УДК 621.039.5

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РУ КЛТ-40С С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА SERPENT

П.Е. Каплар, И.С. Лисицын, П.В. Марков, Н.А. Марчихина Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва



Разработана расчетная модель реакторной установки применительно к расчету стационарных и переходных режимов работы РУ КЛТ-40С с использованием теплогидравлического кода SERPENT. Проведена валидация расчетной модели путем сравнения результатов расчета стационарного режима работы на номинальной мощности по коду SERPENT с данными разработчика РУ КЛТ-40С. Выполнен расчетный анализ переходных режимов при отключении двух из четырех секций парогенератора и двух из четырех циркуляционных насосов первого контура в условиях неизменного положения органов регулирования. Определены изменения мощности, температур теплоносителя, оболочек топлива и дисперсионной топливной композиции.

Ключевые слова: код теплогидравлический SERPENT, установка реакторная КЛТ-40С, модель расчетная, блок парогенерирующий, ситуация аварийная, саморегулирование, самозащищенность, процесс переходной.

Key words: heat-hydraulic code SERPENT, reactor KLT-40S, calculation model, steam generating block, emergency, self-regulation, self-security, transitive process.

При проектировании ядерных энергетических установок и для анализа динамических процессов, а также обоснования безопасности широко используются теплогидравлические коды. При проведении расчетов с использованием современных теплогидравлических кодов подготовка исходных данных и создание расчетной схемы являются трудоемкой задачей, занимающей значительно большее время, чем собственно сами расчеты. Одним из путей решения этой задачи является использование информационных технологий, позволяющих автоматизировать и ускорить процесс создания расчетной модели.

При задании исходных данных был использован пакет программ визуализации теплогидравлических расчетных моделей для кода SERPENT. Пакет предоставляет пользователю трехмерное изображение расчетной схемы исследуемого объекта как при задании данных, так и в процессе счета задачи. При использовании разработанного пакета пользователь может оперативно находить ошибки в исходных данных, которые для кода SERPENT, как и для многих теплогидравлических кодов, таких как RELAP, ATHLET, KOPCAP и др., задаются в виде текстовых файлов определенного формата. Поиск ошибок вручную в таких файлах затруднен из-за большого количества информации.

В пакете визуализации используется OpenGL — стандартная графическая библиотека для 32- и 64-разрядных операционных систем, в том числе и для операционной системы Windows. В рамках данной работы проводилось также тестирование пакета визуализации и его связки с кодом SERPENT. В работе приведены графические материалы, полученные с использованием пакета.

Работа посвящена созданию расчетной модели в теплогидравлическом коде SERPENT и проведению расчетов некоторых переходных процессов в РУ КЛТ-40С плавучей теплоэлектростанции (ПАТЭС), создающейся в г. Северодвинск.

Моделирование проводилось с целью исследования поведения реакторной установки в режиме саморегулирования (без вмешательства органов компенсации реактивности) при следующих исходных событиях:

- отключение подачи питательной воды в два из четырех парогенераторов;
- отключение двух циркуляционных насосов первого контура.

Двухскоростной трехфазный теплогидравлический код SERPENT [1] является универсальным инструментом для моделирования теплогидравлических процессов в сложных разветвленных теплогидравлических сетях, где в качестве теплоносителя используется вода, пар и газ. Код применяется для расчетного исследования динамических и аварийных режимов работы реакторных установок.

Код SERPENT позволяет моделировать произвольные теплогидравлические сети и не имеет ограничений по числу моделируемых объектов. В процессе расчетов решается система уравнений сохранения массы, количества движения и энергии для каждой из сред.

Закон сохранения массы для i-ой фазы

$$\frac{\partial \left(\rho_{i} \cdot \varphi_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho_{i} \cdot \varphi_{i} \cdot \upsilon_{i}\right)}{\partial x} = \frac{G_{i}^{enter}}{S} + \frac{G_{i}^{w \to s}}{S}, \tag{1}$$

где ρ_i – плотность, ϕ_i – объемная доля, υ_i – скорость, G_i^{enter} – расход внешних источников на единицу длины канала, $G_i^{w \to s}$ – расход за счет генерации-конденсации пара на единицу длины канала, S – площадь сечения расчетной ячейки.

