

**Усовершенствованная методика моделирования нейтронно-физических полей в программном комплексе "РАДУГА-ЭУ"**

В институте "АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ" разработан и отлажен программный комплекс для полномасштабного моделирования динамики энергоблока АЭС с ВВЭР РАДУГА-ЭУ.

П/к РАДУГА-ЭУ позволяет моделировать совместную работу реакторной установки, турбоустановки, вспомогательных систем и оборудования /1/.

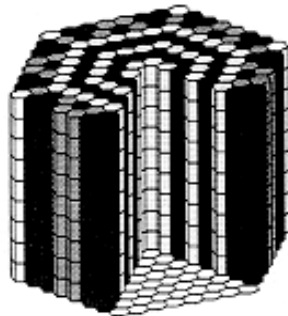


Рис. 1



Активная зона реактора типа ВВЭР моделируется в трехмерном двухгрупповом покассетном приближении. Программа позволяет моделировать в покассетном приближении полную зону как реактора ВВЭР-1000 (163 кассеты) так и полную зону реактора ВВЭР-440 (349 кассет).

Нейтронно-физический и теплогидравлический модуль п/к РАДУГА-ЭУ использовался при разработке международных нейтронно-физических тестов /2/.

Участие в создании международных тестов инициировало работу по повышению точности разностной схемы нейтронно-физического модуля программы. В дополнение к аттестованной ГАН РФ одноточечной в поперечном сечении кассеты нейтронно-физической модели активной зоны реактора /3/ была разработана семиточечная разностная схема и положена в основу п/к РАДУГА-7.

**Нейтронно-физическая модель п/к РАДУГА-7**

Используется семь расчетных узлов в поперечном сечении кассеты. Данный подход позволяет использовать все достоинства конечно-разностного метода при решении диффузионного уравнения в поперечном сечении кассеты. Расчетная схема представлена на рис. 2. Поскольку в пределах кассеты нейтронно-физические свойства среды однородны (в соответствии со способом подготовки нейтронно-физических сечений), существуют три различных по типу узла разностного уравнения:

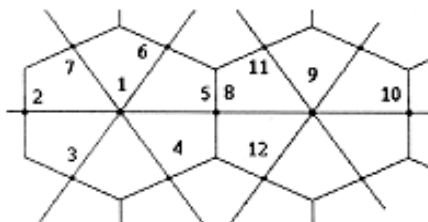


Рис. 2

существуют три различных по типу узла разностного уравнения:

- узел в центре кассеты (узел 1). Разностное уравнение в узле 1 аналогично уравнению для одноточечной разностной сетки. В отличие от одноточечной модели в данном приближении уравнение в узле 1 существенно проще, т.к. свойства среды в узлах 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 одинаковы;
- узел на границе с отражателем (узлы 2, 3, 7 в нашем примере). Уравнение в данном узле аналогично граничному условию для торцевого отражателя;
- узел на границе между кассетами (узлы 4, 5, 6).

Для упрощения выражений обозначим:

- источник нейтронов (как за счет деления, включая запаздывающие нейтроны, так и за счет увода из верхней группы), деленный на коэффициент диффузии как  $\hat{\Psi}$  ;  $\frac{1}{DV} \frac{dF}{dt}$  как  $\hat{VF}$  ;

увод нейтронов, деленный на коэффициент диффузии как  $\hat{\Sigma}$  ; оператор утечки по высоте зоны как  $\hat{B}_z$  .

В этом случае уравнение для расчетного узла в центре зоны примет вид:

$$F = \frac{\frac{2}{3}(F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7) + \hat{B}_z^2 * F + \hat{V}F + \hat{\Psi}}{\hat{B}_z^2 + \frac{4}{H^2} + \hat{\Sigma} + \hat{V}}$$

Для узлов на границе кассеты (как на границе с радиальным отражателем, так и на границе с другой кассетой) воспользуемся оператором Лапласа для цилиндрических координат:

$$\Delta F = \frac{d^2 F}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 F}{d\varphi^2}$$

где  $r = \Delta r = H/2$  (половина расстояния между центрами кассет);  
 $\Delta\varphi = \pi/3$ .

