

ISSN 0205—4671

РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
“КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ”

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ:

Физика ядерных реакторов

ВЫПУСК

4

2009

РОССИЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР “КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ”

**В О П Р О С Ы
А Т О М Н О Й
Н А У К И
И
Т Е Х Н И К И**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

СЕРИЯ:

Ф И З И К А Я Д Е Р Н Ы Х Р Е А К Т О Р О В

ИЗДАЕТСЯ С 1989 г.

ВЫПУСК 4

**ДИНАМИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

ИЗДАЕТСЯ С 1971 г.

МОСКВА – 2009

Сборник “Вопросы атомной науки и техники” (ВАНТ) включен в Перечень ведущих изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК). Подписные индексы ОАО Агентство “Роспечать”: 66675 в каталоге “Издания органов научно-технической информации” и 32067 с 2010 г. в каталоге “Газеты. Журналы”.

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. При перепечатке и цитировании ссылка на сборник ВАНТ обязательна. Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции.

Редакционная коллегия серии :

главный редактор – Ю.М. Семченков;

заместители главного редактора – С.М. Зарицкий, В.Ф. Колесов, А.Е. Крошили, В.В. Пчелин;

ответственный секретарь – Е.А. Старостина;

члены редколлегии – П.Н. Алексеев, Е.В. Бурлаков, А.Ю. Гагаринский,

М.П. Лизоркин, В.Д. Павлов, Я.И. Штромбах.

В выпусках “Динамика и безопасность ядерных энергетических установок” публикуются материалы по следующим вопросам:

- математическое моделирование динамических процессов в ЯЭУ и их элементах;
- результаты экспериментов по устойчивости стационарных процессов и обоснованию математических моделей ЯЭУ;
- расчетные исследования управления, переходных и аварийных процессов;
- расчетные исследования устойчивости стационарных режимов ЯЭУ;
- диагностика систем и оборудования ЯЭУ;
- описания и аннотации программ расчетов динамики и экспериментальных исследований;
- расчетно-теоретическое обоснование работоспособности и ресурса оборудования ЯЭУ.

Материалы для опубликования следует направлять в Российский научный центр “Курчатовский институт” на имя главного редактора серии.

The issues of “Dynamics and Safety of Nuclear Power Plants” contain information on the following subjects:

- mathematical simulation of dynamic processes in NPP and their components;
- experimental results on the stability of stationary processes and substantiation of mathematical models of the NPP dynamics;
- computational analysis of controlling the transient and emergency processes;
- computational analysis of stability of NPP's stationary modes;
- diagnostics of NPP's equipment and systems;
- description and summaries of programs for dynamic analysis and experimental studies;
- computational and theoretical substantiation of serviceability and resource of the NPP equipment.

Основные результаты исследования взаимодействия расплава корнума и стали в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии в проекте МАСКА

В.Г. Асмолов, В.Н. Загрязкин, Д.Ф. Цуриков,

РНЦ "Курчатовский институт", 123182, Москва, пл. Курчатова, 1,

В.Ю. Вишнеvский, Е.К. Дьяков, А.Ю. Котов, В.М. Репников,

НИИ НПО "Луч", 142100, г. Подольск Московской обл., ул. Железнодорожная, 24

Поступила в редакцию 05.05.2009 г.

Исследованы взаимодействия расплава корнума в корпусе реактора в случае тяжелой аварии на АЭС, выполненные по международной программе МАСКА. Представлены результаты взаимодействия оксидного расплава и железа (стали), распределение основных компонентов (U, Zr, O, Fe (нерж. сталь)) между оксидной и металлической фазами расплава, распределение малолетучих имитаторов продуктов деления между фазами стратифицированного бассейна расплава и влияние окислительной атмосферы на стратификацию расплава. Полученные результаты использованы для прогнозирования термодинамических свойств расплавов системы U-Zr-Fe-O.

Ключевые слова: тяжелая авария, расплавы корнума и стали, взаимодействие.

The Basic Study Results on the Interaction between Corium Melt and Steel in the VVER-1000 Reactor Vessel during a Severe Accident Obtained under the OECD "MASCA" Project. *V.G. Asmolov, V.N. Zagryazkin, D.F. Tsurikov, RRC "Kurchatov Institute", 1, Kurchatov Sq., Moscow, 123182, V.Yu. Vishnevsky, Ye.K. D'yakov, A.Yu. Kotov, V.M. Repnikov, SRI SIA "Lutch", 24, Zheleznodorozhnaya St., Podolsk, Moscow Region, 142100.* The paper discusses studies on the interaction of corium melt in case of a severe accident at an NPP performed under the international MASCA program. The results are presented on the interaction between oxide melt and iron (stainless steel), on the partitioning of basic components (U, Zr, O, Fe (stainless steel)) between the melt oxidic and metallic phases, on the partitioning of low-volatile simulators of fission products between phases of the stratified melt pool, and on the impact of the oxidizing atmosphere on the melt stratification. The obtained results have been used to predict thermodynamic properties of the system U-Zr-Fe-O melts.

Key Words: Severe Accident, Corium and Steel Melts, Interaction.

Введение

В двадцать первом веке неизбежен значительный рост мирового энергопотребления, особенно в развивающихся странах. Даже при очень низких темпах этого процесса, зависящего от развития мировой экономики, роста населения и стремления к более справедливому и равномерному распределению энергии по регионам мира, глобальное энергопотребление практически удвоится к середине века.

В настоящее время проблема состоит не только в том, чтобы преодолеть совокупные ресурсные ограничения, но и в том, чтобы выработать национальные и мировую стратегии развития энергетики, которые обеспечили бы устойчивость систем энергоснабжения и гибкость их реакции на непрерывные изменения технологической,

политической и экономической обстановки. Из существующих технологических возможностей в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяет атомная энергетика вследствие доступности генерирующих мощностей и высокого уровня ее независимости от региона добычи топлива [1, 2].

Однако востребованность атомной энергетики зависит от готовности разработчиков объектов атомной энергетики предъявить обществу аргументы, подтверждающие гарантированное обеспечение безопасности всех звеньев ядерно-энергетического комплекса, экономическую эффективность и превосходство по фактору экологической привлекательности других энерготехнологий.

Обеспечение гарантированной безопасности будет достигнуто путем разработки инженерных и организационных средств

обеспечения мероприятий, направленных на предотвращение аварий, ограничения их радиологических последствий, обеспечения “практической невозможности” аварии с большими радиологическими последствиями. Термин “практическая невозможность” означает, что вероятность таких событий ниже значений 10^{-7} на один год эксплуатации энергоблока.

К настоящему времени в России, как и во всех странах, использующих ядерную энергетику или планирующих ее развитие, принята единая концепция безопасности, основанная на многолетнем мировом опыте разработки, строительства и эксплуатации объектов атомной энергетики и учитывающая уроки прошедших тяжелых аварий на АЭС “Три-Майл-Айленд” и Чернобыльской АЭС.

Эта концепция безопасности реализована в документах МАГАТЭ и российских нормативно-технических документах. Она включает, в частности, в процесс разработки проекта АЭС анализ не только проектных аварий, в которых за счет действия предусмотренных в проекте систем не нарушается целостность активной зоны и не происходит ее тяжелое повреждение, но и аварий с нарушением проектных пределов, которые могут приводить к тяжелым повреждениям активной зоны вплоть до расплавления топлива и разрушения активной зоны. Вероятность такой аварии менее 10^{-6} на реактор в год [3]. Наиболее вероятной и естественной представляется следующая последовательность развития такой аварии:

- 1) потеря эффективного охлаждения активной зоны реактора;
- 2) плавление активной зоны, перемещение расплава на днище корпуса и образование бассейна расплава;
- 3) выход расплава за пределы корпуса реактора;
- 4) повреждение защитной оболочки и выход продуктов деления за ее пределы.

Такие категории аварий требуют специальных систем безопасности и мер по управлению такой аварией, разрабатываемых на основе знаний о процессах и явлениях, сопровождающих тяжелую аварию. В течение последних двенадцати лет РНЦ “Кур-

чатовский институт” был головным исполнителем в рамках международных проектов РАСПЛАВ (1994-2000 гг.) и МАСКА (2000-2006 гг.) по исследованию явлений и процессов, происходящих в бассейне расплава активной зоны легководного реактора в случае тяжелой аварии на АЭС.

В работе по проекту принимали участие 17 стран Европы, Америки, Азии и Россия под эгидой агентства по ядерной энергии ОЭСР. РНЦ “Курчатовский институт” проводил исследования в сотрудничестве с рядом крупных научных институтов и производственных объединений Минатома и РАН.

