозначения аналогичны уравнению (2).

В контурах, имеющих разветвления на несколько параллельно включенных петель или участков, использовалось *уравнение материального баланса:*

$$G_{\Sigma} = \sum_i G_i, \quad (5)$$

где G_{Σ} – суммарный расход теплоносителя по общему для параллельных петель участку контура; G_i – расход по i -й петле.

На основе приведенной системы дифференциальных уравнений были реализованы ММ каждого из сопряженных контуров, которые впоследствии были объединены в одном алгоритме расчета теплогидродинамики САРХ ГАСТ. Рассмотренная задача решалась на ПЭВМ Pentium IV методом конечных разностей при помощи пакета MathCad. Исходная информация для расчетного исследования (геометрические размеры, основные теплофизические параметры контуров при работе ГАСТ в стационарном режиме на номинальной мощности и другие) взяты из технического проекта ГАСТ.

В работе исследовалась теплогидродинамика переходных процессов при расхолаживании РУ одним и тремя каналами САРХ. При этом предполагалось, что канал САРХ отводит треть от располагаемой тепловой мощности основного контура

$Q_{\text{расп}}$ на момент аварии при расхолаживании тремя каналами и всю $Q_{\text{расп}}$ при работе одного канала САРХ. В зависимости от исследуемого режима, основной контур представлялся эквивалентным контуром естественной циркуляции теплоносителя, в котором начальный уровень мощности активной зоны РУ, расход среды G_1 и площади проходного сечения расчетных участков определялись по следующим условиям на начальный момент времени процесса расхолаживания $\tau = 0$:

$$\frac{Q_{\text{расп}}}{n} = G_1 (i_{\text{вых}} - i_{\text{вх}})_{\text{аз}}, \quad (6)$$

$$H_{\text{ДВ},1} = \sum_i (\Delta P_{r,i})_1, \quad (7)$$

где n – количество каналов САРХ, участвующих в расхолаживании РУ; $H_{\text{ДВ},1}$ и $\sum (\Delta P_{r,i})_1$ – соответственно движущий напор ЕЦ и суммарно гидравлическое сопротивление I контура при расходе среды G_1 , определяемом из уравнения (6).

Результаты исследования приведены в виде графиков на рис. 2, 3.