Закон сохранения количества движения для і-ой фазы

$$\rho_{i} \cdot \varphi_{i} \cdot \frac{\partial v_{i}}{\partial t} + \rho_{i} \cdot \varphi_{i} \cdot v_{i} \cdot \frac{\partial v_{i}}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} \cdot \varphi_{i} - F_{i}^{tr} + F_{i}^{w \to s} + \rho_{i} \cdot \varphi_{i} \cdot g \cdot \alpha, \tag{2}$$

где F_i^{tr} – сила трения о стенку, $F_i^{w o s}$ – сила межфазного трения.

Закон сохранения энергии для і-ой фазы

$$\frac{\partial \left(\rho_{i} \cdot \varphi_{i} \cdot I_{i}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho_{i} \cdot \varphi_{i} \cdot \upsilon_{i} \cdot I_{i}\right)}{\partial x} = Q_{i}^{sour} + Q_{i}^{w \to s} + \varphi_{i} \cdot \frac{\partial P}{\partial t}, \tag{3}$$

где Q_i^{sour} — мощность внешних источников, $Q_i^{w o s}$ — мощность межфазного обмена теплом.

Температурные поля в твердых многослойных телах описываются одномерным уравнением теплопроводности в цилиндрической геометрии с коэффициентом теплопроводности, зависящим от температуры.

$$C \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q, \tag{4}$$

где T — температура, C = C(T) — теплоемкость материала, $\rho = \rho(T)$ — плотность материала, $\lambda = \lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности, Q — мощность источника. На поверхности задаются граничные условия третьего рода.

Код имеет блок точечной нейтронной кинетики, позволяющий учитывать обратные связи: плотностной эффект теплоносителя и температурный эффект топ-

лива. Математическая модель данного блока получена на основании известных уравнений кинетики «точечного» ядерного реактора:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} \cdot n + \sum_{i} \lambda_{i} \cdot c_{i} + q,$$

$$\frac{dc_{i}}{dt} = \frac{\beta_{i}}{\ell} \cdot n - \lambda_{i} \cdot c_{i}, \quad i = 1...6,$$
(5)

где n – плотность нейтронов, ρ – реактивность, β – эффективная доля запаздывающих нейтронов, с; - концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов i-ой группы, λ_i – постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов i-ой группы, β_i – доля запаздывающих нейтронов i-ой группы, q – интенсивность источника нейтронов. Реактивность складывается из трех составляющих: плотностного, температурного эффектов и реактивности, вносимой органами управления. В коде SERPENT в виде уравнений реализованы зависимости реактивности от изменения средней плотности теплоносителя в активной зоне $\rho = f(\gamma)$, средней температуры топлива $\rho = f(T)$, а также зависимость реактивности, вносимой при изменении положения органов регулирования $\rho = f(H,B)$, где H — положение каждого из регулирующих органов в активной зоне, а B — глубина выгорания топлива. Все три зависимости получены экспериментально. На каждом расчетном шаге контролируется изменение средней температуры топлива в активной зоне, средней плотности теплоносителя и положения органов регулирования. На основании полученных отличий этих параметров от аналогичных на предыдущем шаге рассчитывается внесенная реактивность и пересчитывается мощность в активной зоне.

Исходные данные принимались в соответствии с [2].

Парогенерирующий блок РУ КЛТ-40С (рис.1) предназначен для выработки перегретого пара требуемых параметров за счет преобразования ядерной энергии в тепловую и состоит из реактора, соединенного короткими силовыми патрубками с четырьмя парогенераторами и четырьмя гидрокамерами, с установленными в них четырьмя электронасосами.

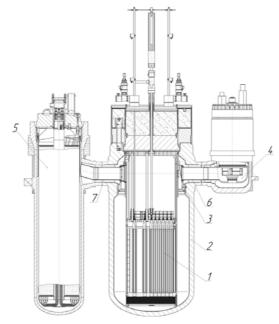


Рис.1. Парогенерирующий блок РУ КЛТ-40С

От электронасоса 4 по четырем внутренним соединительным патрубкам 6 теплоноситель первого контура поступает в реактор, где нагревается в активной зоне 1, снимая тепло с твэлов. Из реактора по четырем внутренним соединительным патрубкам 7 теплоноситель поступает в четыре парогенератора 5, там он охлаждается, передавая тепло рабочему телу.

Из каждого парогенератора по кольцевому каналу между внутренним и наружным патрубками охлажденный теплоноситель первого контура поступает в одну из четырех камер кольцевой полости, образованной конусной обечайкой 3 и корпусом реактора 2. Каждая камера отделена друг от друга вертикальными разделительными перегородками и является всасывающей полостью соответствующего электронасоса.