Главная цель Проекта – исследование процессов, проходящих на той стадии тяжелой аварии, когда после расплавления активной зоны и стекания ее в нижнюю часть корпуса на днище образуется бассейн расплава. Такой сценарий реализовался во время аварии на ТМІ-2 в 1979 г. Во время этой аварии расплав материалов активной зоны переместился на днище корпуса, разрушение которого предотвращено подачей дополнительной воды в реактор, что способствовало охлаждению бассейна расплава. Поэтому возможность охлаждения расплава на днище корпуса является одним из важнейших вопросов при разработке процедур управления авариями. Сохранение целостности корпуса реактора в случае такой аварии поможет предотвратить выброс радиоактивных материалов в окружающую среду.

Поиск мер по предотвращению расплавления корпуса реактора в условиях тяжелой аварии требует понимания теплогидравлических и физико-химических явлений и процессов в бассейне расплава активной зоны. Многокомпонентность расплава, недостаточность накопленной базы данных и расчетных методов поставили на первый план необходимость проведения экспериментов с прототипными композициями активных зон легководных реакторов, включающими уран, цирконий, стальные компоненты внутриреакторных конструкций и имитаторы продуктов деления, а также другие материалы, находящиеся в энергетических реакторах, например, материалы орга-

нов регулирования и выгорающих поглотителей.

Исследования, выполненные в рамках проекта РАСПЛАВ на реальных материалах, продемонстрировали, что поведение гомогенного расплава кориума сравнимо с поведением материалов-имитаторов при естественной циркуляции. Показано, что такое поведение ожидаемо, если бассейн расплава содержит оксидные материалы [4]. Исследовались кориумы с различной степенью *C-n* окисленности циркония. Измерены тепло- и электропроводность, кинематическая вязкость, поверхностное натяжение и плотность ряда расплавленных кориумов [5...10]. Полученные результаты показали, что поведение бассейна расплава и свойства расплавов в системе U-Zr-O зависят от атомного отношения U/Zr и степени *C-n* окисленности циркония.

Основные эксперименты в проекте МАСКА концентрировались на детальном исследовании физико-химического поведения кориума в контакте с конструкционными внутрикорпусными материалами и включали в себя исследования:

- взаимодействия оксидного расплава и железа (стали);
- влияния материалов регулирующих стержней на взаимодействие оксидного расплава с железом (сталью);
- распределения малолетучих имитаторов продуктов деления между фазами стратифицированного бассейна расплава;
- влияния окислительной атмосферы на стратификацию расплава и распределения основных компонентов (U, Zr, O, Fe(нерж. сталь)) между оксидной и металлической фазами расплава.

Все эксперименты проводились на индукционной установке по технологии холодного тигля [11...16]. В качестве исходных материалов для получения оксидных расплавов применялись оксиды урана и циркония и гидрид циркония. Спектральный анализ показал, что чистота исходных материалов составляла, %% по массе, не менее: 99,95 для UO₂, 99,83 для ZrO₂ и 99,5 для ZrH₂. Кислородный коэффициент оксида урана был равен $2,126 \pm 0,005$. Для исключения подкисления металлического

циркония использовался его гидрид в количестве, эквивалентном требуемому количеству металла.

Исходные материалы в виде порошков тщательно перемешивались, прессовались и спекались в печах с металлическими нагревателями в атмосфере очищенного аргона в защитных контейнерах из тантала при $\sim 1\ 900\ ^\circ\text{C}$ в течение часа. Изготавливались диски диаметром 30...31, высотой $h \sim 13$ мм и кольца с наружным диаметром 30...31, внутренним диаметром ~ 17 мм, высотой $h \sim 13$ мм. Проводились химический и рентгеноструктурный анализы полученных образцов.

1. Основные результаты изучения процесса взаимодействия расплава кориума и стали в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии в проекте МАСКА

1.1. Взаимодействие расплава оксидного кориума и стали.

В условиях отсутствия надежной термодинамической информации для системы U-Zr-O-Fe целью экспериментов ставилось выяснение особенностей взаимодействия расплавов кориума и железа в зависимости от времени, степени окисленности кориума и соотношения масс кориума и железа. Составы образцов, использованных в экспериментах, приведены в табл. 1.

С целью повышения относительной точности определения кислорода в оксидной и металлической фазах вместо нержавеющей стали применялись достаточно чистое железо, %% по массе: C – 0,02, Si – 0,023, Mn – 0,015, S – 0,02, остальное Fe и специальная коррозионно-стойкая сталь марки X20H10ГТ, основными примесями которой являются, %% по массе: Mo – 0,19, W – 0,03, Nb – 0,03, Ni – 10,43, Mn – 0,74, Cr – 20,37, V – 0,14, Ti – 0,57, остальное Fe.

Концентрации кислорода во всех случаях определялись по разности до 100 %. Начальные эксперименты выполнялись при малых ($\sim 0,02$) отношениях масс Fe и кориума, что должно обеспечить достижение более полного равновесия между оксидным и металлическим расплавами. Максималь-

Таблица 1. Результаты химических анализов приготовленных составов кориумов

Тип кориума	U/Zr	Шифр пробы	Химический состав, масс.%			
			U	Zr	Zr _{своб}	C
C-32	1,2	B867	66,18	22,13	14,74	0,006
C-32	1,2	B885	66,3	21,95	14,78	0,008
C-32	1,2	B927	65,9	22,2	14,95	0,005
C-32	1,2	B1003	66,71	21,78	14,84	0,003
C-32	1,2	B1144	66,63	21,84	14,88	0,009
C-32	0,9	B1146	63,06	25,82	17,73	0,007
C-50	1,2	B870	65,8	21,11	10,46	0,007
C-70	1,2	B882	65,05	20,95	6,15	0,006
C-70	1,2	B1065	65,10	21,10	6,22	0,006
C-100	1,6	B861	68,73	16,34	—	0,006

ное отношение $K_1 = m_{Fe}/m_{оксид}$, достигнутое в экспериментах серии STFM-Fe в программе МАСКА, не превышало величины 0,33.

Экспериментально установлено, что в результате взаимодействия образуется стратифицированная структура расплава, состоящая из металлической фазы на основе железа и оксидного кориума. В экспериментах, проведенных с использованием недоокисленного кориума (C-32, C-50, C-70), в результате взаимодействия расплавленное железо насыщается ураном, цирконием и кислородом. Его плотность становится больше плотности расплавленных кориумов, что приводит к перемещению металлической фазы на дно бассейна.

По результатам химического анализа металлическая фаза содержит до 20 ат.% кислорода в зависимости от начальной степени окисленности кориума. Очевидно, что в условиях проведенных экспериментов этот кислород вместе с U и Zr переходит из расплавленного кориума в расплавленное Fe. После отключения высокочастотного генератора в процессе кристаллизации происходит распад однородного металлического расплава на фазовые составляющие.

Рентгеноструктурным анализом в составе металлической части слитка установлено присутствие твердых растворов (U, Zr)O₂ и интерметаллидов типа (U, Zr)Fe₂. В отличие от экспериментов, проведенных с недоокисленными кориумами, в эксперименте STFM-Fe № 8 применялся кориум C-100 с цирконием, полностью окисленным до оксида ZrO₂. В этом эксперименте взаимодействие расплавленных фаз носило ми-

нимальный характер. Металлическая фаза на основе практически чистого железа, имея меньшую плотность, располагалась на поверхности оксидного кориума. В составе металлической фазы после кристаллизации обнаружены следы интерметаллида (U, Zr)Fe₂. Основные результаты, полученные в проекте МАСКА по взаимодействию расплавов оксидных кориумов и железа (стали), приведены в табл. 2.

Если оценивать взаимодействие расплавов кориума и стали через установившиеся концентрации атомов U и Zr в металлической фазе, то можно заметить, что при одинаковой начальной массе Fe интенсивность взаимодействия падает по мере увеличения C-п. В экспериментах STFM-Fe №№ 2, 6...8 использовались исходные брикеты кориума с различной степенью окисления C-32, C-50, C-70 и C-100, соответственно, с отношением $K_1 = m_{Fe}/m_{оксид} \approx 0,02$. Эксперименты проводились с выдержкой $\tau \approx 10$ мин в температурном интервале 2 500...2 650 °С. На рис. 1 представлены концентрации U и Zr в металлической части слитка в зависимости от начальной степени окисления расплавленного кориума.

Обращает на себя внимание зависимость массы образующейся металлической фазы от начальной массы вводимого металла. Так, в табл. 3 воспроизведены результаты, отражающие связь отношения масс равновесных оксидной и металлической фаз $K_2 = m_{мет.фаза}/m_{оксид.фаза}$, образующихся при взаимодействии Fe с расплавом оксидного кориума (C-32, U/Zr = 1,2), с начальным отношением $K_1 = m_{Fe}/m_{оксид}$.

