

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКАЯ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВВЭР-1000 ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА

В.И. Белозеров*, В.В. Сергеев**, А.А. Казанцев***,

А.Н. Поздняков***, М.Ю. Каньшев****

* *Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск*

** *ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*

*** *ООО ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск*

**** *Калининская АС, г. Удомля*



На базе нестационарного, полностью неравновесного теплогидравлического кода из 6 уравнений и нейтронно-физической модели разработана модель реактора ВВЭР-1000.

Нейтронно-физическая и теплогидравлическая расчетная модель реактора ВВЭР-1000 дает возможность выполнить сравнительный анализ протекания переходных и некоторых аварийных процессов в зависимости как от начального состояния (период кампании, положение стержней регулирования, уровень мощности, предшествующий маневр мощности и т.п.), так и от состава самой активной зоны.

В последнее время многие из функций обучения и поддержания квалификации персонала АС выполняются при помощи компьютерных систем обучения. Совместное моделирование динамики нейтронно-физических и теплогидравлических процессов имеет целью улучшить качественное понимание и количественное представление об их влиянии на безопасность. Представленная учебная модель реактора ВВЭР-1000 дает возможность выполнить сравнительный анализ протекания переходных и некоторых аварийных процессов для широкого набора сценариев.

Разработана часть учебного курса, включающего в себя учебный материал, контрольные вопросы и демонстрационный материал, сопровождающий теоретические разделы курса. В качестве демонстрационного материала разработана модель, обеспечивающая расчеты переходных процессов в части первого контура реактора ВВЭР-1000, ограниченного входными и выходными патрубками 4 пель реактора.

Нейтронно-физические расчеты выполняются в нестационарной точечной постановке. Теплогидравлические расчеты проводятся на базе нестационарного, полностью неравновесного приближения, на основе 6 уравнений сохранения. Дополнительно рассчитывается перенос борной кислоты и неконденсируемого газа.

Для изучения эффектов реактивности и эффектов отравления реактора ВВЭР-1000 была использована следующая точечная модель кинетики реактора, способ-

© *В.И. Белозеров, В.В. Сергеев, А.А. Казанцев, А.Н. Поздняков, М.Ю. Каньшев, 2008*

ная работать во всем диапазоне мощностей, от диапазона источника и до режима полной мощности реактора.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} N + \sum_{i=1}^I \lambda_i C_i + \frac{S}{\Lambda(1-\rho)}, \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = -\lambda_i C_i + \frac{\beta_i N}{\Lambda}, \quad (2)$$

здесь N – мощность реактора [Вт], которая является результатом делений ядер, происходящих в момент времени t ; t – время [с]; ρ – реактивность, состоящая из следующих двух компонент:

$$\rho = \frac{(k-1)}{k} = \rho_{prog} + \rho_{fdbk},$$

где $k = k_{prog} + \Delta k_{fdbk}$ – коэффициент размножения; $\rho_{prog} = \left(\frac{k_{prog} - 1}{k_{prog}} \right) \frac{1}{k}$ – «программируемая реактивность» (вводится таблицей реактивности в зависимости от времени), которая моделирует сценарий ввода стержней; $\rho_{fdbk} = \left(\frac{\Delta k_{fdbk}}{k_{prog}} \right) \frac{1}{k}$ – (feedback)

реактивность обратных связей по температуре топлива, теплоносителя, борного и пустотного эффектов реактивности; $\beta = \sum_{i=1}^I \beta_i$ – суммарная доля запаздывающих нейтронов; β_i – доля запаздывающих нейтронов для группы i ; Λ – время генерации мгновенных нейтронов [с]; λ_i – постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов в группе i [1/с]; C_i – мощность [Вт] в группе i запаздывающих нейтронов, пропорциональная концентрации ядер-предшественников; I – число групп запаздывающих нейтронов (6 в расчетах ВВЭР-1000); S – тепловая мощность [Вт] внешнего источника нейтронов в активной зоне подкритического реактора; внешний источник служит для запуска цепной реакции деления.

На энергетических уровнях мощности величина S практически не влияет на поведение реактора, зато важную роль начинают играть эффекты реактивности. Необходимые значения параметров и констант для расчета кинетики реактора ВВЭР-1000 взяты из [1,3] для 6-групповой модели.

Совместно с уравнениями нейтронной кинетики решаются нестационарные пространственные уравнения теплогидравлики. Код разработан на базе конечно-разностной численной схемы SETS и системы уравнений сохранения кода TRAC [2].