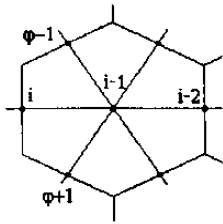


Рис. 3

Для границы с радиальным отражателем расчетная схема представлена на рис. 3. Разностное уравнение для узла на границе с радиальным отражателем будет иметь вид:

$$F_i = \frac{\hat{V}F + \hat{\Psi} + \hat{B}_z^2 F + \frac{F_{i-1} + F_{i-2} + F_{\varphi+1} + F_{\varphi-1}}{r^2} + \frac{\alpha_2}{D} \left( \frac{3}{2\Delta r} + \frac{1}{r} \right)}{\hat{V} + \hat{\Sigma} + \hat{B}_z^2 + \frac{\alpha_1}{D} \left( \frac{3}{2\Delta r} + \frac{1}{r} \right) + \frac{5}{4r^2} + \frac{2}{r^2 \Delta\varphi^2}}$$

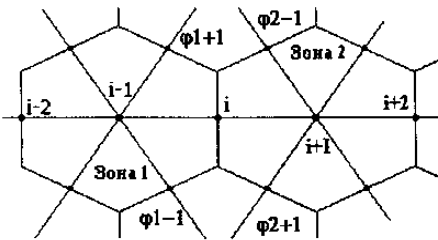


Рис. 4

Для границы между кассетами расчетная схема представлена на рис. 4. Произведя подстановку в разностное уравнение граничных условий сначала для левой, а затем для правой границы, и сложив полученные уравнения, получим окончательный вид разностного уравнения для узла на границе между кассетами:

$$\hat{V}_1 F + \hat{V}_2 F = \hat{\Psi}_1 + \hat{\Psi}_2 + \hat{B}_1^2 F + \hat{B}_2^2 F - (\hat{\Sigma}_1 + \hat{\Sigma}_2) F + \left( \frac{1}{\Delta r^2} - \frac{D_2}{2\Delta r D_1} \left( \frac{1}{r} + \frac{3}{2\Delta r} \right) \right) F_{i+2} + \left( \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{2D_2}{\Delta r D_1} \left( \frac{1}{r} + \frac{3}{2\Delta r} \right) \right) F_{i+1} + \left( \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{2D_1}{\Delta r D_2} \left( \frac{1}{r} + \frac{3}{2\Delta r} \right) \right) F_{i-1} + \left( \frac{1}{\Delta r^2} - \frac{D_1}{2\Delta r D_2} \left( \frac{1}{r} + \frac{3}{2\Delta r} \right) \right) F_{i-2} - \left( \frac{3}{2\Delta r} \left( \frac{1}{r} + \frac{3}{2\Delta r} \right) \left( \frac{D_2}{D_1} + \frac{D_1}{D_2} \right) + \frac{5}{2\Delta r^2} + \frac{4}{r^2 \Delta\varphi^2} \right) F_i + \frac{F_{\varphi1+1} + F_{\varphi1-1}}{r^2 \Delta\varphi^2} + \frac{F_{\varphi2+1} + F_{\varphi2-1}}{r^2 \Delta\varphi^2}$$

Индексы "1" и "2" относятся к нейтронно-физическим свойствам соответственно для кассет слева и справа от границы.

### Результаты верификации

В качестве примера в приложении приведен расчет теста с большим градиентом коэффициента диффузии по нескольким программам в сравнении с расчетом по мелкосеточной программе ЯР. Материалы по верификации п/к РАДУГА-5 опубликованы в [5]. Приведенный тест разработан П.А. Болобовым и впервые опубликован в [6].

Кроме того, приведен расчет теста, опубликованный в [2] и выполненный по программам КОРАТ-3D в составе комплекса ТЕНАР (ВНИИЭФ), DIF-3D (ANL), аттестованной версии РАДУГА-5 и п/к РАДУГА-7.

Результаты верификации семиточечной разностной схемы (п/к РАДУГА-7) показали, что ее точность приблизительно в четыре раза выше по сравнению с одноточечной п/к РАДУГА-5.