Таблица 2. Составы равновесных оксидной и металлической фаз по результатам экспериментов серии STFM-Fe

Эксперимент	Шифр расплава	Масса, г		Температура, °C	Масса фазы, г		Состав фазы, ат.%									
		расплава	Fe		оксидная	металлическая	Оксидная					Металлическая				
							U	Zr	Fe	C	O	U	Zr	Fe	C	O
2	B867	276,2	5,3	2 500	262,7	18,8	21,37	18,00	0,72	—	59,91	23,26	22,18	36,05	—	18,51
3	B867	301,3	5,3	2 500	287,3	19,3	21,762	18,97	1,36	—	57,91	28,32	25,27	23,31	—	17,30
5	B867	322,7	5,2	2 500	312,5	15,4	21,34	19,52	0,80	—	58,34	23,90	25,65	28,05	—	22,40
4	B885	314,8	15	2 500	275,6	54,2	20,59	19,25	0,45	—	59,71	21,50	20,38	42,86	—	15,26
9	B927	263,3	29,3	2 500	200,0	92,6	19,473	17,159	1,498	—	61,87	20,43	19,70	44,10	—	15,76
14	B927	265,2	48,5	2 500	196,7	117	17,76	15,81	0,54	—	65,89	13,78	13,16	56,74	—	16,31
16	B1144	274,8	60,2	2 500	212	123	20,50	14,89	0,98	0,055	63,57	13,82	14,00	61,73	0,09	10,36
17	B1144	284,3	60,1	2 500	229,6	114,8	20,56	15,32	1,91	0,049	62,16	14,07	13,94	60,85	0,08	11,06
18	B1144	274,5	90	2 500	186,1	178,4	20,75	13,88	1,28	0,055	64,03	11,66	11,85	61,28	0,09	15,12
6	B870	298,7	5,3	2 550	285,8	18,2	21,22	17,55	0,53	—	60,69	23,16	21,61	36,10	—	19,12
7	B882	309,8	5,2	2 600	302,7	12,3	20,41	17,50	0,47	—	61,61	18,21	19,62	51,73	—	10,44
8	B861	285,9	6,05	2 650	285,9	5,45	20,61	13,08	<0,01	0,03	66,28	0,03	0,10	98,48	0,02	1,37
10	B882	289,6	15,1	2 600	280,9	23,8	19,62	16,74	0,51	—	63,13	12,61	7,16	69,77	—	10,47
20	B1065	287,7	60,7	2 600	282,6	65,8	19,63	15,55	1,08	0,05	63,69	6,76	7,37	77,50	0,07	8,29
19	B1146	283,2	3,2	2 500	273,9	12,5	20,985	21,939	0,825	0,046	56,205	22,036	27,451	19,759	0,140	30,614
21	B1146	274,6	15,2	2 500	230,6	59,2	19,75	20,15	1,20	0,06	58,83	21,90	24,36	31,55	0,13	22,05
22	B1146	267,3	28,4	2 500	189,2	106,5	19,38	18,16	1,20	0,056	61,20	19,67	24,11	42,28	0,12	13,81
23	B1146	300,7	1,5	2 500	293,4	8,8	22,29	24,32	0,81	0,06	52,52	25,48	28,57	6,56	0,09	39,27
24	B1146	268,3	75,2	2 500	172,2	171,3	19,31	17,24	1,40	0,06	61,99	12,01	15,22	56,24	0,09	16,43
15	B927	303,6	29,9	2 500	246,5	87	20,88	16,32	1,83*1	—	60,97	16,57	14,11	65,09*2	—	4,22

*Fe — 1,36; Cr — 0,11; Ni — 0,36; *2 Fe — 48,18; Cr — 4,28; Ni — 12,63

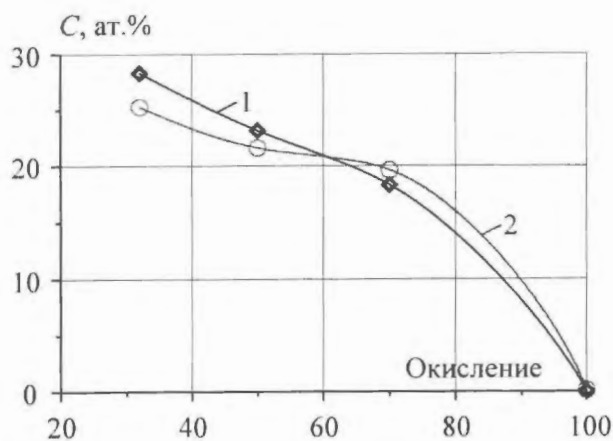


Рис. 1. Концентрации в металлической части слитка в зависимости от степени C - n окисления коруна: 1 – U, 2 – Zr

В графической форме зависимость K_2 от K_1 представлена на рис. 2. В аналитическом виде эта зависимость выглядит как

$$K_2 = 2,924K_1. \quad (1)$$

Сопоставление экспериментов №№ 9 и 15 показывает, что при переходе от железа к нержавеющей стали основные результаты взаимодействия сохраняются.

Таким образом, выполненные эксперименты серии STFM-Fe показали, что в температурной области 2 500...2 600 °С в результате взаимодействия недоокисленных кориумов C-32...C-70 ($U/Zr = 0,9...1,2$) с железом при отношении масс $m_{Fe}/m_{оксид} \leq 0,33$ образуются несмешивающиеся в расплавленном состоянии оксидная и металлическая фазы. Расплавленное железо насыщается ураном, цирконием и кислородом. Плотность металлической фазы становится больше плотности расплавленных кориумов, что приводит к ее перемещению на дно бассейна. Определены составы всех

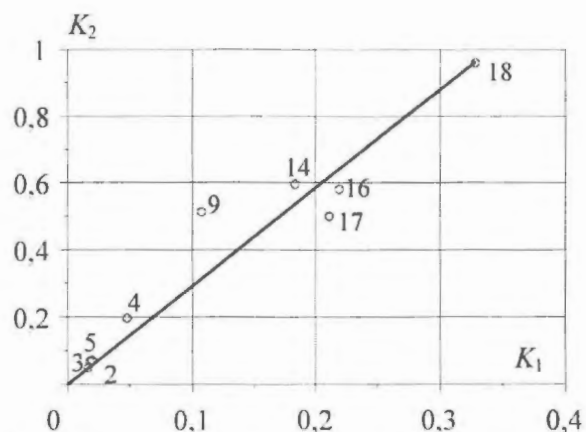


Рис. 2. Зависимость конечного отношения масс $m_{мет.фаза}/m_{оксид.фаза}$ от начального отношения $m_{Fe}/m_{оксид}$

сосуществующих оксидных и металлических фаз, что может служить основой для построения термодинамических моделей расплавов в системе U-Zr-O-Fe.

1.2. Исследование влияния V_4C на взаимодействие оксидного расплава и стали в корпусе ВВЭР-1000 при тяжелой аварии.

Основным источником V_4C в расплаве в корпусе ВВЭР-1000 служат поглощающие стержни системы управления и защиты, выполненные с частичным применением карбида бора. Общая масса V_4C в ВВЭР-1000 составляет около 260 кг, что соответствует 0,25 % по массе по отношению к массе активной зоны.

Ранее [17] при исследовании влияния углерода на поведение недоокисленного расплава типа C-32 показано, что в результате плавления и последующего затвердевания происходит его стратификация на два слоя при концентрации углерода в исход-

Т а б л и ц а 3. Начальные и конечные соотношения масс в экспериментах STFM-Fe

№ эксперимента STFM-Fe	Начальные параметры			Установившиеся параметры		
	m_{Fe} , Г	$m_{оксид}$, Г	K_1	$m_{мет.фаза}$, Г	$m_{оксид.фаза}$, Г	K_2
2	5,3	276,2	0,0192	262,7	18,8	0,0716
3	5,3	301,3	0,0176	19,3	287,3	0,0672
5	5,2	322,7	0,0161	15,4	312,5	0,0493
4	15	314,8	0,0476	54,2	275,6	0,197
9	29,3	273,3	0,1072	92,6	200,0	0,463
14	48,5	265,2	0,183	117,0	196,7	0,595
16	60,2	274,8	0,219	123,0	212,0	0,580
17	60,1	284,3	0,211	114,8	229,6	0,500
18	90	274,5	0,328	178,4	186,1	0,959

ном выше 0,2 % по массе. Природа стратификации, вероятно, связана с особенностями фазовых диаграмм системы $Zr(O)-UO_2$ [18, 19], отсутствием заметной растворимости углерода в оксидах UO_2 и ZrO_2 и их твердых растворах, а также высоким сродством циркония к углероду.

Известно, что цирконий имеет высокое сродство и к другим элементам внедрения (В, N), что, в частности, находит отражение при сравнении температуры плавления соответствующих стехиометрических соединений. Так, температура плавления ZrC , ZrB_2 , ZrN составляет 3 420, 3 245, 3 250 °С, соответственно [20]. Поэтому можно было ожидать существование аналогичных стратификационных проявлений в расплаве и в присутствии бора. При исследовании дополнительный интерес представляло выяснение возможности совместного влияния углерода и бора на процессы стратификации недоокисленного расплава, а также их распределение между оксидной и металлической фазами расплава активной зоны. Используемые в экспериментах серии STFM-B кориумы, составы которых приведены в табл. 4, дополнительно содержали по 0,5 масс.% карбида бора.