Далее теплоноситель по четырем кольцевым каналам соединительных патруб-ков направляется в электронасос.

Задание данных проводилось с использованием блока визуализации, создающего трехмерное изображение «собираемой конструкции», что позволяет отслеживать возможные нестыковки и ошибки. Изображение трехмерной модели реакторной установки приведено на рис. 2.

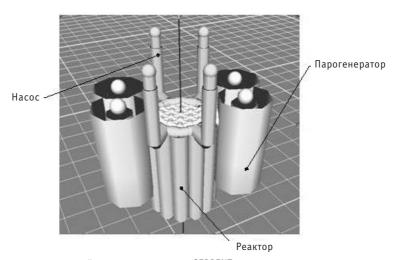


Рис. 2. Расчетная схема реакторной установки для кода SERPENT

После завершения набора расчетной схемы ее характеристики автоматически передаются в соответствующие подпрограммы кода.

Активная зона, состоящая из 121 ТВС, моделировалась 19 эквивалентными каналами (по 6 или 7 ТВС в каждом канале), которые разбивались по высоте на 20 участков. Каждый канал имел ту же мощность, проходное сечение и гидравлический диаметр, что и группа соответствующих ТВС. Такое разбиение позволяет учитывать пространственное распределение энерговыделения по высоте и объему активной зоны.

При расчете теплообмена в твэле и от твэла к теплоносителю учитываются топливо, оболочка и оксидная пленка.

При расчете принимались следующие параметры:

- тепловая мощность реактора150 МВт;
- параметры первого контура
 - температура теплоносителя на входе 279°C;
 - температура теплоносителя на выходе 316°C;
 - давление 12.7 Мпа;

- параметры второго контура
 - температура питательной воды 170°С;
 - температура перегретого пара 290-310°C;
 - давление пара 3.53 МПа.

После создания расчетной модели был проведен расчет стационарного режима установки. Результаты расчета показали, что в этом режиме все основные параметры установки с приемлемой точностью совпадают с данными проектанта. Наряду с традиционным выводом в виде файлов и графиков результаты расчетов отражаются и в блоке визуализации (рис. 3).

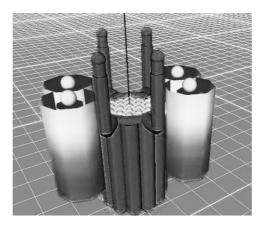


Рис. 3. Распределение температурных полей в стационарном режиме при тепловой мощности парогенерирующего блока 150 МВт: белый цвет — температуры выхода из активной зоны (316°С); темносерый цвет — температура выхода из парогенераторов (279°С)

Режим отключения двух парогенераторов. При расчете данного режима моделировалось закрытие клапанов отбора пара и подачи питательной воды. Отключение парогенераторов происходит на 1400 секунде расчета, положение компенсирующих групп остается неизменным, и переходный процесс обусловливается только саморегулированием установки.

Далее показаны графики переходного процесса.

Как видно из рис. 4, переходный процесс проходит примерно за 200 секунд и заканчивается переходом мощности на уровень ~50 % от номинальной, при этом мощность меняется следующим образом.



Рис. 4. График изменения мощности: 1 — мощность, выделяемая в активной зоне; 2 — мощность, снимаемая в парогенераторах

- В начальный момент переходного процесса из-за отключения парогенераторов и уменьшения теплосъема объем теплоносителя первого контура увеличивается и вытесняется в компенсатор объема. Это вызывает увеличение давления и, следовательно, увеличение плотности теплоносителя, что, в свою очередь, вносит в активную зону (средняя температура которой еще не увеличилась за счет транспортного запаздывания) небольшую положительную реактивность и соответственно приводит к небольшому увеличению мощности, что можно наблюдать на рис. 4.
- Начиная с 1420 с «горячая» вода поступает в активную зону, температуры топлива и теплоносителя увеличиваются, и мощность, выделяемая в активной зоне, падает за счет обратных температурных связей по реактивности.
- На завершающем этапе переходного процесса средняя температура теплоносителя первого контура уменьшается за счет теплоотвода в двух работающих парогенераторах, что вносит положительную реактивность и приводит к выравниванию выделяемой и отводимой мощностей. График изменения температуры первого контура приведен на рис. 5.

На рис. 6 показаны температурные поля, полученные с помощью модуля визуализации после окончания переходного процесса.

