

ВЕРИФИКАЦИЯ КОДА DYNCO НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРОВ ВТГР

М.В. Силин, А.В. Левченко, О.А. Григорьева

ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск



Приводятся результаты верификации кода DYNCO при моделировании нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ВТГР, основанной на международной тестовой задаче. Показано, что используемый трехмерный динамический код может применяться для расчетов высокотемпературных реакторов, причем результаты, полученные по коду DYNCO, с хорошей точностью описывают характеристики реактора данного типа.

Ключевые слова: DYNCO, ВТГР, реакторная установка, активная зона, моделирование, верификация.

Key words: DYNCO, HTGR, reactor, core, simulation, verification.

ВВЕДЕНИЕ

Для развивающейся технологии реакторов типа ВТГР необходимо надежное расчетное сопровождение нейтронно-физических исследований действующих и проектируемых реакторов. Особенно востребованы программные коды, способные проводить трехмерные динамические расчеты в режиме реального времени. Одним из таких кодов является DYNCO.

Код DYNCO разработан в ЭНИМЦ «Моделирующие системы» и предназначен для расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора. Программа позволяет проводить расчеты стационарных, переходных и аварийных процессов в режиме реального времени для различной геометрии активной зоны реактора.

Блок нейтронно-физического расчета кода DYNCO решает задачу пространственной кинетики реактора в диффузионном приближении. Метод решения временной зависимости уравнения диффузии для функции нейтронного потока основан на разделении переменных быстро изменяющейся функции коэффициента амплитуды и медленно изменяющейся формы функции.

Все обратные связи принимаются во внимание путем изменения нейтронных сечений. Такой метод моделирования полностью соответствует описанию реальных физических процессов. Для работы программы необходим следующий набор групповых констант по каждому материалу для каждой энергетической группы: коэффициент диффузии, сечение увода из группы, сечение размножения и матрица перехода из группы в группу.

Код DYNCO позволяет производить трехмерные нейтронно-физические расчеты активной зоны для различных типов реакторов, таких как реакторы с водой под давлением (ВВЭР, PWR), кипящие реакторы (РБМК, BWR) и реакторы на быстрых нейтронах (БН).

© М.В.Силин, А.В.Левченко, О.А.Григорьева, 2013

С помощью данного кода можно получить трехмерные характеристики

- теплогидравлических параметров активной зоны, включая температуру теплоносителя, топлива и др.;
- отравления реактора;
- остаточного энерговыделения;
- потока нейтронов.

В зависимости от требований к временному шагу расчета и точности моделируемых процессов количество расчетных узлов (в плоскости) на одну тепловыделяющую сборку может быть различным: до 16-ти точек для квадратной решетки и до 19-ти для треугольной. Количество расчетных узлов по высоте активной зоны реактора может варьироваться в зависимости от поставленной задачи.

Для верификации трехмерного кода DYNCO в задачах моделирования активной зоны реакторов ВТГР была выбрана международная тестовая задача «Оценка характеристик высокотемпературного газоохлаждаемого реактора: сравнительный анализ, связанный с началом тестирования HTTR и HTR-10» [1].

ОПИСАНИЕ ТЕСТОВОЙ ЗАДАЧИ

Выбранная тестовая задача создана на основе экспериментов, проведенных на существующем высокотемпературном испытательном реакторе HTTR (High Temperature Test Reactor), расположенном на территории Японского института исследований атомной энергии (JAERI). В реакторе HTTR используются графит как замедлитель и гелий – теплоноситель; температура гелия на выходе из активной зоны составляет 850°C, тепловая мощность 30 МВт.

На рисунке 1 показаны вертикальное сечение и основные компоненты реактора.

Активная зона с отражателем составлена из призматических шестигранных блоков высотой 580 мм и размером «под ключ» 360 мм. В реакторе присутствуют блоки нескольких типов: топливные блоки с каналами под стержни СУЗ, замещаемые блоки отражателя и инструментальные. Активная зона состоит из 30-ти топливных колонн и семи колонн под стержни СУЗ. Замещаемая область отражателя, смежная с активной зоной, состоит из девяти колонн под стержни СУЗ и 15-ти колонн отражателя, которые окружены стационарным отражателем. Каждая топливная колонна состоит из двух верхних блоков отражателя, пяти тепловыделяющихборок и двух нижних блоков отражателя. Активная зона разделена на четыре топливные зоны, которые отличаются типом ТВС (ТВС в топливных зонах 1 и 2 содержат 33 топливных стержня, а в зонах 3 и 4 – 31), обогащением топлива по U-235 и количеством выгорающего поглотителя V_4C .