Используемая система относится, как принято говорить, к «моделям из шести уравнений», т.к. в основе лежат усредненные нестационарные уравнения для средних по объему ячейки величин, в которых используется двухфазное описание процессов (отдельно рассматриваем газопаровую и жидкую фазы).

ОСНОВНЫЕ ШЕСТЬ УРАВНЕНИЙ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОГО НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ

Уравнение сохранения полной энергии смеси

$$\frac{\partial [(1-\alpha)\rho_l e_l + \alpha\rho_g e_g]}{\partial \tau} + \nabla \cdot [(1-\alpha)\rho_l e_l \vec{V}_l + \alpha\rho_g e_g \vec{V}_g] = -P\nabla \cdot [(1-\alpha)\vec{V}_l + \alpha\vec{V}_g] + q_{wl} + q_{wg} + q_{dl} + q_{dg}, \quad (3)$$

здесь α – объемная доля газовой фазы или истинное объемное паросодержание; индекс g означает газовую смесь как фазу в целом; индекс l означает жидкость

как фазу; ρ_g – плотность газа; ρ_l – плотность жидкости; e – удельная внутренняя энергия; P – давление; \vec{V}_l – вектор скорости жидкости; \vec{V}_g – то же для парогазовой смеси; $q_d = q_{dl} + q_{dg}$ – мощность, поступившая непосредственно в газовую или жидкую среду (без процесса переноса тепла теплопроводностью); $q_w = q_{wl} + q_{wg}$ – удельная, на единицу объема среды скорость теплопередачи от стенки отдельно к жидкости или газу.

Уравнение энергии газа (газовой фазы)

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g e_g)}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\alpha\rho_g e_g \vec{V}_g) = -P \frac{\partial\alpha}{\partial\tau} - P \nabla \cdot (\alpha \vec{V}_g) + q_{wg} + q_{dg} + q_{ig} + q_{gl} + \Gamma h'_v, \quad (4)$$

здесь индекс v означает «перегретый» или «сухой насыщенный» пар; q_{ig} – межфазный теплоперенос за счет теплоотдачи между фазами; q_{gl} – тепло фазового перехода, за счет скрытой теплоты парообразования; Γ – скорость межфазного массопереноса; h'_v – удельная энтальпия пара в объеме (если пар конденсируется) или удельная энтальпия пара на линии насыщения (если жидкость испаряется).

Уравнение закона сохранения массы жидкой фазы

$$\frac{\partial[(1-\alpha)\rho_l]}{\partial\tau} + \nabla \cdot [(1-\alpha)\rho_l \vec{V}_l] = -\Gamma, \quad (5)$$

здесь использовано общепринятое соглашение о знаке скорости межфазного перехода: для уравнения (6) она положительна, а для уравнения (5) – отрицательна.

Уравнение закона сохранения массы газовой фазы (пары воды и неконденсируемый газ)

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g)}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\alpha\rho_g \vec{V}_g) = \Gamma. \quad (6)$$

Уравнение закона сохранения импульса жидкой фазы

$$\begin{aligned} \frac{\partial\vec{V}_l}{\partial\tau} + \vec{V}_l \cdot \nabla \vec{V}_l = & -\frac{1}{\rho_l} \nabla P + \frac{c_i}{(1-\alpha)\rho_l} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) |\vec{V}_g - \vec{V}_l| - \\ & - \frac{\Gamma^-}{(1-\alpha)\rho_l} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) - \frac{c_{wl}}{(1-\alpha)\rho_l} \vec{V}_l |\vec{V}_l| + \vec{g}, \end{aligned} \quad (7)$$

здесь Γ^- – минимум между Γ и 0; c_i – межфазный коэффициент трения; c_{wl} – коэффициент трения о стенку (индекс l означает трение для жидкой фазы); \vec{g} – вектор силы тяжести.

Уравнение закона сохранения импульса газовой фазы

$$\begin{aligned} \frac{\partial\vec{V}_g}{\partial\tau} + \vec{V}_g \cdot \nabla \vec{V}_g = & -\frac{1}{\rho_g} \nabla P + \frac{c_i}{\alpha\rho_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) |\vec{V}_g - \vec{V}_l| - \\ & - \frac{\Gamma^+}{\alpha\rho_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) - \frac{c_{wg}}{\alpha\rho_g} \vec{V}_g |\vec{V}_g| + \vec{g}, \end{aligned} \quad (8)$$

здесь Γ^+ – максимум между Γ и 0; c_{wg} – коэффициент трения о стенку парогазовой фазы (индекс g).