Эксперименты проводились в холодном тигле [21...23]. В его нижнюю часть устанавливались выбранный образец с карбидом бора, сверху на него соответствующие спеченные кольца без B_4C . Основные параметры и результаты выполненных экспериментов приведены в табл. 5.

Система $Zr(O)-UO_2-B_4C$ экспериментально ранее не исследовалась. Изучение взаимодействия B_4C-Zr [24] показало, что реакция начинается при температуре выше 1 250 °С и приводит к образованию ZrB_2 и ZrC . Выше 1 650 °С происходит быстрое ускорение кинетики взаимодействия, приводящее к оплавлению циркония. Взаимодействие окисленного $\alpha-Zr(O)$ с карбидом бора также ранее не исследовалось [25]. Поэтому экспериментам по изучению влияния карбида бора на стратификацию должно предшествовать исследование его поведения в контакте с недоокисленным кориумом в области температуры до полного расплавления всей системы. Образование лету-

чего оксида бора B_2O_3 , учитывая низкий химический потенциал кислорода в выбранном составе С-32, не ожидалось.

Спекание исходных прессованных заготовок проведено при трех разных режимах в интервале от 1 830 до 2 400 °С. Однако фазовый состав полученных образцов во всех случаях оказался одинаковым. В составе образцов появились оксикарбид и диборид циркония. Карбид бора как самостоятельная фаза не сохранился. Это свидетельствует о том, что взаимодействие B_4C с $\alpha-Zr(O)$, как и для циркония, начинается при температуре ниже 1 800 °С, что согласуется с данными работы [24].

В эксперименте STFM-B № 3 проверялось, влияют ли малые добавки карбида бора на взаимодействие недоокисленного расплава С-32 с железом, а также исследовалось распределение бора и углерода между оксидной и металлической фазами. Условия проведения эксперимента STFM-B № 3 максимально приближены к ранее проведенному эксперименту STFM-Fe № 3, в котором добавок карбида бора не было. Существенное различие состояло в том, что в эксперименте STFM-Fe № 3 температура составляла 2 500 °С, тогда как в эксперименте с карбидом бора STFM-B № 3 на 50 °С выше. Увеличение температуры эксперимента вызвано повышением температуры ликвидус спеченного образца С-32 + 0,5 % по массе B_4C в результате связывания части металлического циркония в оксикарбидную и диборидную фазы.

Сравнение результатов эксперимента STFM-B № 3 с результатами аналогичного эксперимента позволяет выделить, по крайней мере, три основных отличия в эксперименте с бором: бóльшую массу (примерно в 2,5) и объем (примерно в 2,8) металлического слитка, меньшую на ~ 1,5 г/см³ плотность металлического слитка, более сильное смещение состава оксидного расплава в направлении к составу С-100. Если в эксперименте STFM-Fe № 3 отношение массы образовавшегося металлического слитка (19,3 г) к массе введенного в расплав кориума железа (5,3 г) составляет величину 3,64, то аналогичное соотношение в эксперименте STFM-B № 3 равно 9,56.

Таблица 4. Состав приготовленных образцов с содержанием карбида бора 0,5 % по массе

Расплав	U/Zr	Шифр	Концентрация, % по массе				Фазовый состав и параметр решетки, нм	
			U	Zr	Zr _{своб}	C	B	Не определялись
C-32	1,2	B1006	66,71	21,78	14,84	0,003	—	Не определялись
C-32 + B ₄ C	1,2	B1007	65,96	22,16	—	0,11	0,42	Не определялись
C-32	1,2	B1194	66,52	21,92	14,80	0,008	—	(U, Zr)O ₂ (a = 0,5423) + α-Zr(O)
C-32 + B ₄ C	1,2	B1195	66,33	21,76	—	0,12	0,37	(U, Zr)O ₂ (a = 0,5431) + α-Zr(O) + ZrB ₂ + Zr(C, O)
C-32	0,9	B1196	63,12	25,74	17,83	0,007	—	(U, Zr)O ₂ (a = 0,5318) + α-Zr(O)
C-32 + B ₄ C	0,9	B1197	62,81	25,51	—	0,11	0,39	(U, Zr)O ₂ (a = 0,5429) + α-Zr(O) + ZrB ₂ + Zr(C, O)
C-70	1,2	B1213	64,98	21,16	6,30	0,005	—	(U, Zr)O ₂ (a = 0,5350) + α-Zr(O)
C-70 + B ₄ C	1,2	B1214	64,55	20,96	—	0,08	0,38	(U, Zr)O ₂ (a = 0,5490) + α-Zr(O) + ZrB ₂ + Zr(C, O)

Таблица 5. Результаты экспериментов серии STFM-B

№ эксперимента STFM-B	Шифр расплава	Масса, г		Температура, °C	Оксидная фаза		Металлическая фаза		Состав фазы, ат. %											
		расплава	Fe		масса, г	плотность, г/см ³	масса, г	плотность, г/см ³	Оксидная					Металлическая						
									U	Zr	Fe	B	C	O	U	Zr	Fe	B	C	O
3	B1007	240	5	2 550	197,2	9,37	47,8	9,43	22,37	14,20	0,13	0,89	0,49	61,92	20,68	27,51	12,09	10,84	2,17	26,69
4	B1195	240,4	15,1	2 550	196,8	9,3	58,7	9,47	21,59	15,99	0,52	0,84	0,28	60,77	16,88	21,05	26,08	9,15	1,65	25,19
5	B1195	251,4	30	2 550	196,5	9,28	84,9	10,07	21,32	16,28	1,62	0,56	0,16	60,06	16,38	17,57	49,08	4,91	1,81	10,25
7	B1214	307,8	5,1	2 600	295,8	9,0	17,1	8,41	19,06	15,39	0,40	0,58	0,01	64,56	16,77	29,51	22,64	11,09	0,28	10,71
8	B1197	235,2	15	2 550	194,6	9,06	55,6	9,43	19,52	18,21	2,09	1,02	0,45	58,70	17,26	26,35	24,66	6,57	1,60	23,56

Уменьшение плотности металлического слитка в эксперименте STFM-B № 3 связано с увеличением в его составе доли легких атомов (Zr, B, C). По результатам анализа (табл. 5) видно, что бор и углерод преимущественно концентрируются в металлической части слитка. В результате этого в металлическом расплаве после кристаллизации в составе металлического слитка дополнительно зафиксированы фазы ZrB_2 и $Zr(C, O)$ [21]. Металлические слитки в экспериментах STFM-B №№ 3...5, 8 оказались в нижней части холодного тигля, что указывает на то, что плотность металлической фазы больше плотности оксидной.

В эксперименте STFM-B № 7 с расплавом С-70 металлическая фаза обнаружена в верхней части слитка. Вероятно, плотность оксидной фазы в этом эксперименте была незначительно выше плотности металлической фазы. Такое же соотношение плотностей металлических и оксидных слитков сохранилось и при комнатной температуре. Средняя плотность металлического слитка ($8,4 \text{ г/см}^3$) оказалась ниже средней плотности оксидного слитка ($9,0 \text{ г/см}^3$).

Результаты эксперимента STFM-B № 3 послужили основанием для последующих исследований, в которых изучалось влияние увеличения отношения масс стали и расплава, степени окисления циркония и атомного отношения U/Zr на состав и свойства образующихся фаз. Установлено, что остаточная концентрация бора в оксидных слитках слабо зависит от отношения массы железа и оксидного расплава, атомного отношения U/Zr и степени С-п окисления циркония и составляет в среднем $0,8 \pm 0,2 \%$.

Плотность оксидных слитков, как можно видеть из табл. 5, также мало зависит от параметров экспериментов и составляет в среднем $9,2 \pm 0,2 \text{ г/см}^3$. Напротив, остаточная концентрация углерода в оксидных слитках монотонно, как можно видеть по результатам экспериментов STFM-B №№ 3...5, убывает с ростом отношения массы железа и расплава. Коэффициенты распределения бора между металлической и оксидной фазами расплава, определяемые как $k_o = x_{\text{мет.фаза}}/x_{\text{оксид.фаза}}$ через атомную концентрацию, с ростом отношения уменьшаются с 12,2 при $K_1 = 0,021$ в эксперименте STFM-B № 3 до 8,8 при $K_1 = 0,12$ в эксперименте STFM-B № 5. Соответственно коэффициенты распределения циркония уменьшаются с 1,94 до 1,08.

Сопоставим результаты экспериментов серии STFM-B с аналогичными серии STFM-Fe. В табл. 6 сравниваются результаты экспериментов разных серий при близких условиях. Их основное различие состоит в присутствии карбида бора в составе оксидного расплава в экспериментах серии STFM-B.