На рисунке 2 представлена картограмма активной зоны и отражателя реактора HTTR («числитель» означает обогащение топлива по U-235, «знаменатель» – содержание бора в выгорающем поглотителе).

Основные характеристики реактора приведены в табл. 1.

Топливная колонна состоит из пяти ТВС (рис. 3). Каждая ТВС содержит каналы для загрузки топливных стержней, состоящих из компактов с шаровыми твэлами.

Помимо топливных стержней, ТВС содержит стержни с выгорающим поглотителем V_4C (ВП). В ТВС конструктивно выполнено три канала для ВП. Один канал всегда пустой, а два других содержат стержни с V_4C . Диаметр канала для ВП составляет 15 мм. Диаметр стержня ВП 14 мм, а высота – 500 мм. Конструктивно стержень выполнен из трех частей: слой графита высотой 100 мм помещен между двумя слоями карбида бора по 200 мм каждый. Распределение стержней ВП по активной зоне показано на рис. 4.

Выгорающий поглотитель используется для компенсации большого начального запаса реактивности. Использование ВП также выравнивает поле энерговыделения.

Таблица 1

Основные характеристики реактора НТТР

Параметр	Значение
Тепловая мощность, МВт	30
Теплоноситель	Гелий (газ)
Входная температура теплоносителя, °С	395
Выходная температура теплоносителя, °С	850
Давление теплоносителя, МПа	4
Топливо	UO ₂
Обогащение топлива по U-235, %	От 3,4 до 9,9

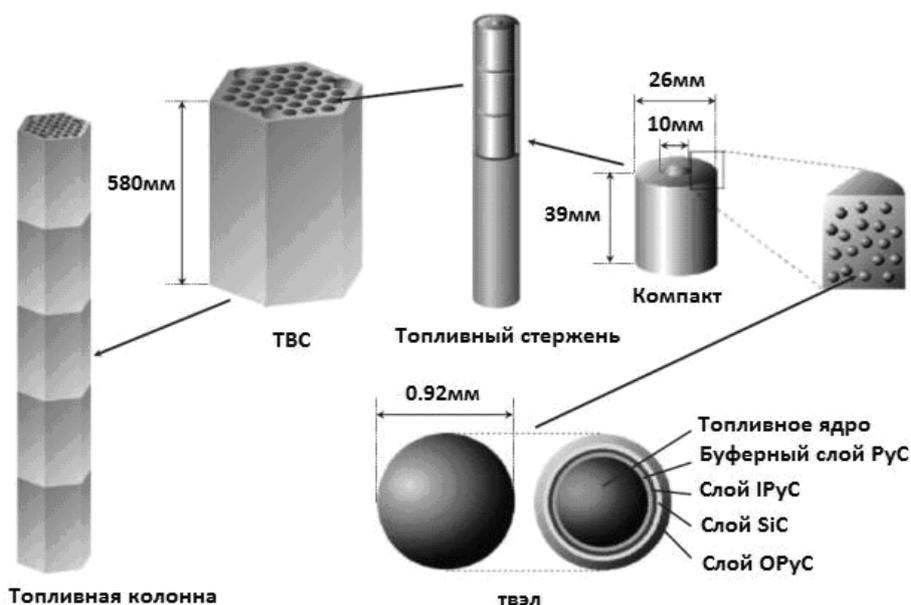


Рис. 3. Топливная колонна, ТВС, топливный стержень, компакт, ТВЭЛ

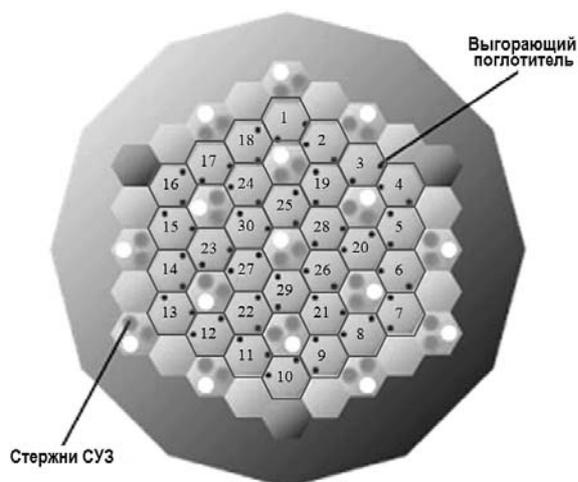


Рис. 4. Расположение стержней ВП и СУЗ в активной зоне

Указанные на рис. 4 номера соответствуют порядку загрузки реактора.