### *Литература:*

1. Modelling of NPP Dynamic Behaviour by Means of RAINBOW-EU Code /Kavun O.Yu., Kozlov O.S., Krushelnitski V.N., Taranov G.S. // Proceedings of Transients of the International Information Exchange Forum on "SAFETY ANALYSIS FOR NPPs OF VVER AND RBMK TYPE". V. III, P. 823-843. Obninsk, October 26-30, 1998.
2. Coupled Neutronic and Thermal-Hydraulic Code Benchmark Activities at the International Nuclear Safety Centre / Lev N. Podlazov, Rashit M. Shegaliev, Floyd E. Dunn, Oleg Y. Kavun, A.V. Krayushkin, James E. Cahalan, Alexander I. Popykin, Temitopie A. Taiwo, Hussein S. Khalil//Proceedings of International Conference of the Physics of Nuclear Science and Technology. October 5-8, 1998, Long Island, New-York.
3. Программный комплекс "РАДУГА" с библиотекой нейтронно-физических сечений серийного реактора ВВЭР-1000 для моделирования динамических процессов в водо-водяных реакторных установках с трехмерной двухгрупповой покассетной моделью активной зоны. / Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства №62., М., 1996 г.
5. О.Ю. Кавун, Г.С. Таранов. / "Математическая модель нейтронно-физического модуля программного комплекса "РАДУГА", //Сб. трудов семинара "НЕЙТРОНИКА-96", Обнинск, 1998 г. , -С. 14-38
6. П.А. Болобов, С.Н.Большагин. /Тестовые задачи для программ пространственного расчета энерговыделения реакторов ВВЭР // Материалы XVIII симпозиума специалистов ВМК по физике ВВЭР.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Тестовая задача со значительным градиентом  
коэффициента диффузии между кассетами и по  
длине ТВС

Исходные данные

Схема загрузки зоны

Номер ТВС		16						
Сорт топлива		1						
		13			14		15	
		1			1		1	
		8		9	10	11	12	
		1		3	1	1	1	
1	2	3	4	5	6	7		
2	3	1	1	1	1	1	1	1

Высота зоны - 0.5 м  
Шаг между центрами кассет - 0.185 м  
Длина экстраполяции:  
для радиального отражателя - 0.04 м  
для торцевого отражателя - 0.1073 м

Для задачи с неоднородной по высоте активной зоной 0.3 м активной зоны загружены в соответствии с картограммой загрузки, верхняя часть кассет ( 0.2 м ) состоит из кассет сорта 3

Нейтронно-физические характеристики кассет

Наименование	Сорт топлива			Размерн.
	1	2	3	
Кoeff. диффузии 1 группы	0.016328	0.019332	0.024577	м
Кoeff. диффузии 2 группы	0.004141	0.005136	0.007113	м
Сечение замедления	1.6704	1.1342	0.60822	1/м
Сечение увода из 1-ой гр.	2.49153	1.91717	1.33522	1/м
Сечение поглощения 2 гр.	5.5994	5.2380	4.69846	1/м
Сечение деления 1 группы	0.22221	0.21542	0.20413	1/м
Сечение деления 2 группы	3.5187	3.3794	3.1110	1/м
Источник нейтронов 1 гр.	0.54151	0.52325	0.49286	1/м
Источник нейтронов 2 гр.	8.5857	8.2457	7.5908	1/м

Представлены результаты расчета мощности кассет и распределения мощности по активной зоне, выполненные по программам SEZON (48, 12 и 3 расчетных узла в 1/6 части сечения кассеты), БИПР-7, БИПР-К и РАДУГА-5 и РАДУГА-7 в сравнении с мелкосеточным расчетом по программе ЯР (96 расчетных узлов в сечении кассеты).