Из табл. 6 можно видеть, что с увеличением массы железа, вводимого в расплав С-32 + 0,5 % B_4C , наблюдается уменьшение атомной доли бора и циркония в металлическом расплаве. Измеренная средняя плотность металлических слитков в экспериментах STFM-B № 3...5 при комнатной температуре монотонно увеличивается ($9,43, 9,47$ и $10,07 \text{ г/см}^3$). Различие в массе образующихся металлических слитков исчезает. Поэтому можно заключить, что с увеличением отношения $m_{\text{Fe}}/m_{\text{оксид}}$ в результате разбавления металлической фазы железом влияние добавок B_4C на взаимо-

Т а б л и ц а 6. Сравнение результатов экспериментов серий STFM-B и STFM-Fe

Масса Fe, г	№ эксперимента	Состав, масса и плотность металлического слитка			
		U/Zr	B, ат.%	масса, г	ρ , г/см ³
~ 5	STFM-B № 3	0,75	10,84	47,8	9,43
	STFM-Fe № 3	1,12	—	19,3	10,89
~ 15	STFM-B № 4	0,80	9,15	58,7	9,47
	STFM-Fe № 4	1,05	—	54,2	10,29
~ 30	STFM-B № 5	0,93	4,91	84,9	10,07
	STFM-Fe № 9	1,04	—	102,6	9,85

действие расплава кориума с железом уменьшается.

На стадии приготовления кориума C-70 + 0,5 % В₄С в результате спекания при 2 150 °С отмечен небольшой унос углерода предположительно в виде СО вследствие повышенной химической активности кислорода. В эксперименте STFM-B № 7 при 2 600 °С произошел дополнительный унос углерода из расплавленной системы. Остаточная концентрация углерода в оксидном слитке оказалась примерно в 50 раз меньше, чем в эксперименте STFM-B № 3 с расплавом C-32 + 0,5 % В₄С.

Сопоставим результаты экспериментов STFM-B № 7 и STFM-Fe № 7 [10], единственное отличие которых состояло в наличии в исходном расплаве в первом эксперименте карбида бора. Можно отметить, что дополнительное введение карбида бора в расплав C-70 приводит к незначительному увеличению массы образующегося металлического слитка (17,1 г в эксперименте STFM-B № 7 и 12,3 г в эксперименте STFM-Fe № 7). Отсюда можно заключить, что влияние добавок карбида бора на взаимодействия оксидного расплава с железом снижается по мере увеличения степени окисления циркония.

Сравнивая массу образующихся оксидного и металлического слитков в экспериментах STFM-B № 4 и STFM-B № 8, можно отметить, что уменьшение атомного отношения U/Zr в использованных составах (U/Zr = 1,2 и U/Zr = 0,9) не отразилось на результатах взаимодействия.

Таким образом, экспериментами STFM-B установлено, что бор и углерод преимущественно концентрируются в металлической фазе расплава. С увеличением начального отношения массы $m_{Fe}/m_{оксид}$ в результате разбавления металлической фазы железом влияние добавок В₄С на взаимодей-

ствие расплава с железом уменьшается, а влияние добавок карбида бора на взаимодействие оксидного расплава с железом снижается по мере увеличения степени окисления циркония.

1.3. Исследование распределения продуктов деления между металлической и оксидной фазами расплава в корпусе ВВЭР-1000 при тяжелой аварии.

Дальнейшее развитие работ, проведенных в рамках программы МАСКА, направлено на выяснение закономерностей, связанных с распределением малолетучих продуктов деления между металлической и оксидной фазами стратифицированного расплава. Предварительно установлено, что при введении в расплав C-36 коррозионно-стойкой стали происходит перераспределение продуктов деления [26]. Молибден и рутений в основном переходят в металлическую фазу. Остальные элементы концентрируются преимущественно в оксидном расплаве.

Целью экспериментов серии STFM-FP было исследование распределения продуктов деления между оксидной и металлической фазами расплава в зависимости от степени окисления, атомного отношения U/Zr, температуры и состава стали. Дополнительно исследовалось влияние добавок В₄С на распределение выбранных имитаторов продуктов деления между металлической и оксидной фазами расплава [14, 22, 27, 28].

В качестве имитаторов продуктов деления выбраны Mo, Ru, Sr, Ba, La и Ce. Предполагалось, что химическая форма их существования не имеет существенного значения в связи с тем, что в экспериментах кориум будет проходить через полное расплавление. Приготовленные спеченные брикеты кориумов (табл. 7) раздроблены в

Таблица 7. Химический состав приготовленных образцов, % по массе

Кориум	U/Zr	Шифр	U	Zr	Zr _{своб}	C	B
C-32	1,2	B1066	66,80	21,92	14,85	0,007	—
C-32	1,6	B1082	71,55	17,11	11,50	0,008	—
C-32 + 0,5 % В ₄ С	1,2	B1195	66,33	21,76	—	0,12	0,37
C-32 + 0,5 % В ₄ С	0,9	B1197	62,81	25,51	—	0,11	0,39
C-60	1,2	B1091	65,30	21,10	8,46	0,006	—
C-70	1,2	B1065	65,10	21,10	6,22	0,006	—

неокислительных условиях до состояния крупки с характерным размером ~ 0,5 мм, в которую добавлены отобранные элементы в виде смеси порошков Mo, Ru, SrCO₃, BaO₂, La₂O₃ и CeO₂ в количестве 0,4 % по массе в пересчете на металлы.

Равномерно перемешанные смеси порошков загрузили в вольфрамовые тигли внутренним диаметром 30, высотой 130 мм и переплавили в аргоне по режиму: быстрый выход на температуру полного расплавления 2 400...2 600 °С в зависимости от степени окисления расплава, выдержка 1...3 мин и выключение индуктора. Полученные слитки извлекли из вольфрамовых тиглей и в таком виде использовали в последующих экспериментах. Рентгеноструктурный анализ плавящихся слитков показал, что фазовый состав одинаков: (U, Zr)O₂ + α-Zr(O). Методом количественного фазового анализа определили концентрацию фазы α-Zr(O), показавшего, что в результате плавления степень окисления циркония увеличилась на 18 ± 3 %. Выполненная серия STFM-FP включает восемь экспериментов с расплавом разной степени окисления

циркония. Основные условия экспериментов серии STFM-FP приведены в табл. 8.

Составленный по каждому эксперименту материальный баланс показывает, что в результате разбавления средняя концентрация каждого из продуктов деления в расплаве составляла 0,25 ± 0,03 % по массе. В абсолютном выражении в расплав введено по 1,15 ± 0,05 г каждого продукта деления в пересчете на металл. Во всех экспериментах общая масса сборок, вводимых в холодный тигель, примерно одинакова 620 ± ± 20 г. В расплав вводилось одинаковое количество (по 15 г) железа или в эксперименте STFM-FP № 4 коррозионно-стойкой стали.

Условия проведения экспериментов также были в основном тождественными. Поэтому и отношение массы стали к массе оксидного расплава почти одинаковое: $K_1 = m_{Fe}/m_{оксид} = 0,045 \pm 0,005$. Основные закономерности при взаимодействии оксидного расплава и железа, в частности, влияние степени окисления расплава на массу образующейся металлической фазы и концентрацию в ней урана и циркония,

Т а б л и ц а 8. Основные условия экспериментов серии STFM-FP

Факторы	STFM-FP							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Шифр расплава:								
В 1066	X							
В 1082		X	X	X				
В 1195							X	
В 1197								X
В 1091					X			
В 1065						X		
U/Zr:								
0,9								X
1,2	X				X	X	X	
1,6		X	X	X				
T, °C:								
2 550							X	X
2 600	X	X		X	X	X		
2 700			X					
τ, мин:								
15	X	X	X	X	X	X		
60							X	X
Металл:								
Fe	X	X	X		X	X	X	X
Сталь				X				

Таблица 9. Распределение элементов между оксидной и металлической фазами стратифицированного расплава в экспериментах STFM-FP

Элемент	Концентрация, % по массе															
	Металлическая фаза								Оксидная фаза							
	Номер эксперимента															
	1	2	3	4	5	6	7* ¹	8* ²	1	2	3	4	5	6	7* ³	8* ³
U	51,40	49,70	52,56	47,68	37,03	33,00	47,52	48,15	65,95	70,6	66,12	66,87	65,98	66,01	67,40	63,25
Zr	19,70	17,63	19,70	18,77	14,40	12,35	23,83	26,70	19,57	16,07	19,83	19,15	18,55	18,20	18,81	21,80
Fe	19,10	22,70	19,50	23,75* ⁴	31,90	36,40	18,06	16,84	0,90	0,42	0,52	0,50* ⁵	0,31	0,29	0,62	0,68
Mo	1,31	2,04	0,73	1,56	2,22	2,63	1,63	1,52	0,08	0,06	0,12	0,11	0,04	0,05	0,15	0,17
Ru	1,10	1,39	0,86	1,35	2,21	1,98	1,66	1,75	0,07	0,04	0,08	0,06	0,03	0,03	0,12	0,08
Sr	0,02	0,02	0,02	0,004	0,01	0,03	0,02	0,03	0,13	0,13	0,14	0,06	0,11	0,14	0,13	0,19
Ba	0,03	0,02	0,02	0,005	0,02	0,03	0,04	0,04	0,20	0,18	0,25	0,20	0,20	0,17	0,23	0,28
Ce	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,08	0,05	0,19	0,10	0,10	0,27	0,07	0,10	0,44	0,43
La	0,03	0,02	0,02	0,013	0,02	0,02	0,05	0,04	0,19	0,10	0,11	0,28	0,08	0,09	0,39	0,41

*¹, *² Металлическая фаза дополнительно содержит 0,86 и 0,22, 0,9 и 0,21 бора и углерода, соответственно.