Система из шести уравнений (3)–(8) имеет шесть независимых переменных: давление (P), истинное объемное паросодержание (α), температуры газовой и паровой фаз (T_g, T_l), и скорости фаз (\vec{V}_g, \vec{V}_l).

Простое уравнение сохранения неконденсируемого газа, точнее смеси неконденсируемых газов, таких как воздух или гелий, может моделироваться кодом при задании ключа расчета. Принимается допущение, что все компоненты газовой смеси имеют одинаковую температуру и движутся с той же скоростью, что и пар

(в условиях механического и теплового равновесия). При принятых допущениях одного уравнения сохранения достаточно, чтобы описать динамику смеси с неконденсирующимся газом.

Уравнение сохранения полной массы парогазожидкостной смеси

$$\frac{\partial[(1-\alpha)\rho_l + \alpha\rho_g]}{\partial\tau} + \nabla \cdot [(1-\alpha)\rho_l\vec{V}_l + \alpha\rho_g\vec{V}_g] = 0. \quad (9)$$

Закон сохранения массы неконденсируемого газа

$$\frac{\partial(\alpha\rho_a)}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\alpha\rho_a\vec{V}_g) = 0. \quad (10)$$

При описании парогазовой смеси принимается, что полная плотность газовой смеси и энергия являются суммой соответствующих компонент: водяного пара (v) и неконденсируемого газа (a)

$$\rho_g = \rho_v + \rho_a \quad (11)$$

где ρ_v – плотность пара; ρ_a – плотность неконденсируемого газа;

$$\rho_g e_g = \rho_v e_v + \rho_a e_a \quad (12)$$

Предполагается, что справедлив закон Дальтона для смесей газов, поэтому

$$P = P_v + P_a \quad (13)$$

где P_v – парциальное давление пара, а величина P_a (давление неконденсируемого газа) фактически задает состав смеси.

Наличие растворимой примеси (борная кислота) в коде учитывается введением дополнительного уравнения закона сохранения массы растворимой примеси, движущейся с потоком жидкой фазы и не влияющей на ее гидродинамику.

Уравнение сохранения растворимой примеси

$$\frac{\partial[(1-\alpha)m\rho_l]}{\partial\tau} + \nabla \cdot [(1-\alpha)m\rho_l\vec{V}_l] = 0, \quad (14)$$

здесь m – величина концентрации примеси (масса примеси/на массу воды) в жидкой фазе.

Если мы предполагаем, что примесью является ортоборная кислота (orthoboric acid), то примесь не влияет на гидродинамику. Тем не менее, большое количество растворенной в воде или покрывающей металлические части контура в активной зоне примеси может влиять на гидродинамику косвенно, через обратную связь по реактивности, влияя на нейтронный поток. Отклик системы зависит от коэффициентов реактивности, задаваемых пользователем кода. Величины обратных связей (коэффициенты реактивности) зависят от массовой концентрации бора и задаются таблицей от времени в файле исходных данных.

Перенос тепла в активной зоне для композитного твэла, включающего в себя топливную таблетку с центральным отверстием, газовый зазор и циркониевую оболочку рассчитывается нестационарным уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial(\rho_w c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_w \nabla T) + q_v, \quad (15)$$

где T – температура [K]; c_p – удельная изобарная теплоемкость; ρ_w – плотность материала стенки; λ_w – коэффициент теплопроводности материала стенки; q_v – удельное энерговыделение на единицу объема в единицу времени.

Граничными условиями являются условие симметрии в центре твэла и условие конвективного теплообмена на наружной поверхности. При этом коэффициенты теплоотдачи, трения и другие замыкающие соотношения рассчитываются на ос-

нове карты режимов двухфазного течения, аналогичной карте кода TRAC [2].

Для задания теплофизических свойств в твэлах используются таблицы зависимостей плотности, удельной теплоемкости и теплопроводности от температур для каждого материала (диоксид урана, газовая смесь, циркониевая оболочка).

Для газового зазора используется модель, учитывающая радиационный перенос тепла между топливом и оболочкой.