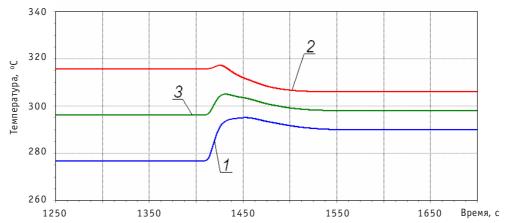


Рис. 5. Температуры теплоносителя первого контура: 1 — температура на входе в а.з.; 2 — температура на выходе из а.з.; 3 — средняя температура

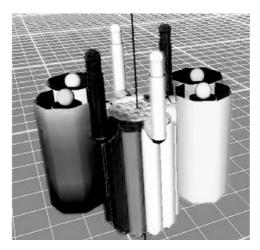


Рис. 6. Распределение температурных полей после переходного процесса — отключения двух из четырех парогенераторов. Цветовое обозначение температур аналогично приведенному на рис. 3

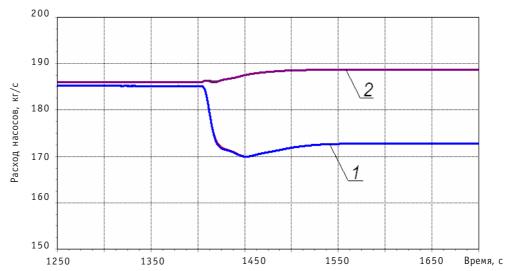


Рис. 7. График изменения расходов через насосы: 1 — насосы, смежные с отключенными парогенераторами; 2 — насосы, смежные с работающими парогенераторами

Температуры теплоносителя в двух насосах, смежных с отключенными парогенераторами, выше, чем в двух других. Это приводит к разности между массовыми расходами через насосы, что видно из графиков изменения расходов через насосы, показанных на рис. 7.

Поведение максимальных температур (как топлива, так и оболочки) во время переходного процесса повторяет характер изменения мощности активной зоны. При этом пиковые увеличения температур не превышают нескольких градусов, что подтверждает высокий уровень саморегулирования установки.

Режим отключения двух циркуляционных насосов первого контура. При расчете данного режима отключение насосов происходит на 1400 секунде расчета, а положение компенсирующих групп так же, как и в предыдущем примере остается неизменным, что обеспечивает прохождение переходного процесса только за счет свойств саморегулирования реакторной установки.

Далее показаны графики переходного процесса.

Мощность реактора, при отключении двух насосов, примерно за 50-70 секунд упала на уровень 80% от номинала.

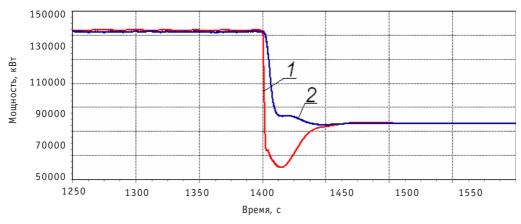


Рис. 8. График изменения мощности: 1 — мощность, выделяемая в активной зоне; 2 — мощность, снимаемая в парогенераторах

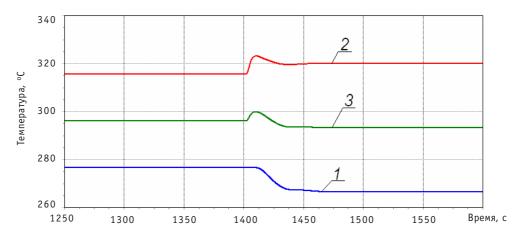


Рис. 9. Температуры теплоносителя первого контура: 1 — температура на входе в активную зону; 2 — средняя температура; 3 — температура на выходе из активной зоны

В момент отключения насосов происходит небольшой отрицательный скачок реактивности, обусловленный изменением температуры и плотности теплоносителя (рис. 9). По завершении переходного процесса (к 1470 с) реактор возвращается в критическое состояние, а составляющие реактивности — к своим прежним значениям.

График изменения температуры первого контура приведен на рис. 9.

При отключении насосов суммарный расход уменьшается, следовательно, подогрев в зоне увеличивается. Из-за обратных связей по реактивности, средняя температура примерно сохраняет свое значение, а увеличение подогрева обеспечивается за счет возрастания выходной температуры и уменьшения входной.

Расходы теплоносителя через насосы перераспределились (см. рис. 10).

