РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗАТОРА РЕЖИМОВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000 НА КАЛИНИНСКОЙ АЭС НА БАЗЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «HARD_NUT», РАЗРАБОТАННОГО В ЛАБОРАТОРИИ ТРЕНАЖЕРНЫХ СИСТЕМ МИФИ.

С.Б. Выговский, А.А. Семенов, Е.В.Чернов, Д.М. Батурин, Л.Н.Богачек[1], В.М.Чапаев[1]
Лаборатория тренажерных систем, Московский Государственный инженерно-физический институт (технический университет)
[1]Калининская АЭС

PRELIMINARY VERIFICATION RESULTS OF COMPUTER ANALYZER FOR INVESTIGATION OF NORMAL OPERATION, TRANSIENT AND ACCIDENT CONDITIONS OF VVER-1000 REACTOR AT KALININ NPP, BASED ON THE CODE «HARD_NUT», DEVELOPED BY TRAINING SYSTEMS LABORATORY OF MOSCOW STATE ENGINEERING PHYSICS INSTITUTE.

S.B. Vigovsky, A.A. Semenov, E.V.Tchernov, D.M. Baturin, L.N.Bogachek[1], V.M.Chapaev[1]
Laboratory of simulation systems, Moscow State Engineering Physics Institute (Technical University)
[1]Kalininskaya NPP

The «HARD_NUT» code is developed for calculation of main neutronic and thermalhydraulic reactor core parameters for VVER and PWR type reactors. The «HARD_NUT» code models description is presented. Code verification is based on Kalininskaya NPP computated and experimental data for different core loadings. The «HARD_NUT» code verification results are presented.

Введение

В настоящее время на АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000 эксплуатируются различные программные комплексы (ПК) расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны: «КАСКАД» (РНЦ им. Курчатова), «АЛЬБОМ» (ВНИИАЭС), «РАДУГА» (АЭП), «NOSTRA» (РНЦ им. Курчатова, МИФИ), которые обеспечивают высокую точность моделирования процессов в активной зоне в квазистационарных режимах. Некоторые из перечисленных комплексов позволяют проводить моделирование переходных процессов. Программные комплексы, разработанные во ВНИИАЭС, в центре тренажеростроения и математического моделирования, и в ИАТЭ (Институт атомной энергетики г. Обнинск), обеспечивают проведение моделирования переходных процессов в реальном или даже «сверхреальном» масштабе времени, но обычно существенно уступают по точности моделирования программным комплексам, перечисленным выше. На АЭС с реакторами типа ВВЭР существует реальная потребность в программных комплексах, которые могли бы обеспечить оперативное расчетное сопровождение эксплуатации и прогнозирование характеристик активной зоны при любых штатных и нештатных ситуациях в сверхреальном масштабе времени. Для удовлетворения этой потребности в лаборатории тренажерных систем был разработан анализатор режимов работы блока «HARD_NUT». Первая версия данного программного комплекса используется в составе полномасштабного тренажера АЭС с реактором типа PWR (г. Гёсген, Швейцария). ПК HARD_NUT успешно прошел тестовые и приёмно-сдаточные испытания, заслужив высокую оценку со стороны швейцарских и немецких специалистов. Следующая версия данного комплекса сдана в опытную эксплуатацию в отдел ядерной безопасности на КлнАЭС.
В работе приведены описание программного комплекса «HARD_NUT» и результаты его верификации по расчетно-экспериментальным данным для 1-12 топливных загрузок 2-го блока КлнАЭС.

Описание программного комплекса «HARD_NUT»

Программный комплекс «HARD_NUT» - High Art Reactor Dynamic Neutronics & Thermohydraulics - по своим функциональным возможностям сопоставим с программным комплексом «КАСКАД» и программой «NOSTRA».

Объем моделирования определяется наличием следующих программных компонент:

♦ нейтронно-физическая трехмерная двухгрупповая нестационарная модель активной зоны с нодальным описанием пространственного распределения потока нейтронов. Модель использует приближение 6-ти групп предшественников запаздывающих нейтронов и 10-ти групп излучателей для расчета остаточного энерговыделения;

♦ нестационарная теплогидравлическая модель активной зоны. Теплогидравлическая модель является строго нестационарной по всем законам сохранения, использует замыкающие соотношения для моделирования генерации и конденсации пара в объёме теплоносителя и на теплопередающей стенке аналогично программам «RELAP» и «TRAC». Модель учитывает присутствие неконденсирующихся газов в теплоносителе. Теплофизическая модель топлива учитывает зависимость проводимости газового зазора и топлива от глубины выгорания топлива и линейной тепловой нагрузки;

♦ нестационарная теплогидравлическая модель опускного участка и нижней камеры смешения реактора. Модель строится на тех же приближениях, что и теплогидравлическая модель активной зоны. Модель разрабатывается и модернизируется с использованием системы ЭНИКАД;

♦ модель системы управления и защиты реактора.