Данная динамическая нейтронно-физическая и теплогидравлическая постановка задачи позволяет учитывать влияние большинства важных для анализа безопасности явлений:

- 1) остаточное тепловыделение после сброса аварийной защиты;
- 2) аккумулированное тепло в топливе и твэлах на момент остановки;
- 3) для широкого круга сценариев задаются в табличной форме (в зависимости от времени моделирования): температуры каждой фазы, скорости фаз, объемное паросодержание, концентрация борной кислоты, концентрация газа в парогазовой смеси, давление общее и парциальное давление неконденсируемой компоненты (водород, воздух, гелий);
- 4) работа регулятора, в частности, использовался регулятор мощности;
- 5) для расчета аварийных ситуаций при потере герметичности первого контура в модели по ключу вводится ограничение для скорости потока, которая должна быть ниже местной скорости звука;
- 7) рассчитываются коэффициенты трения и коэффициенты теплоотдачи при фазовых переходах во всем диапазоне паросодержаний, для всей карты режимов двухфазных течений.

При расчете переноса одно- или двухфазной среды и борной кислоты по первому контуру и внутри корпуса реактора получаются близкие к экспериментальным задержки времени переноса растворенной примеси по контуру.

На основе представленной математической модели разработана нодализационная схема части первого контура реактора ВВЭР-1000.

При разработке модели для достижения поставленных целей курса была сделана попытка охватить следующие характерные режимы работы:

- работа на полной и постоянной мощности;
- пуск реактора;
- останов реактора;
- переход с уровня на уровень мощности;
- управление состоянием реактора при помощи органов регулирования (ОР) СУЗ и изменением концентрации бора;
- изменение расхода теплоносителя (отключение насосов);
- изменение концентрации бора (изменение концентрации в подающих патрубках).

Были выполнены расчеты для нескольких переходных процессов с целью проверки модели динамики реактора с обратными связями. На рис. 1, 2 представлены графики переходных процессов для демонстрации пустотного эффекта реактивности и на рис. 3 – для влияния борного эффекта реактивности. Начальная концентрация борной кислоты во всех расчетах была равна 4 г кислоты на 1 кг воды.

Для демонстрации пустотного эффекта реактивности необходимо получить пар в активной зоне, задавая сценарий аварии с потерей циркуляции теплоносителя. В сценарии расчета последовательно, с интервалом 1000 с, были отключены два из 4 насосов первого контура. На рис. 1. видно, что наличие пустотного эффекта реактивности приводит к росту мощности реактора при появлении пара в реакторе. В данном расчете, вследствие принятой постановки задачи, не использовалась логика работы органов СУЗ, кроме того, остальные эффекты реактивности (темпе-

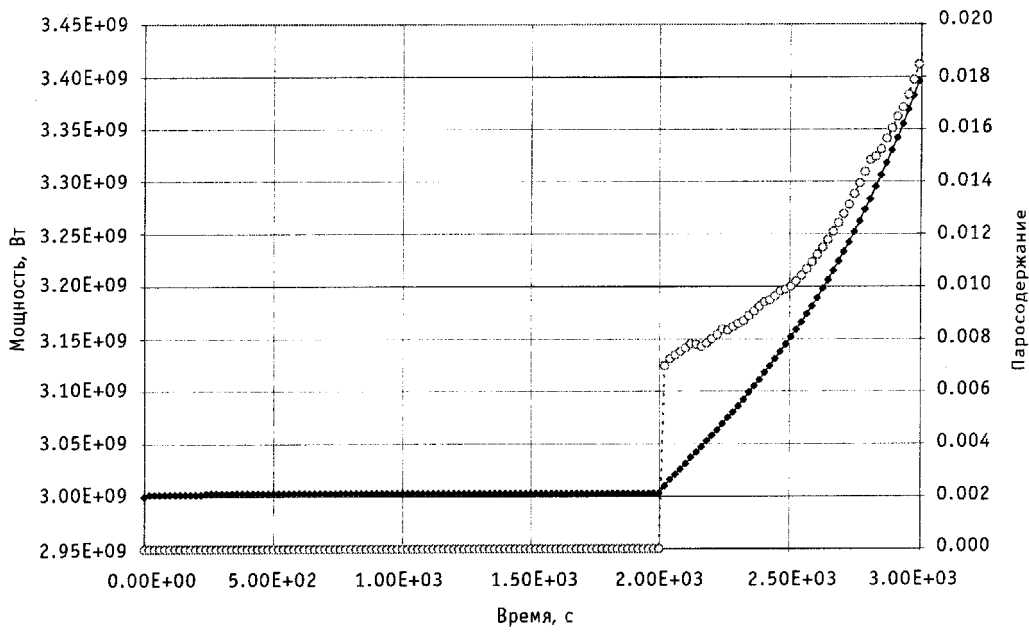


Рис. 1. Остановка 2 насосов и демонстрация пустотного эффекта реактивности в нейтронно-физической и теплогидравлической модели: ◆ – тепловая мощность; ○ – объемное паросодержание выходное

ратурный, мощностной и борный) были отключены в модели.