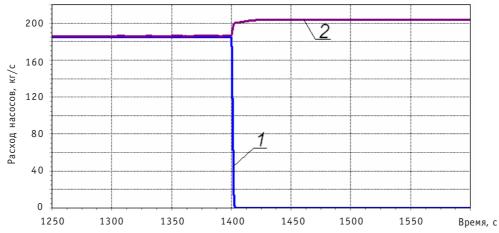


Рис. 10. График изменения расходов через насосы: 1 - отключенные насосы; 2 - работающие насосы

Характер поведения максимальных температур топлива и оболочки, как и в предыдущем примере, во время переходного процесса повторяет характер изменения мощности активной зоны.

Результаты расчетов показали высокий уровень самозащищенности реакторной установки в этих режимах: переходные процессы проходят только за счет

обратных связей. При этом «выбеги» мощности, температур и расходов не превышают допустимых пределов.

Литература

- 1. Неравновесный двухскоростной трехфазный теплогидравлический код «Serpent». НП Φ «Нуклон». Сертификат №99025, РАОАП, Москва, 1999.
- 2. Специализированная информационная система управления данными для плавучего энергоблока с реакторной установкой КЛТ-40С/Отчет РНЦ «Курчатовский институт», 2008.
- 3. Γ анев И.Х. Физика и расчет реактора/Под ред. академика Н.А. Долежаля. Издание 2-ое. М: Энергоатомиздат, 1992.
- 4. Петухов Б.С., Генин Л. Γ . Теплообмен в ядерных энергетических установках. Издание 3-е. Москва: Издательство МЭИ, 2003.
- 5. *Харрер Дж. М.* Техника регулирования ядерных реакторов/Под ред. И.Я. Емельянова. М: Атомиздат, 1967.

Поступила в редакцию 12.02.2009

(Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 12 titles.

The article is devoted to opportunity of application the methods of the Allium-test in radioecological monitoring. It is carried out biotestings of natural waters from territories of Obninsk regional radioactive repository. Ecological conditions is investigated and the estimation of potential danger to the natural environment is carried out. Results have shown, that negative biological effects are formed under influence of polluting substances in water of well located near to emergency capacity. For determination of the contribution radioactive components in formation of the biotests response are carried out additional modelling experiments. The estimation of radiosensitivity of an onions in a range of dozes from 0,1 up to 2 Γ p is given.

УДК 621.039.5

Development of Calculation Model and Analysis of Some Transition Processes in KLT-40S Reactor with SERPENT Code \P.E. Kaplar, I.S. Lisitsin, P.V. Markov, N.A. Marchikhina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 10 illustrations. – References, 5 titles.

Calculation model of KLT-40S reactor with concern of stationary and transition regimes of reactor by means of heat-hydraulic code SERPENT had developed. Results of calculation of stationary regime at the rated power level with code had compared with the reactors developers data, which indicates that calculation model was highly valid. Calculation analysis of transition regimes had performed. These transition regimes are: shutdown of 2 steam generators sections; shutdown of 2 circulation pumps of first circuit. The fact that position of control rods was invariable must be in parenthesis. Alterations of power, heat carrier temperature, fuels and dispersive fuel compositions coats had specified.

УДК 621.039.512

Spatial Neutron Kinetic Module of ROSA Code \A.L. Cherezov, N.V. Shchukin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 1 table. – References, 5 titles.

A spatial neutron kinetic module was developed for the computer code ROSA. The paper describes the numerical scheme used in the module for resolving neutron kinetic equations. Two methodologies (analytical integration and Gears method) were compared each other on their efficiency and accuracy. Both methodologies were verified on the test problems. The paper presents the results obtained in the verification studies.

УДК 621.039.59: 621.039.7

Control System of Extraction Column \A.G. Gorunov, Y.A. Chursin, K.V. Turetskov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 7 illustrations. – References, 14 titles.

The universal multicomponent model of extraction in pulsating Column was presented. Check of adequacy of model was made and the system of automated control by concentration of uranium in pulsating Column is synthesised.

УДК 621.183.371

Calculation of Main Joint of MCPA-1391 under Different Operation Conditions \A.A. Mukhlynin, V. I. Slobodchyk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.

Results of stress calculation of studs of the main joint of the main circulation pump MCPA-1391 both under steady state, and under transient conditions are presented. The thermal stress arising in the studs of the main joint under the warming up and under shut-down conditions are estimated. It is shown, that the thermal stress is an insignificant part of the total stress, and the total stress of the studs of the main joint does not exceed the limit value under all considered conditions.