Неоднородная по высоте зоны задача

	Кo	ΔКo %										
1. ЯР-96	0.930187	-										
2. S-48	0.930213	0.003										
3. S-12	0.930220	0.004										
4. S-3	0.930120	-0.007										
5. ВИПР-7	0.954084	2.569										
6. ВИПР-К	0.934589	0.473										
7. РАДУГА-5	0.927231	-0.318										
8. РАДУГА-7	0.929386	-0.080										
16												
0.541												
0.538 -0.6												
0.534 -1.3												
0.522 -3.5												
0.509 -5.9												
0.546 0.9												
0.536 -0.9												
0.535 -1.1												
13                      14                      15												
1.404                      1.160                      0.522												
1.400 -0.3 1.159 -0.1 0.519 -0.6												
1.394 -0.7 1.157 -0.3 0.515 -1.3												
1.378 -1.9 1.149 -0.9 0.504 -3.4												
1.551 10.5 1.124 -3.1 0.489 -6.3												
1.406 0.1 1.157 -0.3 0.527 1.0												
1.435 2.2 1.156 -0.3 0.516 -1.1												
1.402 -0.1 1.146 -1.2 0.517 -1.0												
8                      9                      10                      11                      12												
1.362                      0.990                      1.449                      1.097                      0.447												
1.358 -0.3 1.008 1.8 1.446 -0.2 1.095 -0.2 0.445 -0.4												
1.346 -1.2 1.034 4.4 1.443 -0.4 1.093 -0.4 0.441 -1.3												
1.321 -3.0 1.107 11.8 1.434 -1.0 1.085 -1.1 0.430 -3.8												
1.776 30.4 0.679-31.4 1.518 4.8 1.050 -4.3 0.414 -7.4												
1.366 0.3 0.989 -0.1 1.445 -0.3 1.094 -0.3 0.451 0.9												
1.451 6.5 0.903 -8.8 1.468 1.3 1.088 -0.8 0.437 -2.2												
1.395 2.4 1.011 2.1 1.441 -0.6 1.082 -1.4 0.443 -0.9												
1                      2                      3                      4                      5                      6                      7												
0.954                      0.880                      1.427                      1.504                      1.407                      0.885                      0.266												
0.953 -0.1 0.894 1.6 1.422 -0.4 1.500 -0.3 1.406 -0.1 0.882 -0.3 0.264 -0.8												
0.951 -0.3 0.913 3.8 1.415 -0.8 1.495 -0.6 1.406 -0.1 0.879 -0.7 0.261 -1.9												
0.949 -0.5 0.969 10.1 1.394 -2.3 1.481 -1.5 1.402 -0.4 0.869 -1.8 0.254 -4.5												
1.083 13.5 0.673-23.5 1.777 24.5 1.700 13.2 1.379 -2.0 0.835 -5.6 0.240 -9.8												
0.957 0.3 0.875 -0.6 1.431 0.3 1.501 -0.2 1.400 -0.5 0.886 0.1 0.272 2.3												
0.993 4.1 0.835 -5.1 1.511 5.9 1.549 3.0 1.408 0.1 0.876 -1.0 0.264 -0.8												
0.973 2.0 0.905 2.8 1.454 1.9 1.514 0.7 1.388 -1.4 0.870 -1.7 0.264 -0.8												

Максимальное отклонение мощности кассеты от мелкосеточного расчета: по программе "РАДУГА-5" в кассете № 9 и составляет 8.8%, по программе "РАДУГА-7" в кассете No 8 и составляет 2.4%