Система управления и защиты реактора НТТР включает в себя 16 пар поглощающих стержней: семь из них расположены непосредственно в активной зоне, девять – в отражателе. Они погружаются в специальные каналы в блоках под стержни СУЗ. В таких блоках конструктивно выполнено три канала: два для стержней, участвующих в управлении реактором, и один для резервной системы аварийной защиты. Органы регулирования разделены на четыре группы: *C* – центральные стержни; *R1* – стержни, расположенные в активной зоне; *R2* и *R3* – в отражателе.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА НТТР

Макроскопические константы, такие как коэффициенты диффузии, сечения поглощения, деления, рассеяния, для каждого типа ячеек подготавливались при помощи кода WIMS-D/4 [2], в котором автоматически осуществляется свертка сечений к 10-групповому приближению, выбранному как оптимальное. При этом использовалась библиотека констант ENDF-B/VII [3].

Полученные после свертки значения макроконстант подавались в DYNCO и использовались при расчетах активной зоны.

Наличие несимметричности в кассетах и блоках под стержни СУЗ привело к использованию семиточечной модели блока (рис. 5). Было задано 27 расчетных точек в аксиальном направлении: по пять точек на каждую из пяти ТВС для учета неравномерности расположения выгорающего поглотителя по высоте и по одной расчетной точке для верхнего и нижнего отражателя.

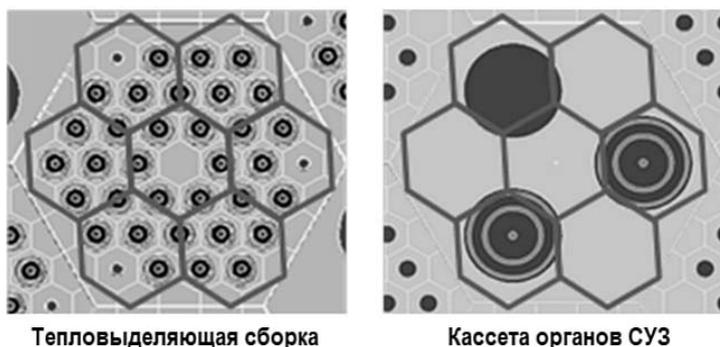


Рис. 5. Моделирование ТВС и кассеты СУЗ при семиточечной схеме расчета (95x46)

В [1] рассматриваются следующие тесты:

- «FC» – загрузка активной зоны;
- «CR» – определение критического положения органов СУЗ;
- «SC» – определение реактивности, вносимой стержнями, при аварийном останове;
- «TC» – расчет температурного коэффициента реактивности.

НАЧАЛЬНАЯ КРИТИЧНОСТЬ. ТЕСТ «FC»

В рамках данного теста рассчитаны значения $k_{эфф.}$ и реактивности для различного количества загруженных топливных колонн. Колонны загружаются в порядке, указанном на рис. 4.

В таблице 2 приведены значения $k_{эфф.}$, полученные по коду DYNCO, для различного количества загруженных топливных колонн. Эти значения сравнивались с экспериментальными данными и значениями $k_{эфф.}$, полученными по другим кодам [1].

Таблица 2

Значения $K_{эф.}$, полученные для различной загрузки а.з.

Количество загруженных топливных колонн	Эксперимен- тальные значения	Используемый код			
		MVP (Япония)	CRONOS2 (Франция)	CITATION (Германия)	DYNCO (Россия)
9	0.9282	–	0.99700	0.94080	0.91587
12	0.9481	0.95960	1.01840	0.96420	0.94379
16	0.9701	0.98461	1.03830	0.98660	0.97229
18	0.9913	1.00609	1.05800	1.00800	0.99576
19	1.0152	1.01626	1.07450	1.02630	1.01776
21	1.0417	1.04827	–	1.05560	1.05232
24	1.0834	1.09968	1.13990	1.09440	1.09685
27	1.1198	1.13399	–	1.12610	1.13054
30	1.1346	1.14278	1.16980	1.13360	1.14012

На рисунке 6 приведена зависимость внесенной реактивности от количества загруженных топливных колонн, полученная на основании табл. 2.