*³ Оксидная фаза дополнительно содержит 0,1 и 0,02 бора и углерода.

*⁴ Содержание, % по массе: Fe – 16,5, Cr – 4,87, Ni – 2,38.

*⁵ Содержание, % по массе: Fe – 0,36, Cr – 0,057, Ni – 0,082.

подтверждаются и в присутствии в системе продуктов деления (табл. 9).

Концентрация продуктов деления в оксидной и металлической фазах дает коэффициент распределения, который характеризует соотношение между концентрациями в фазах, находящихся в равновесии между собой в изотермических условиях, и определяется как $k_0 = x_{\text{мет.фаза}}/x_{\text{оксид.фаза}}$. Из табл. 9 видно, что молибден и рутений в основном концентрируются в металлической фазе, все остальные продукты деления, напротив, преимущественно в оксидной фазе.

Анализ данных табл. 9 позволяет заключить [14, 28], что присутствие в расплаве Mo, Ru, Sr, Ba, Ce, La качественно не влияет на его взаимодействие с конструкционной сталью и характер стратификации расплава в корпусе реактора. Коэффициенты распределения продуктов деления между оксидной и металлической фазами по разному зависят от степени окисления расплава, атомной доли U/Zr, состава конструкционной стали и температуры.

С увеличением степени окисления расплава от C-65 до C-86 и атомной доли от 1,29 до 1,68 коэффициенты распределения для Mo и Ru увеличиваются в несколько раз, а Sr, Ba, Ce и La изменяются в пределах 50 %. С увеличением температуры от 2 600 до 2 700 °С, а также при переходе от железа к коррозионно-стойкой стали коэффициенты распределения всех продуктов деления уменьшаются.

1.4. Исследование процесса стратификации бассейна U-Zr-O-Fe расплава в окислительных условиях.

В выполненных экспериментах серии STFM-Fe [11...13] установлено, что металлическая фаза на основе Fe и оксидный кориум в расплавленном состоянии не смешиваются. Во всех экспериментах, проведенных с использованием недоокисленного кориума (C-32, C-50, C-70), в результате взаимодействия расплавленное Fe насыщается ураном, цирконием и кислородом. Его плотность становится больше плотности расплавленных оксидных кориумов. В результате образуется стратифицированная структура бассейна расплава с металлической фазой в нижней части.

Все выполненные исследования проведены в инертной атмосфере, что позволило установить основные факторы, определяющие результирующие состав и массу образующейся более тяжелой металлической фазы. К их числу относятся степень окисленности оксидного кориума, соотношение масс кориума и стали, а также атомное отношение U/Zr в кориуме. В реальных условиях при тяжелой аварии в корпусе ВВЭР может достаточно долго сохраняться паровая атмосфера. Поэтому существует необходимость исследования воздействия окислительной среды над поверхностью расплава, образовавшегося на начальном этапе удержания расплавленной активной зоны внутри корпуса реактора, на последующую эволюцию конфигурации бассейна расплава.

Целью выполненных экспериментов серии STFM-Ох, результаты которых представлены в настоящем разделе, ставилось изучить влияние паровой атмосферы на стационарную конфигурацию бассейна расплава в системе U-Zr-O-Fe (сталь) в зависимости от количества поглощенного из паровой среды кислорода [16]. Начальные составы оксидных кориумов и соотношения масс кориума и Fe выбирались близкими к аналогичным в экспериментах серии STFM-Fe [11...13], проведенных в инертной атмосфере, что выявило влияние количества поглощенного кислорода на конечное состояние расплавленной системы.

В качестве начальных составов использовались кориумы, составы которых приведены в табл. 10.

Эксперименты проводились в соответствии с предварительно составленной матрицей (табл. 11) при температуре 2 600 °С. Матрица спланирована таким образом, чтобы при минимальном количестве экспери-

ментов получить максимально возможную информацию о функциональных связях, определяющих конфигурацию бассейна расплава при окислении.

Эксперименты осуществлялись в два основных этапа. Первый полностью повторял технологию проведения ранее выполненных экспериментов серии STFM-Fe [11...13]. После стабилизационной выдержки в течение ~ 5 мин в расплав оксидного кориума опускались железо или сталь. Продолжительность выдержек τ_1 расплава кориума в контакте с введенным металлом составляла от 30 до 60 мин. Второй этап экспериментов проводился в условиях, имитирующих окисление расплава из паровой фазы над поверхностью бассейна. За 10 мин до начала окисления начиналась продувка гелия через рабочую камеру установки с постоянным расходом 17 нл/мин.

Проведению экспериментов предшествовала отработка методики окисления расплавленного оксидного кориума [16]. В результате выполненных сравнительных экспериментов по отработке способа подачи пара преимущество отдано капельному методу, который обеспечивал надежный транспорт окислителя к зеркалу расплава, вызывал минимальные возмущения как по температуре, так и по механическому состоянию расплавленной поверхности, позволяя с хорошей точностью планировать проведение экспериментов на этапе окисления.

Окисление расплава водяным паром давало возможность осуществлять в режиме on-line контроль за процессом по кинетике выделения водорода. С целью практической реализации этого в работе выбрана хроматографическая методика контроля состава газовой среды. В экспериментах отбор газа осуществлялся непрерывно из зоны в верхней части камеры с помощью водоох-

Т а б л и ц а 10. Начальные составы кориумов в экспериментах STFM-Ох

Кориум	U/Zr	Шифр	Концентрация, % по массе				Фазовый состав и параметр решетки, нм
			U	Zr	Zr _{своб}	C	
C-32	0,9	B1146	63,06	25,82	17,73	0,007	(U, Zr)O ₂ (a = 0,5418) + + α-Zr(O)
C-32	1,2	B1270	66,73	21,78	14,84	0,009	(U, Zr)O ₂ (a = 0,5423) + + α-Zr(O)

Таблица 11. Матрица экспериментов серии STFM-Ox

Факторы	STFM-Ox								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Начальный состав									
C-32	X	X	X	X	X	X	X	X	X
U/Zr									
0,9							X	X	
1,2	X	X	X	X	X	X			X
2. Конечный состав									
C-55			X						
C-70	X	X			X		X		
C-85				X		X		X	X
3. $m_{Me}/m_{кор}$									
0,05	X	X	X	X			X	X	
0,1					X	X			X
0,2									
4. Металл									
Fe	X	X	X	X	X	X	X	X	
Сталь									X
5. Время, τ_1									
30 мин	X	X	X	X	X	X			X
60 мин							X	X	
6. Время, τ_2									
30 мин		X	X						

лаждаемого зонда. Применение гелия обеспечивало быстрое перемешивание образующихся газов (H_2 , CO) в объеме установки, а постоянная продувка гелия ограничивала установившуюся концентрацию водорода величиной не более 5 об.%. Это ограничение по концентрации водорода в камере обеспечивало взрывобезопасность, исключая участие образующегося водорода в физико-химических процессах с расплавом и гидрирование металлической фазы при охлаждении и кристаллизации.

Результаты измерений концентраций образующихся газов (H_2 и CO) фиксировались автоматически в виде дискретных пиков с интервалом во времени ~ 15 с. После завершения этапа окисления в экспериментах STFM-Ox №№ 2...4 проводилась дополнительная выдержка τ_2 длительностью 30 мин. В других экспериментах данной серии такой выдержки не делалось. По окончании всех этапов эксперимента осуществлялось медленное (~ 50 град/мин) снижение температуры до ~ 1600 °C. Затем продувку гелием прекращали, высокочастотный генератор выключали и остывание до комнатной температуры проводилось в течение

нескольких часов. Так, например, в эксперименте STFM-Ox № 1 использовался кориум C-32 (U/Zr = 1,2).