Сравнение распределения энерговыделения в ТВС с расчетом по программе ЯР-96

Кассета	Программа	Узел по высоте ТВС									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ЯР-96	.776	1.020	1.200	1.304	1.324	1.235	.888	.745	.601	.445
	РАДУГА-5	8.1	8.2	8.2	8.1	7.4	5.1	7.8	5.1	4.2	3.8
	РАДУГА-7	2.4	2.6	2.7	2.7	2.3	0.8	3.6	2.4	2.2	2.0
2	ЯР-96	.691	.907	1.063	1.149	1.157	1.080	.917	.769	.617	.455
	РАДУГА-5	-5.6	-5.5	-5.4	-5.0	-4.4	-3.3	0.5	2.0	2.9	3.3
	РАДУГА-7	3.6	3.7	3.8	3.7	3.6	2.8	2.3	2.1	2.1	2.0
3	ЯР-96	1.331	1.740	2.027	2.168	2.140	1.877	1.054	.822	.642	.468
	РАДУГА-5	10.0	10.1	10.0	9.6	8.7	5.2	12.2	7.9	6.1	5.3
	РАДУГА-7	3.2	3.3	3.3	3.0	2.4	-1.2	4.4	2.6	2.0	1.9
4	ЯР-96	1.459	1.900	2.198	2.326	2.263	1.943	1.061	.811	.625	.452
	РАДУГА-5	6.0	6.2	6.1	6.0	5.5	2.8	10.3	6.7	5.3	4.9
	РАДУГА-7	1.8	1.9	1.9	1.7	1.1	-2.5	3.5	1.7	1.3	1.1
5	ЯР-96	1.428	1.853	2.127	2.227	2.130	1.780	.933	.694	.525	.376
	РАДУГА-5	1.9	2.1	2.3	2.3	2.3	0.5	8.5	5.8	5.0	5.1
	РАДУГА-7	-0.7	-0.5	-0.5	-0.7	-1.2	-4.6	2.1	0.9	0.6	0.1
6	ЯР-96	.909	1.177	1.346	1.406	1.338	1.111	.578	.427	.322	.229
	РАДУГА-5	0.6	0.8	1.2	1.1	1.2	-0.5	7.6	5.4	4.7	4.8
	РАДУГА-7	-1.0	-0.8	-0.7	-1.0	-1.5	-4.9	2.1	0.7	0.3	0.9
7	ЯР-96	.274	.355	.406	.423	.402	.333	.173	.128	.096	.069
	РАДУГА-5	1.1	1.1	1.5	1.7	1.5	0.0	8.1	5.5	5.2	4.3
	РАДУГА-7	0.0	0.0	0.0	0.2	-0.5	-3.7	2.9	1.6	2.1	1.4
8	ЯР-96	1.250	1.636	1.910	2.049	2.034	1.801	1.028	.810	.637	.466
	РАДУГА-5	10.9	11.0	10.8	10.5	9.4	5.6	12.7	8.0	5.8	5.2
	РАДУГА-7	3.8	3.9	3.9	3.7	3.0	-0.7	4.8	2.8	2.0	1.9
9	ЯР-96	.829	1.083	1.258	1.343	1.328	1.207	.978	.797	.628	.458
	РАДУГА-5	-10.5	-10.3	-10.0	-9.6	-8.7	-7.2	-1.7	0.4	1.9	2.6
	РАДУГА-7	2.8	2.9	3.0	3.0	2.9	1.8	1.3	1.1	1.1	1.3
10	ЯР-96	1.440	1.871	2.156	2.268	2.186	1.851	.990	.746	.569	.410
	РАДУГА-5	3.7	4.0	4.0	4.0	3.8	1.5	9.2	6.2	5.1	4.6
	РАДУГА-7	0.3	0.5	0.4	0.3	-0.3	-3.7	2.6	1.2	0.9	0.7
11	ЯР-96	1.122	1.455	1.667	1.741	1.660	1.381	.721	.534	.403	.288
	РАДУГА-5	0.9	1.1	1.3	1.4	1.4	-0.2	7.8	5.4	4.5	4.5
	РАДУГА-7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.8	-1.2	-4.6	2.1	0.7	0.5	0.7
12	ЯР-96	.461	.597	.683	.712	.677	.561	.292	.216	.162	.116
	РАДУГА-5	-0.9	-0.7	-0.3	-0.3	-0.1	-1.8	6.2	3.7	3.1	3.4
	РАДУГА-7	-0.7	-0.3	-0.4	-0.6	-1.0	-4.3	2.4	0.9	1.2	0.9
13	ЯР-96	1.374	1.787	2.063	2.178	2.112	1.806	.982	.749	.575	.416
	РАДУГА-5	4.9	5.1	5.2	5.2	4.7	2.2	9.8	6.1	4.9	4.3
	РАДУГА-7	0.7	0.9	0.9	0.7	0.1	-3.3	3.0	1.3	1.0	0.7
14	ЯР-96	1.181	1.531	1.757	1.838	1.756	1.466	.767	.570	.430	.308
	РАДУГА-5	1.4	1.6	1.8	1.9	1.9	0.1	8.1	5.4	4.9	4.9
	РАДУГА-7	-0.6	-0.4	-0.4	-0.6	-1.1	-4.5	2.2	0.9	0.9	1.0
15	ЯР-96	.536	.695	.796	.830	.790	.656	.341	.252	.190	.136
	РАДУГА-5	0.4	0.6	0.8	1.0	0.9	-0.8	7.3	5.2	4.2	4.4
	РАДУГА-7	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-1.0	-4.3	2.6	1.6	1.1	0.7
16	ЯР-96	.555	.718	.823	.859	.818	.679	.354	.262	.197	.141
	РАДУГА-5	0.7	1.3	1.3	1.4	1.3	-0.1	7.6	5.3	4.6	4.3
	РАДУГА-7	-0.4	-0.1	-0.2	-0.4	-0.9	-4.1	2.5	1.1	1.5	1.4