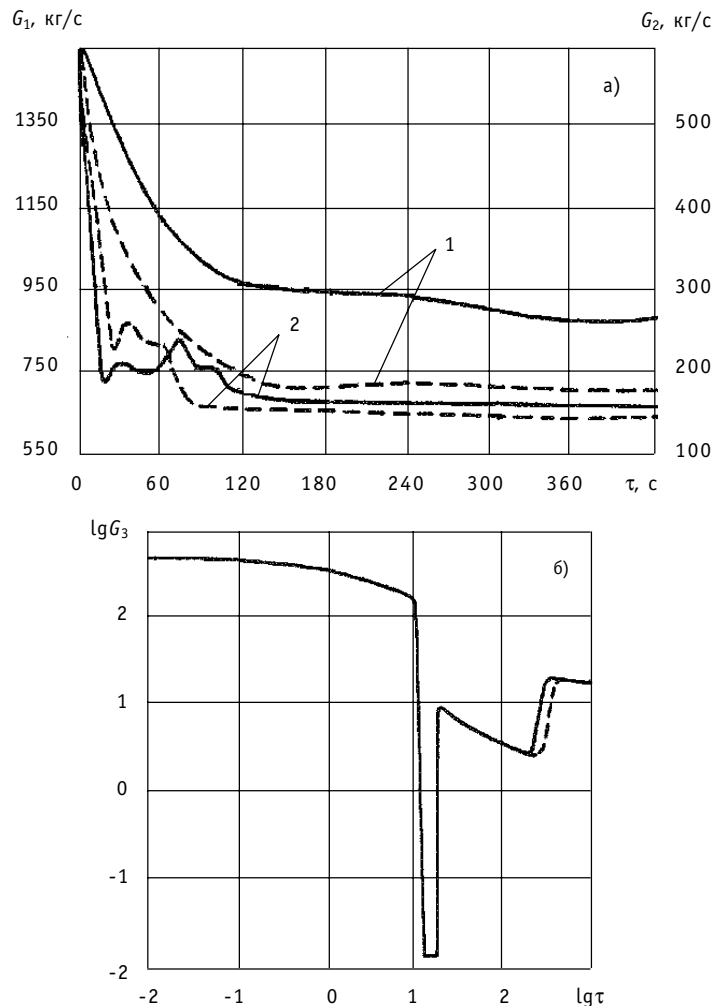


Рис.2 Изменение расходов по основному G_1 , промежуточному G_2 (а) и сетевому G_3 (б) контурам ГАСТ при расхолаживании одним (сплошная линия) и тремя (пунктирная линия) каналами САРХ: 1 - изменение G_1 , 2 - изменение G_2

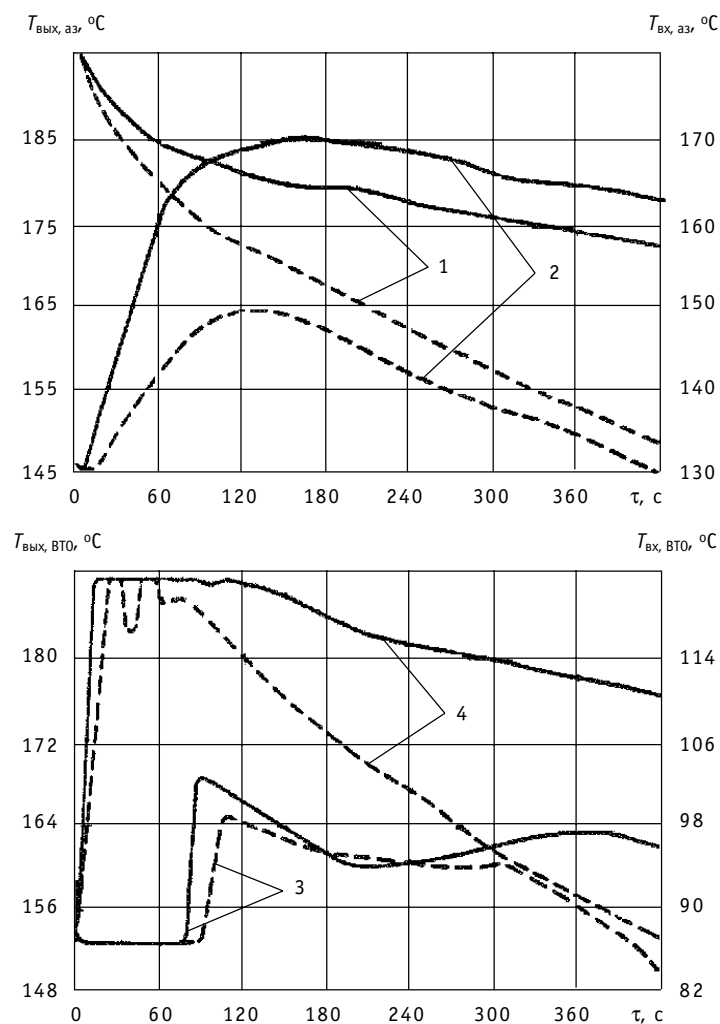


Рис. 3. Изменение температуры теплоносителя I контура на выходе из активной зоны (а) и температуры теплоносителя промконтура на входе и выходе из ВТО (б) при расхолаживании одним (сплошная линия) и тремя (пунктирная линия) каналами САРХ: 1 - измерение $T_{\text{вых, аз}}$, 2 - $T_{\text{вх, аз}}$, 3 - $T_{\text{вых, ВТО}}$, 4 - $T_{\text{вх, ВТО}}$

Рассматривая динамику основных параметров контуров, можно отметить следующее.