Эксперимент спланирован таким образом, чтобы его результаты можно было сопоставить с ранее проведенными экспериментами STFM-Fe №№ 4 и 10. На первом этапе, который проводился в инертной среде, основные условия, в том числе отношение масс железа и кориума, повторяли эксперимент STFM-Fe № 4. На втором этапе предполагалось окислить свободный цирконий в кориуме до уровня, соответствующего начальному кориуму C-70. Этот этап по условиям проведения эксперимента соответствовал эксперименту STFM-Fe № 10 с той разницей, что состав кориума по кислороду, эквивалентный начальному составу C-70 в ранее выполненном эксперименте STFM-Fe № 10, достигался в конце этапа окисления. Температура эксперимента увеличена до 2600 °C в связи с предполагаемым повышением температуры ликвидус в результате дополнительного окисления кориума.

По опыту всех ранее проведенных в данной геометрии холодного тигля экспе-

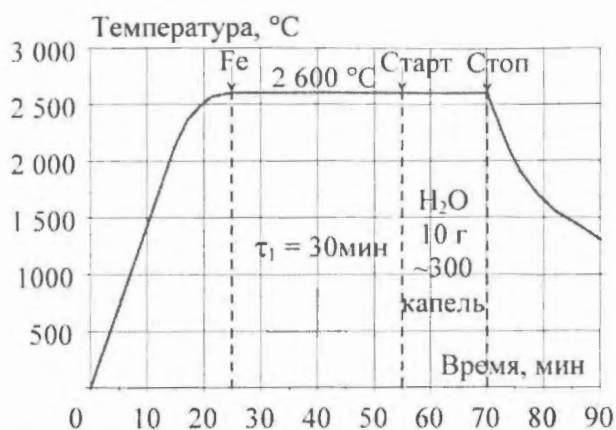


Рис. 3. Термограмма эксперимента STFM-Ox №1

риментов серии STFM-Fe масса расплава корнума составляла ~ 300 г. Полагая такую же массу в планируемом эксперименте, выполнены предварительные оценки необходимого количества воды для окисления выбранного корнума С-32 до С-70, показавшие, что для этого потребуется около 10 г. На рис. 3 приведена термограмма эксперимента STFM-Ox № 1.

На первом этапе после введения в расплав корнума 15,1 г Fe выдержка τ_1 составила 30 мин. На этапе окисления оцененные 10 г воды в виде ~ 300 капель доставлены к поверхности расплава за общее время 15 мин со средней частотой подачи 1 капля в 3 секунды. При попадании каждой капли на поверхность расплава отмечались и фиксировались с помощью цифровой видеокамеры яркие вспышки, связанные с окислением свободного Zr (рис. 4).

Выбранные частота подачи капель и их масса совместно с продувкой гелием обеспечивали быструю диссипацию экзотермического тепла. В результате при фиксиро-



Рис. 4. Термическая вспышка при взаимодействии капли воды с зеркалом расплава

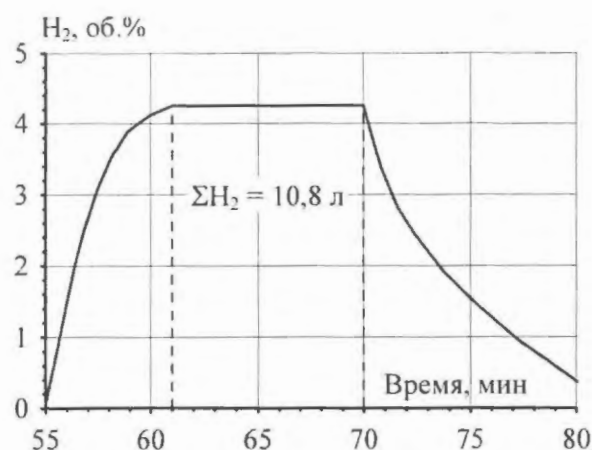


Рис. 5. Концентрация H_2 в камере установки в эксперименте STFM-Ox № 1 в процессе окисления

ванной подводимой электрической мощности общее повышение температуры расплава практически не происходило. На рис. 5 приведен усредненный график изменения объемной концентрации водорода в процессе окисления в камере установки.

На начальном участке в интервале от 55 до ~61 мин при постоянной продувке гелием 17 нл/мин происходит относительное накопление водорода в камере до установления стационарного равновесия. После завершения этапа окисления образование водорода прекращается и при продолжающейся продувке гелием его остаточная концентрация в камере падает.

Выполненные измерения показывают, что общее количество образовавшегося водорода составило 10,8 л. Отсюда следует, что из общей массы 10 г воды, поданной на поверхность расплава в виде капель, в реакцию с расплавленной поверхностью вступило только 8,68 г воды. Разница в 1,32 г в

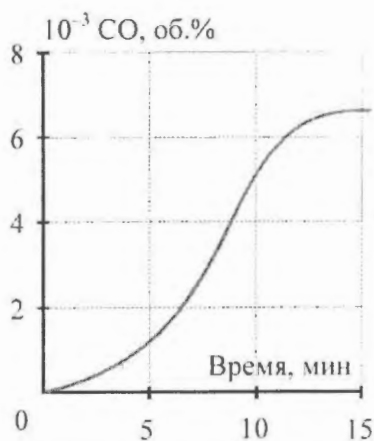


Рис. 6. Концентрация CO в камере установки в эксперименте STFM-Ох № 1 в процессе окисления

виде паров воды ушла из зоны взаимодействия. Коэффициент усвоения воды составил 86,8 %. Масса кислорода, вошедшая в расплав, составила 7,71 г и привела к окислению 21,98 г свободного Zr до ZrO₂. Одновременно с водородом в составе газовой среды на основе гелия в камере установки зафиксировано образование CO. Динамика изменения концентрации CO во времени на этапе окисления воспроизведена на рис. 6.

Видно, что уровень концентрации CO много ниже концентрации водорода. После завершения этапа окисления в результате снижения температуры концентрация CO в камере быстро снижается до предела чувствительности. Интегрирование вдоль концентрационной кривой на рис. 6 с учетом постоянной скорости продувки гелием (17 нл/мин) и свободного объема камеры (~ 25 л) при рабочем давлении гелия 1,4 атм позволило оценить общее количество образовавшегося CO величиной ~ 8,4·10⁻³ нл.

Аналогичным образом проведены все эксперименты серии STFM-Ох [16]. Их результаты представлены в табл. 12.

Результаты первых двух экспериментов, как можно видеть из табл. 12, полностью совпадают как по массам образовавшихся оксидного и металлического слитков, так и по их составам. Дополнительная выдержка $\tau_2 = 30$ мин после завершения этапа окисления в эксперименте STFM-Ох № 2 не привела к каким-либо заметным отклонениям. Это указывает на то, что процессы установления равновесия в системе при окислении, по крайней мере в условиях

Таблица 12. Результаты экспериментов серии STFM-Ох по взаимодействию расплавленных корундов с Fe (SS)

Эксперимент	Шифр корунда	Масса, г		Время, τ_1/τ_2 , мин	Оксидная фаза		Металлическая фаза		Состав фазы, ат.%									
		расплава	Fe		масса, г	плотность, г/см ³	масса, г	плотность, г/см ³	U	Zr	Fe	C	O	U	Zr	Fe	C	O
1	B1270	274	15,1	30/0	269,2	9,12	27,6	10	19,64	15,54	1,04	0,04	63,74	14,98	16,15	45,31	0,28	23,27
2	B1270	263	15,1	30/30	260,7	9,1	25,2	9,9	19,54	15,38	1,19	0,03	63,86	14,24	16,00	45,99	0,30	23,46
3	B1270	269	15,1	30/30	251,2	9,1	36,8	10,1	20,04	16,05	1,11	0,04	62,76	15,34	16,69	42,47	0,20	25,30
4	B1270	250	15,1	30/0	258,8	8,9	17,6	8,6	19,20	15,71	0,84	0,01	64,23	5,79	7,08	70,19	0,52	16,42
5	B1270	269	30,2	30/0	263,2	8,98	44,5	8,77	19,37	15,68	1,38	0,03	63,53	8,87	8,94	57,59	0,21	24,40
6а	B1270	308	30,3	30/0	323,4	8,87	28,8	8,03	19,48	15,47	0,59	0,006	64,45	1,40	2,19	74,20	0,21	22,06
6	B1270	314	30	30/0	331,7	8,9	25,4	7,9	19,22	16,13	0,44	0,01	64,19	1,48	2,21	75,98	0,26	20,07
7	B1146	285	15,2	60/0	285,1	8,83	25,7	9,64	18,05	18,72	0,85	0,02	62,36	12,30	13,78	54,92	0,26	18,74
8	B1146	378	15	60/0	396,1	8,72	16,2	8,66	17,95	18,28	0,47	0,01	63,28	6,03	8,36	64,17	0,36	21,08
9	B1270	347	30,1	30/0	365,9	9,00	28,4	9,05	19,02	15,64	1,64* ¹	0,018	63,69	7,30	7,37	64,35* ²	0,37	20,61

*¹Fe – 1,04; Cr – 0,31; Ni – 0,29; *²Fe – 50,09; Cr – 5,78; Ni – 8,48

Таблица 13. Зависимость соотношения масс металлической и оксидной фаз, образующихся при взаимодействии Fe с оксидным кориумом, от степени окисленности циркония

Эксперимент	Конечная степень окисления Zr	Отношение масс $m_{Fe}/m_{оксид}$	
		Начальное K_1	Конечное K_2
STFM-Fe № 4	C-32	0,048	0,197 (0,146*)
STFM-Ox № 3	C-54,2	0,056	0,146
STFM-Ox № 1	C-69	0,055	0,103
STFM-Fe № 10	C-70,6	0,052	0,085
STFM-Ox № 2	C-72,4	0,057	0,097
STFM-Ox № 4	C-83,6	0,060	0,068
STFM-Fe № 9	C-32	0,107	0,513 (0,290*)
STFM-Ox № 5	C-74,5	0,112	0,169
STFM-Ox № 6	C-88	0,096	0,077
STFM-Ox № 6а	C-92	0,098	0,089

* исправленная в соответствии с соотношением (1) величина

и масштабе проведенных экспериментов, протекают с достаточно высокими скоростями.