ПК HARD_NUT может функционировать как программный модуль внешней управляющей системы (опыт разработки модели реактора PWR), так и с использованием системы отображения данных GIW, разработанной в лаборатории тренажерных систем. Графический интерфейс модели (GIW) обеспечивает визуализацию, протоколирование и редактирование любых данных, включенных в базу описания переменных. Оболочка GIW поддерживает режимы редактирования образов (форматов) отображения данных на устройствах визуализации и режим отладки модели.

При разработке или модернизации анализатора в среде GIW используются:

♦ программы, обеспечивающие формирование двухгрупповой библиотеки нейтронно-физических (н/ф) констант в формате для ПК “HARD_NUT”. Для подготовки н/ф констант используется программа «GETERA» (разработка МИФИ - ВНИИАЭС), позволяющая проводить расчеты констант практически для любых топливных загрузок реакторов типа ВВЭР. В настоящее время подготовлены константы для ТВС двухгодичного и трёхгодичного топливных циклов, а также для усовершенствованных ТВС конструкции ОКБМ;

♦ планировщик заданий (ПЗ), предназначенный для описания стандартных задач, решаемых при помощи анализатора. ПЗ поддерживает сохранение и восстановление состояний анализатора и обладает развитым языком описания сценариев;

♦ средства разработки ЭНИКАД, позволяющие в интерактивном режиме проводить разработку моделей систем автоматики и теплогидравлики.

Отличительные особенности моделей ПК HARD_NUT

Отличительными особенностями моделей ПК HARD_NUT, обеспечивающими необходимую точность моделирования при сохранении высокого быстродействия, являются:

♦ временная дискретизация уравнения кинетики нейтронов основана на представлении потока нейтронов в виде произведения амплитудной и формфункции. Введение явной зависимости коэффициентов уравнения кинетики от амплитудной функции приводит к устойчивой численной схеме;

♦ пространственная дискретизации уравнения кинетики нейтронов проводится с использованием метода нодальных связей в интерпретации Новикова (ИАЭ им. И.В. Курчатова) с авторской модификацией базиса собственных функций. Применяемый метод нодальных связей основан на использовании трехмерных аналитических функций, являющихся собственными решениями оператора двухгруппового уравнения диффузии в каждом расчетном узле. Данный подход порождает нелинейный конечно-разностный аналог уравнения диффузии, численное решение которого обладает абсолютной устойчивостью при любом размере нода;

♦ учет реального окружения ТВС путем введения спектральных поправок н/ф констант, входящих в библиотеку констант программного комплекса HARD_NUT;

♦ оригинальная интерполяционная процедура расчета н/ф констант нодов с частично введенным органом СУЗ;

♦ многомерная кусочно-линейной интерполяция нейтронно-физических констант по температуре воды, плотности воды, концентрации бора в воде, температуре топлива и глубине выгорания топлива. Для повышения быстродействия расчета н/ф констант используется триангуляционный алгоритм расчета значений интерполяционной функции;

♦ для решения конечно-разностного аналога двухгруппового уравнения диффузии используется двухслойный метод Чебышева с эвристической оценкой 2-ого собственного числа оператора, обеспечивающей абсолютную устойчивость численной схемы при сохранении ее теоретической скорости сходимости;

♦ оригинальная численная схема решения 5-ти уравнений модели теплогидравлики обеспечивает абсолютную численную устойчивость при произвольном шаге по времени и выполнение базовых принципов при любых аварийных режимах;

♦ рассчитываемые н/ф константы корректируются с учетом спектральной истории выгорания в каждом расчетном ноде;

♦ для учета реального расположения дистанционирующих решёток по высоте активной зоне вводится специальная коррекция нейтронно-физических констант в каждом ноде.