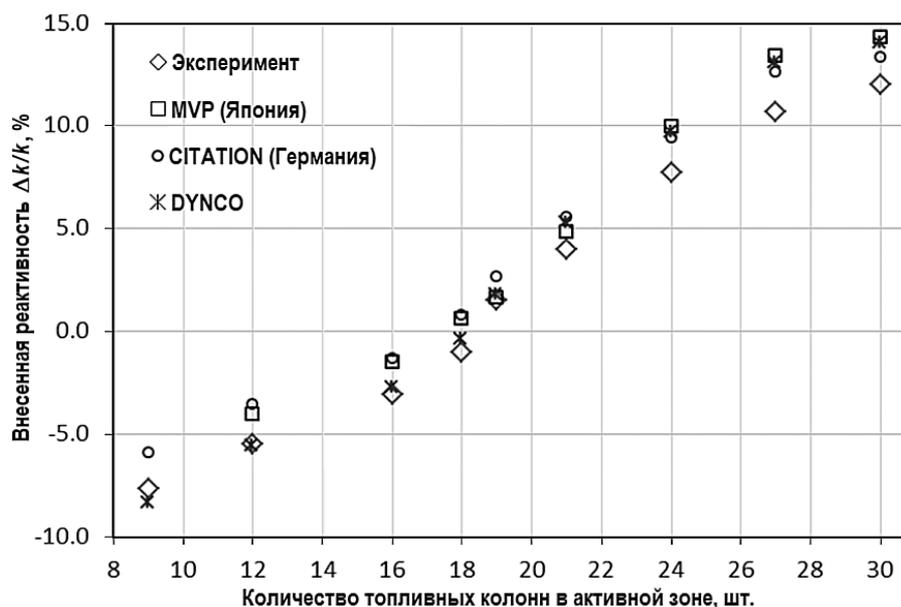


Рис. 6. Внесенная реактивность

По результатам теста можно сделать вывод о том, что код DYNCO дает результаты, близкие к экспериментальным значениям. Максимальное расхождение значений реактивности с экспериментом составляет 1,33% $\Delta k/k$ для девяти топливных колонн.

ПОЛОЖЕНИЕ ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ В КРИТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ. ТЕСТ «CR»

Глубина погружения органов регулирования в критическом состоянии расчи-

тана для различного количества топливных колонн (24 и 30). В этом тесте группа стержней R3 находится на верхних концевиках, а группы C, R1 и R2 находятся в одинаковом положении, при котором реактор будет в критическом состоянии ($k_{эфф.} = 1,0$).

В таблице 3 приведены критические положения поглощающих стержней от низа активной зоны, полученные по разным расчетным кодам.

Таблица 3

Критическое положение органов СУЗ, мм

Количество загруженных топливных колонн	Экспериментальные значения	Используемый код			
		Япония		Россия	
		CITATION-1000V	MVP	JAR	DYNCO
18	–	2900	2810	2710	–
24	2215	2055	2080	1960	2173
30	1775	1665	1800	1660	1759

По коду DYNCO отклонение от экспериментальных значений не превышает 2%.

РЕАКТИВНОСТЬ ПРИ АВАРИЙНОМ ОСТАНОВЕ. ТЕСТ «SC»

Реактивность, внесенная стержнями органов СУЗ при аварийном останове, рассчитывалась для двух случаев:

- поглощающие стержни отражателя (R2 и R3) находятся на нижних концевиках, а стержни групп C и R1 – в критическом положении;
- все группы стержней (C, R1, R2, R3) находятся на нижних концевиках.

Тест проводился при полной загрузке активной зоны (30 топливных колонн).

В таблице 4 приведены значения внесенной реактивности.

Таблица 4

Внесенная реактивность при аварийном останове реактора, %Δk/k

№ теста	Экспериментальные значения	Используемый код						
		Япония	Франция		Россия			
		CITATION-1000V	CRONOS2	TRIPOLI4	JAR (ОКБМ)	MCU (ИБРАЭ)	MCNP (РНЦ КИ)	DYNCO (МС)
1	12.10	8.94	10.83	8.56	8.43	9.61	9.55	10,79
2	46.30	44.60	56.31	46.32	52.37	40.40	50.81	42,40

В тесте «SC» имеются значительные расхождения с экспериментом для всех расчетных кодов, однако результаты, полученные по коду DYNCO, являются одними из лучших (погрешность не превышает 13%).

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РЕАКТИВНОСТИ. ТЕСТ «ТС»

Температурные коэффициенты реактивности для полностью загруженной активной зоны (30 топливных колонн) рассчитываются по значениям эффективного коэффициента размножения нейтронов.

Значения $k_{эфф.}$ получены для средних температур по активной зоне: 300, 320, 340, 380, 420К, 460, 480 К.

Органы регулирования групп C, R1 и R2 находятся в критическом положении,

группа R3 – на верхних концевиках. Положение органов регулирования при всех температурах не меняется.