Максимальное отклонение мощности от мелкосеточного расчета: по программе "РАДУГА-5" в кассете №8 в узле по высоте №7 составляет 12.7%, по программе "РАДУГА-7" в кассете No 6 в узле по высоте №6 составляет -4.9%.

Расчет теста, опубликованного в /2/ по программам ВНИИЭФ, ANL, аттестованной версии РАДУГА-5 и РАДУГА-7. Погрешность указана в % по отношению к программе КОРАТ-3D (ВНИИЭФ).

**Стационарное энергораспределение перед выбросом группы СУЗ**

						18		19	
ВНИИЭФ						0.5710	-	0.5178	-
ANL						0.5370	-6.3	0.5360	3.6
РАДУГА-5						0.4337	-31.	0.4820	-7.4
РАДУГА-7						0.5509	-3.6	0.5363	3.6
						14		15	
						0.9390	-	0.8175	-
						0.9310	-0.9	0.8270	-1.1
						0.9254	-1.5	0.8049	-1.6
						0.9326	-0.7	0.8130	-0.5
						16		17	
						0.7736	-	0.7150	-
						0.7990	3.3	0.7330	2.5
						0.7318	-5.7	0.6495	-10.
						0.7655	-1.1	0.7318	2.3
						8		9	
						1.5924	-	1.1195	-
						1.5330	-3.9	1.1120	-0.7
						1.7100	7.3	1.1451	2.2
						1.6202	1.7	1.1052	-1.3
						10		11	
						1.0424	-	1.3859	-
						1.0420	0.0	1.3620	-1.8
						1.0452	0.3	1.4161	2.2
						1.0280	-1.4	1.3993	1.0
						12		13	
						1.2731	-	0.6441	-
						1.2790	0.5	0.6650	3.2
						1.2863	1.0	0.6286	-2.5
						1.2766	0.3	0.6620	2.8
						1		2	
						1.1545	-	1.2210	-
						1.1290	-2.3	1.2050	-1.3
						1.1620	0.6	1.2547	2.8
						1.1498	-0.4	1.2100	-1.0
						3		4	
						1.2225	-	1.4507	-
						1.2160	-0.5	1.4000	-3.6
						1.2632	3.3	1.5393	6.1
						1.2082	-1.2	1.4561	0.4
						5		6	
						1.1368	-	1.1556	-
						1.1420	0.5	1.1760	1.8
						1.1299	-0.6	1.1308	-2.2
						1.1174	-1.7	1.1286	-2.4
						7			
						1.1091	-	1.1280	1.7
						1.2070	8.8		
						1.1155	0.6		

Максимальное отклонение по всем программам наблюдается в кассете №18 с погруженным органом СУЗ и составляет: программе РАДУГА-5 -- -31%, DIF3D (ANL) - -6.3%, РАДУГА-7 - -3.6%.

**Расчет выброса группы СУЗ**

Сравнение приведено с расчетом по программе КОРАТ-3D в составе комплекса ТЕНАР (ВНИИЭФ).

**Relative power variation with time**