Сопоставление данных эксплуатационных измерений с результатами расчета

В материале доклада приведено сопоставление результатов расчета ПК «HARD_NUT» с измеренными данными и данными, полученными по программе «КАСКАД», для различных топливных загрузок 2-го блока КлнАЭС. Сопоставление результатов проводилось по следующим параметрам:

♦ значению критической концентрации борной кислоты в зависимости от времени работы каждой топливной загрузки с учетом реальных графиков движения органов СУЗ и изменения тепловых нагрузок для квазистационарных состояний энергоблока;

♦ длительности работы топливных загрузок;

♦ пусковым значениям критических концентраций борной кислоты на МКУ в начале каждой топливной загрузки;

♦ интегральной эффективности аварийной защиты и управляющей группы органов СУЗ («веса» АЗ) на МКУ для 5-12 топливных кампаний;

- ♦ значениям температурных коэффициентов реактивности на МКУ и на мощности на начало кампании для 5-12 топливных загрузок;
- ♦ значениям мощностного коэффициента реактивности для 5-12 топливных кампаний;
- ♦ радиальным коэффициентам неравномерности поля энерговыделения в ТВС активной зоны для 9-12 топливных кампаний.

В качестве примеров в тезисах доклада приведены средние по времени отклонения расчетных значений концентрации борной кислоты от измеренных для каждой топливной загрузки и для пяти временных интервалов топливной кампании: 0-50 суток, 50-100 суток, 100-200 суток, 200-300 суток, 300-400 суток. Отклонения концентраций бора уменьшаются к концу кампаний и не превышают 0.3 г/л. Приведены оценки отклонений расчетной и экспериментальной длительностей топливных кампаний, дисперсия расчетных значений борной кислоты и отклонение средней расчетной величины производной концентрации борной кислоты по времени от экспериментальной. Значения отклонений расчетной и экспериментальной длительностей топливных кампаний не превышают 8 суток, среднее отклонение составляет около 4 суток, что свидетельствует о хорошем качестве моделирования темпа выгорания топлива и темпа выведения борной кислоты.

Для иллюстрации влияния спектрального фактора на темп выгорания топлива приведены отклонения расчетных величин длительности топливных загрузок от оцененных по измеренным данным АЭС с учетом и без учета этого фактора. Из анализа данных видна заметная разница в расчетных величинах длительности кампаний, которая тем больше, чем сильнее отклоняется реальный график нагрузок от работы реактора на номинальной мощности. Расчеты топливных загрузок 2-го блока КлнАЭС показали, что отсутствие учета данного эффекта приводит к систематическому завышению длительности кампаний, которое может достигать величины 10-12 суток. Кроме того, учет спектральной истории выгорания топлива приводит к уменьшению аксиального офсета мощности к концу кампании. Данное уменьшение при малых величинах офсета (2-3%) может достигать 100-200%.

Заключение

В докладе приведены отдельные результаты верификации программного комплекса «HARD_NUT» по расчетным и экспериментальными данными КлнАЭС. Результаты верификации позволяют сделать вывод, что точность расчета основных характеристик активной зоны реактора ВВЭР-1000 по программному комплексу «HARD_NUT» для ТВС двухгодичного и трехгодичного топливных циклов сопоставима с экспериментальными данными в пределах погрешности их измерения и по меньшей мере не хуже точности расчета по программе «КАСКАД».

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о необходимости учета спектральной истории выгорания топлива при моделировании реакторов типа ВВЭР.

Таб. 1 Усредненные по интервалам кампании отклонения расчетных и экспериментальных значений концентрации борной кислоты

Номер кампании	Интервал кампании по которому проведено усреднение, сут.						Отклонение расчетной длительности кампании от экспериментальной (эфф. сут.)
	0-50	50-100	100-200	200-300	300-400	0-400	
1	-0,26276	0,03935	0,13632	0,15676	0,0683	0,08335	-0,45452
2	0,0102	0,09	0,15798	0,08961	-	0,09983	0
3	-0,05483	-0,02882	0,05137	0,04548	-	0,01583	-0,82671
4	0,09558	0,12677	0,16812	0,08599	-	0,12622	-1,09756
5	0,0525	0,16766	0,19105	0,1828	-	0,1675	4,12324
6	-0,0938	-0,20509	-0,128	-0,02991	0,13	-0,09764	5,97428
7	-0,04	-0,04196	0,0283	0,05899	-	0,01416	-0,51764
8	0,03359	0,06891	0,07471	0,08827	-	0,06732	0,95529
9	-0,27288	-0,15684	-0,15709	-0,10794	-	-0,15956	0,50892
10	0,12593	0,13107	0,13288	0,10822	0,0496	0,11792	2,96412
11	0,05981	0,02396	0,01294	-0,10276	-	0,01126	-4,65342
12	-0,11717	-0,12902	-0,11865	-	-	-0,1213	-7,95183

Таб. 2 Изменение длительности кампаний при учете истории выгорания топлива (расчеты HARD_NUT с константами GETERA)