Как видно из рис. 1, появление пара в реакторе происходит после отключения двух насосов. Это приводит к росту тепловой мощности и, в свою очередь, к увеличению объемного паросодержания как в активной зоне, так и на выходе из реактора.

На рис. 2 представлена температура (в системе СИ в К): в центре топлива, на периферии таблетки и средняя температура теплоносителя на выходе из реакто-

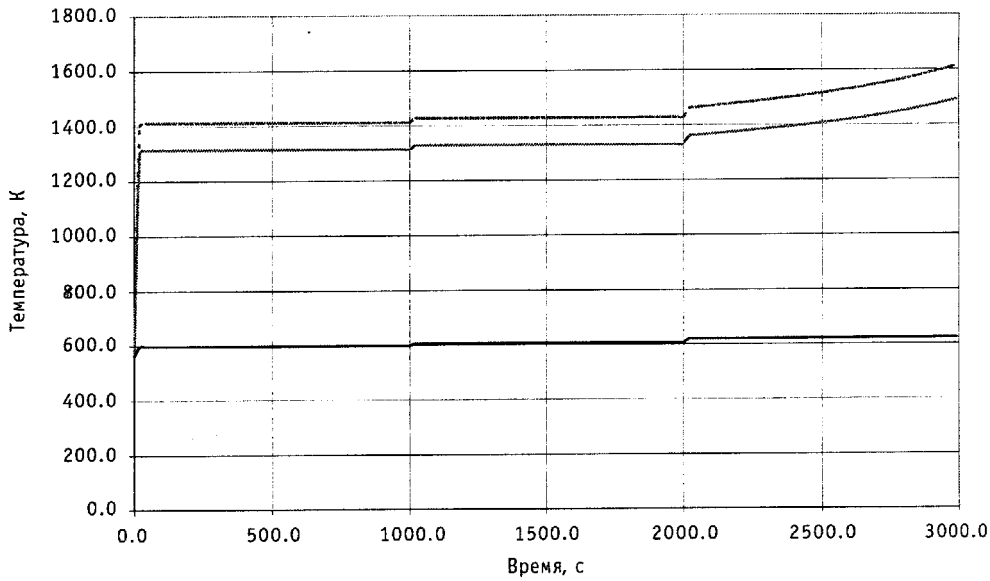


Рис. 2. Остановка 2 насосов и демонстрация пустотного эффекта реактивности в нейтронно-физической и теплогидравлической модели: - - - - максимальная температура; — — — — температура топлива; — — — — температура теплоносителя на выходе