- После сброса аварийной защиты уменьшается расход теплоносителя по основному контуру установки, растет температура среды на входе в активную зону. Температура же теплоносителя на выходе из активной зоны устойчиво падает вследствие резкого сброса тепловой мощности реактора. По истечении (120–240) с от начала процесса в зависимости от числа работающих каналов САРХ теплогидродинамика основного контура ГАСТ стабилизируется, температура на входе в активную зону начинает понижаться, что свидетельствует о нормализации теплоотвода через теплообменники I-II контуров (ВТО) и установлении устойчивого расхолаживания РУ. Во всех исследованных режимах САРХ ГАСТ вскипание теплоносителя основного контура не наблюдалось.

- В промежуточном (втором) контуре ГАСТ в начальный период расхолаживания из-за резкого падения расхода теплоносителя в связи с остановом циркуляционного насоса наблюдается незначительное вскипание среды на выходе из ВТО.

Длительность процесса кипения зависит от числа работающих каналов САРХ и колеблется от 50 с (3 канала) до 110 с (1 канал). Величина массового расходного паросодержания при этом во всех исследованных режимах не превышала (0,3–0,4)%. При появлении паровой фазы на выходе из ВТО в процессе расхолаживания гидродинамическая характеристика контура существенно изменяется и может стать неустойчивой, что приведет к появлению пульсаций расхода. По прошествии ~100 с с начала расхолаживания все основные параметры промежуточного контура стабилизируются, теплоотвод через СТО нормализуется, температуры на входе и выходе из ВТО начинают устойчиво падать. Следует отметить, что длительность переходного процесса в промежуточном контуре меньше, чем в основном, ввиду меньшей инерционности системы.

- В сетевом контуре ГАСТ в первые секунды после начала расхолаживания расход теплоносителя через СТО создается за счет выбега насоса. Далее происходит резкий спад G_3 вследствие срабатывания быстродействующей отсечной арматуры сетевого контура. Задвижки САРХ еще не успевают открыться настолько, чтобы имела место циркуляция. В течение 3 с расход охлаждающей среды через СТО отсутствует. К 10-й с процесса происходит ввод в действие САРХ и устанавливается расход аварийного запаса воды через СТО порядка 6 кг/с. К 240-й с процесса расхолаживания в подъемном участке САРХ вследствие его прогрева появляется перегретый пар, генерируемый в СТО, резко растет напор ЕЦ и расход по контуру до 21 кг/с. Далее САРХ функционирует согласно проекту: циркуляция спадает очень медленно за счет уменьшения уровня воды в баке аварийного запаса. Количество работающих каналов существенного влияния на теплогидродинамику отдельного канала САРХ не оказывает.

Литература

1. Митенков Ф.М. Моторов Б.И. Нестационарные режимы судовых ядерных паропроизводящих установок. – Л.: Судостроение, 1970.
2. Замятин С.А. Анализ эффективности работы системы аварийного расхолаживания АСТ//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1991. – № 4-5. – С.100-106.

Поступила в редакцию 29.12.2003

Probes carried out over the range figures $Pe = 260 - 1000$, $Re = 10000 - 42000$, over the range a specific heat flow of $\sim 25-40 \text{ kW/m}^2$, the contents thermodynamical active oxygen in lead was bolstered over the range $10^{-7} - 10^0$.

УДК 621.039.534: 519.7

Mathematical Modulation of Transmitting Processes in Complex Associated Heat Transfer Systems at Natural Circulation of Heat Carrier \ S.A. Samiatin, A.N. Semenenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 3 illustrations. – References, 2 titles.

The mathematical model describing thermohydraulic processes taking place in the system of emergency getting cooled of NTS is given here. The temporary analysis of transfer states connected with putting into operating of the cooling emergency system was carried out using total external cutting electricity off the station while working at the nominal rate. Here is the conclusion about the workability of the emergency cooling system in the reactor unit at the Gorky Atomic Thermal Station.