Номер кампании	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ΔT эфф. сут.	8.5	12.0	15.5	13.1	12.4	11.0	10.4	10.0	15.3	13.7	17.7	13.5

Таб. 3 Расчетная и экспериментальная оценка эффективности борной кислоты

Номер кампании	Расчетная эффективность борной к-ты	Эксперимен-тальная эффективность борной к-ты	Отношение эффективностей	Дисперсия измерений концентрации борной кислоты	Среднее отклонение расчета от эксперимента
1	-0.0212911	-0.0220013	0.967722	0.19519	0.0833517
2	-0.0233913	-0.0236215	0.990253	0.112657	0.0998285
3	-0.0239524	-0.0241923	0.990084	0.120612	0.015834
4	-0.0191076	-0.0197177	0.969062	0.0968574	0.126217
5	-0.0201699	-0.0203381	0.99173	0.125505	0.167498
6	-0.0208266	-0.0209505	0.994087	0.146805	-0.0976387
7	-0.0218462	-0.0221609	0.9858	0.123352	0.014159
8	-0.0233436	-0.0235969	0.989267	0.0875374	0.0673154
9	-0.0208284	-0.0218232	0.954416	0.0956872	-0.159557
10	-0.0203116	-0.0201812	1.00646	0.0800779	0.117919
11	-0.0238457	-0.0229064	1.041	0.0802329	0.0112622
12	-0.0194164	-0.0194168	0.99998	0.0628262	-0.121298
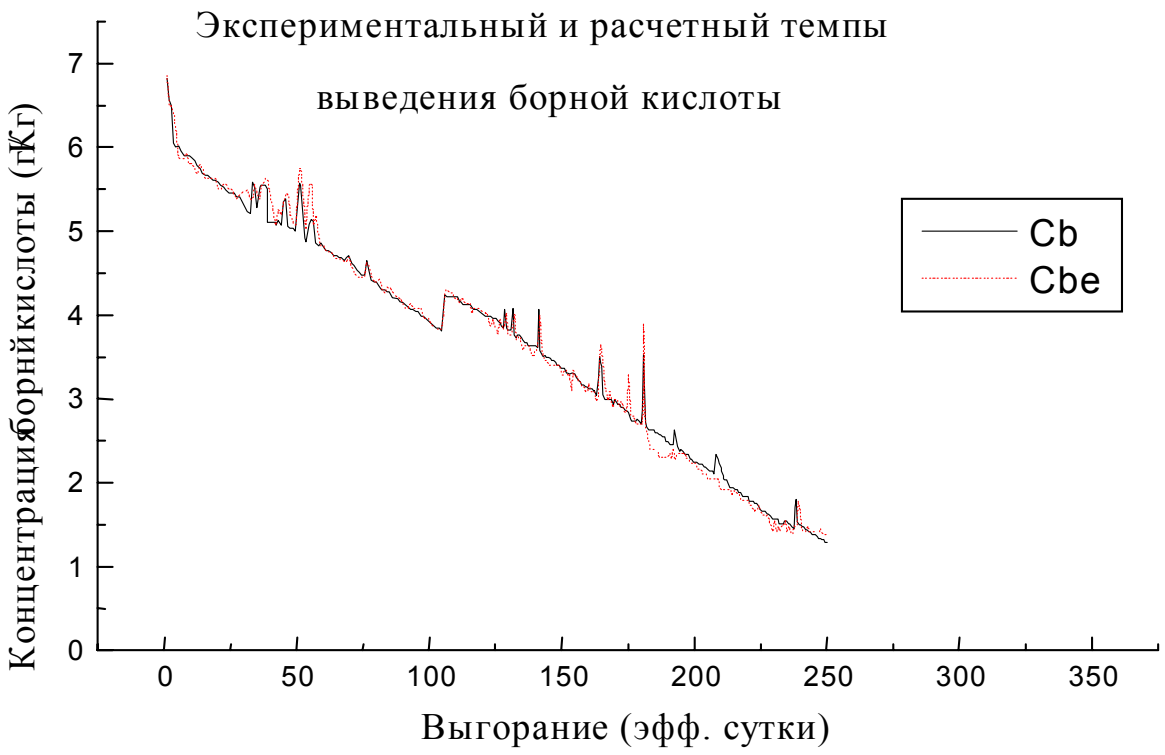
Рис. 1 Зависимость критической концентрации борной кислоты от выгорания топлива для 7-ой топливной кампании второго блока Калининской АЭС (расчет и эксперимент)