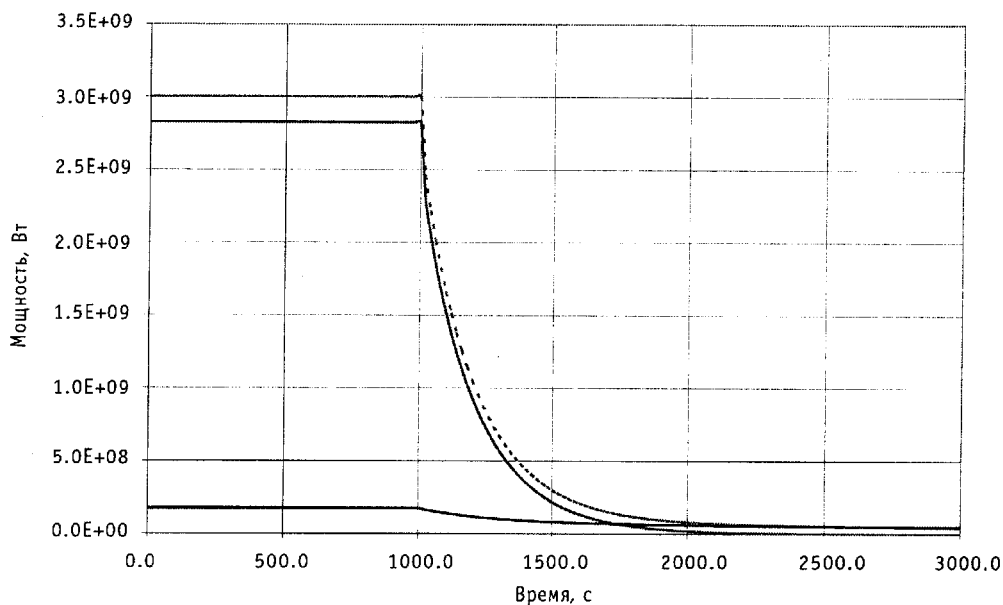


Рис. 3. Полная мощность и остаточное тепловыделение при остановке 2 насосов и реактора:
 - - - - тепловая мощность; - нейтронная компонента; ———— - остаточное тепловыделение

ра. Рост температуры топлива вызван, прежде всего, пустотным эффектом реактивности, т.е. происходит за счет роста мощности. Температура теплоносителя на выходе является балансовой – на нее не влияет рост при пузырьковом кипении коэффициентов теплоотдачи.

В данной точечной модели все коэффициенты реактивности, включая пустотный, температурный, мощностной и борный являются внешними исходными данными и выбираются на основе опыта эксплуатации реакторов ВВЭР. Пустотный коэффициент реактивности изменяет знак, но для номинального режима с учетом отравления он положителен [3. С. 72–73; табл. 2.2]. Знак пустотного коэффициента реактивности зависит от изменения отношения числа делений к числу поглощений, которое увеличивается при ужесточении спектра нейтронов в реакторе, когда вскипает теплоноситель в активной зоне. Остальные коэффициенты реактивности отрицательные.

Для демонстрации борного эффекта реактивности необходимо ступенчато увеличить концентрацию борной кислоты, поступающей через все 4 входные патрубка. Для этого концентрация борной кислоты ступенчато возрастала с 4 до 5 г кислоты на 1 кг воды, начиная с 1000 с. Моделируется авария с внезапным впрыском поглотителя в активную зону при сохранении циркуляции теплоносителя. Все насосы первого контура работают с номинальными параметрами. На рис. 3 видно, что в модели реактора полная тепловая мощность состоит из двух компонент – нейтронной компоненты и остаточного тепловыделения. Нейтронная компонента рассчитывается по описанной выше нейтронно-физической модели.

При скачке концентрации борной кислоты (движение стержней не моделировалось) происходит остановка цепной реакции деления и переход на остаточное тепловыделение.

Кривая остаточного тепловыделения рассчитывается по известной формуле Вигнер-Вэй.

Для демонстрации борного эффекта реактивности был введен избыточный запас реактивности, соответствующий началу кампании. Оказалось необходимым

включить температурный и мощностной (отрицательные) эффекты реактивности, т.к. без них мощность реактора в начале моделирования режима непрерывно возрастала и уходила за уставку срабатывания аварийной защиты. После этого режим полной мощности удалось получить, не выходя из рамок допустимых величин параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработано учебно-методическое обеспечение, состоящее из теоретической части, демонстрационной части и контрольных вопросов. В статье представлен материал, касающийся демонстрационной части курса, а, именно, модели реактора ВВЭР-1000, разработанной с целью изучения динамики реактора и протекающих теплофизических процессов. В модели используется 3D-нестационарная теплогидравлическая модель части первого контура реактора ВВЭР-1000, ограниченная входными и выходными патрубками, и точечная нейтронно-физическая модель реактора с заданными профилями неравномерности тепловыделения по высоте и радиусу реактора. Модель выполнена с учетом всех важных для расчета динамики физических процессов. Работа предназначена для использования в учебном процессе на УТП Калининской АС.

Авторы выражают признательность Ю.В. Волкову за ряд полезных замечаний, высказанных при обсуждении статьи.

Литература

1. *Афров А.М., Андрушечко С.А., Украинцев В.Ф. и др.* ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 488 с.
2. TRAC-PD2. An advanced best-estimated computer program for pressurized water reactor loss-of-coolant accident analysis. NUREG/CR-2054, 1981.
3. *Овчинников Ф.Я., Семенов В.В.* Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.

Поступила в редакцию 3.03.2008