В таблице 5 приведены значения температурных коэффициентов реактивности, вычисленных по соответствующим значениям $k_{эфф.}$

Таблица 5

Значения ТКР для различных температур а.з., $10^{-4}Dk/k/K$

Температурный диапазон, К	Используемый код						
	Япония		Франция	Россия			
	CITATION-1000V	MVP	CRONOS2	JAR (ОКБМ)	MCU (ИБРАЭ)	MCNP (РНЦ КИ)	DYNCO (МС)
300–320	-1.15	–	–	–	–	–	-1.88
320–340	-1.23	–	–	–	–	–	-1.80
340–380	-1.32	-1.66	-1.61	-2.20	-1.73	-1.73	-1.70
380–420	-1.33	-1.63	-1.62	-1.98	-1.65	-0.88	-1.70
420–460	-1.34	-1.56	-1.64	-1.82	-1.77	-1.77	-1.70
460–480	-2.78	-0.91	-1.56	-1.81	-1.48	-1.29	-1.61

По результатам теста «ТС» можно сказать, что значения, полученные по DYNCO, сопоставимы с результатами, полученными с помощью других кодов для всех значений температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена серия тестов по загрузке активной зоны и оценке эффективности органов регулирования. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что код DYNCO дает сопоставимые с экспериментальными данными значения.

Отклонения в тестах по топливной загрузке и расчетах критического положения органов регулирования не превышают 2%.

Тест «SC» показал одну из наиболее важных нейтронно-физических проблем для высокотемпературных реакторов – оценка эффективности органов регулирования.

Литература

1. IAEA / Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10, IAEA-TECDOC-138, 2003.
2. Askew J.R. A General Description of the Lattice Code WIMS / J.R. Askew, F.J. Fayers, P.B. Kemshell // JBNES, 1966.
3. WIMS-D library update: final report of a coordinated research project. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007.
4. Нейтронно-физический расчет активной зоны реактора ВТГР с целью верификации кода DYNCO // SSL-DYNCO-HTGR-R1.

Поступила в редакцию 24.01.2013

УДК 621.039.58

Method to accounting reliability of human-machine systems in NPP to decision-making, and the results of its application to the example of Balakovo NPP | Yu. V. Volkov, A. V. Sobolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 6 pages, 3 tables, 3 illustrations. – References, 9 titles.

This paper presents the method to accounting reliability of equipment, personnel and facilities when making management decisions. The method based on comparative analysis of reliability particular study object with the average values for Russian NPP. Presents the results of using the method for chosen as an example, Balakovo NPP.

УДК 539.182+544.1+14+930.85

At the 100 years anniversary of Bohr atom model | V. V. Kharitonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 4 pages, 1 illustrations. – References, 4 titles.

First planetary atom model was finding by Boris N. Chicherin (1828–1904) in Russia. In 1888–1889 Chicherin described this model in scientific review «Zhurnal Russkogo Fiziko-Himicheskogo Obshchestva». At 25 years after Niels Bohr developed the *Bohr model of the atom*, in which he proposed that energy levels of electrons are discrete, and that they revolve in stable orbits around the atomic nucleus, but can jump from one energy level (or orbit) to another.

УДК 621.039.546

Behavior of E125 alloy under high-temperature oxidation | V. G. Asmolov, V. P. Smirnov, A. Yu. Leshchenko, I. V. Kuzmin, A. S. Pokrovsky, G. P. Kobylansky, D. V. Kharkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 5 illustrations. – References, 8 titles.

The paper presents methods and results of studies into oxidation of the non-irradiated alloy E125 at 700–1100° C in a steam-argon medium. A comparative analysis of the data on the corrosion behavior of the E110 alloy and foreign Zr-2.5% Nb alloys has been carried out. Significant differences in the kinetic oxidation of the E125 and E110 alloys at 900 – 1000 ° C are revealed.

УДК 621.039.51

Verification of DYNCO code in HTGR core simulating | M. V. Silin, A. V. Levchenko, O. A. Grigorieva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 tables, 6 illustrations. – References, 4 titles.

The paper is concerned with results of verification of DYNCO code in neutronic HTGR core simulating. This verification is based on international benchmark. It is indicated that used DYNCO code can be applied for high-temperature reactors calculations and obtained by DYNCO results describe neutron characteristics with good agreement.

УДК 629.76:629.78

On the experimental study of the converters of thermal energy into the parallel photon beam | A. V. Gulevich, O. F. Kukharchuk, N. I. Loginov, A. S. Mikheev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Schools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 3 tables, 8 illustrations. – References, 5 titles.

Present paper is a prolongation of the paper [1] devoted to the theoretical estimations of the direct conversion of thermal energy from the nuclear reactor into the energy of directional flow of infrared radiation. Experimental facilities constructed for the modeling of processes taking place in the systems concerned are described, and a certain part of results obtained is