Увеличение степени окисленности кориума прямым образом влияет на соотношение образующихся масс несмешивающихся металлического и оксидного расплавов. В табл. 13 собраны результаты экспериментов, иллюстрирующие эту зависимость.

На рис. 7 приведены в графической форме линейные зависимости отношения K_2 от степени $C-n$ конечной окисленности оксидного кориума для двух значений параметра K_1 . Соответствующие линейные зависимости имеют вид

$$K_2 = 0,195 - 0,00153C-n \text{ при } K_1 = 0,05;$$

$$K_2 = 0,407 - 0,00357C-n \text{ при } K_1 = 0,1.$$

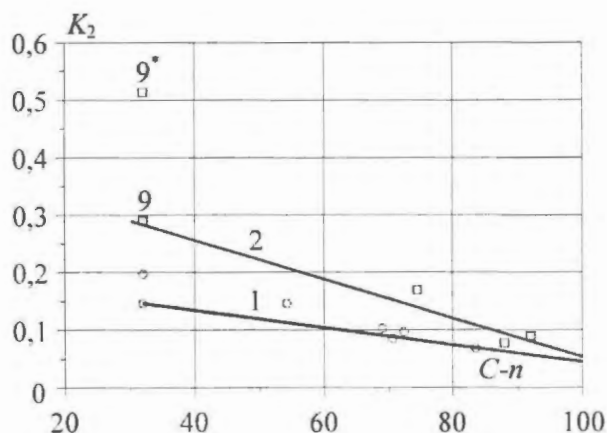


Рис. 7. Зависимость конечного отношения K_2 масс от конечной степени $C-n$ окисленности кориума: 1 — $K_1 = 0,050 \pm 0,007$; 2 — $K_1 = 0,100 \pm 0,009$

По этим данным с учетом соотношения (1) можно построить обобщенное уравнение в виде

$$K_2 = -0,01725 + 4,2438K_1 - C-n(-0,0005122 + 0,040832K_1), \quad (2)$$

связывающее отношение K_2 масс, образующихся в результате взаимодействия металлической и оксидной фаз, с начальным отношением K_1 масс и конечной степенью $C-n$ окисленности кориума при атомном отношении $U/Zr = 1,2$ для температурного интервала 2 773...2 873 К.

Уравнение (2) позволяет (без учета испарения железа) прогнозировать соотношение масс в стратифицированном бассейне расплава, образующемся при взаимодействии Fe и оксидного кориума, в зависимости от начального отношения K_1 и количества поглощенного кислорода, выраженного через степень окисления Zr. Увеличение степени окисления приводит к уменьшению массы металлического расплава и его плотности. Поэтому при длительном удержании расплава в корпусе реактора в окислительных условиях будет устанавливаться конфигурация бассейна с металлическим слоем сверху.

Степень окисленности оксидной части слитков в экспериментах STFM-Ox, определяемая по доле свободного циркония, зависит не только от количества поглощенного кислорода. Как установлено ранее [11...13], даже в отсутствие окисления неконгруэнтный характер процесса взаимодействия расплава стали и оксидного кориума приводит

к увеличению концентрации кислорода в оксидном слитке. Для определения доли свободного Zr в оксидных слитках, образовавшихся в экспериментах серии STFM-Ox, применялся количественный рентгеноструктурный метод анализа. Химический метод анализа свободного Zr в оксидном кориуме в присутствии атомов Fe, отличающихся по валентности от атомов U и Zr, не давал достоверных результатов. Полученные данные по $Zr_{\text{своб}}$ собраны в табл. 14, с использованием которых оценены величины *C-n* с учетом всех процессов в проведенных экспериментах.

Например, в эксперименте STFM-Ox № 3 железо введено в оксидный расплав после его окисления до *C-54,2*. В результате последующего взаимодействия в инертной среде при малом начальном отношении масс $K_1 = m_{\text{Fe}}/m_{\text{оксид}} = 0,055$ степень окисленности оксидной фазы расплава сместилась до величины *C-79,5*. Очевидно, что с увеличением массы стали, вовлекаемой в процесс взаимодействия, конечная степень окисленности оксидной фазы расплава будет стремиться к 100 %.

Таким образом, экспериментально установлено, что конфигурация бассейна расплава, образующегося при взаимодействии кориума *C-32* с железом, в результате последующего окисления паром претерпевает непрерывные изменения. По мере увеличения степени окисленности кориума масса металлической фазы расплава и ее плотность уменьшаются. При достижении критической степени окисленности кориума в

результате уменьшения плотности металлической фазы ниже плотности оксидного расплава происходит обратная инверсия слоев. Длительное удержание расплава в корпусе реактора в окислительных условиях приводит к установлению конфигурации бассейна с металлическим слоем сверху.

2. Термодинамические и объемные свойства U-Zr-Fe-O расплавов

Экспериментальные результаты, полученные в проекте МАСКА, позволяют сформулировать термодинамические модели для прогнозирования высокотемпературного взаимодействия оксидного кориума и стали в корпусе реактора и характера стратификации в образующемся бассейне расплава. Анализ литературных данных показывает, что достоверность известных экспериментальных результатов по термодинамическим свойствам систем U-O, Zr-O и U-Zr-O, а также по растворимости кислорода в расплавленных уране и цирконии, недостаточна для построения термодинамической модели, пригодной для анализа взаимодействия расплавленного кориума со сплавами на основе железа.

Предложено в качестве модели расплава многокомпонентного кориума, состоящего из металлических и металлоидных атомов, рассматривать атомарный раствор замещения, обладающий свойствами регулярного раствора [29]. Соответствующие уравнения химических потенциалов для U, Zr, Fe и O имеют вид

Таблица 14. Суммарная степень окисленности Zr в экспериментах серии STFM-Ox

Эксперимент	Концентрация, масс.%		<i>C-n</i>	
	Zr	$Zr_{\text{своб}}$	после окисления	полное
STFM-Ox № 1	19,77	2,95	69	85,1
STFM-Ox № 2	19,64	2,60	72,4	86,8
STFM-Ox № 3	20,05	4,10	54,2	79,5
STFM-Ox № 4	20,25	1,35	83,6	93,3
STFM-Ox № 5	20,05	1,70	74,5	91,5
STFM-Ox № 6а	19,84	0,40	92	98,0
STFM-Ox № 6	20,73	0,55	88	97,3
STFM-Ox № 7	24,23	3,58	73	85,2
STFM-Ox № 8	23,9	0,85	87	96,4
STFM-Ox № 9	20,2	0,73	87,6	96,4

$$\begin{aligned} \Delta \bar{F}_1 &= R T \ln x_1 + L_{12} x_2 (1 - x_1) + L_{13} x_3 (1 - x_1) + \\ &+ L_{14} x_4 (1 - x_1) - L_{23} x_2 x_3 - L_{24} x_2 x_4 - L_{34} x_3 x_4; \\ \Delta \bar{F}_2 &= R T \ln x_2 + L_{12} x_1 (1 - x_2) + L_{23} x_3 (1 - x_2) + \\ &+ L_{24} x_4 (1 - x_2) - L_{13} x_1 x_3 - L_{14} x_1 x_4 - L_{34} x_3 x_4; \\ \Delta \bar{F}_3 &= R T \ln x_3 + L_{13} x_1 (1 - x_3) + L_{23} x_2 (1 - x_3) + \\ &+ L_{34} x_4 (1 - x_3) - L_{12} x_1 x_2 - L_{14} x_1 x_4 - L_{24} x_2 x_4; \\ \Delta \bar{F}_4 &= R T \ln x_4 + L_{14} x_1 (1 - x_4) + L_{24} x_2 (1 - x_4) + \\ &+ L_{34} x_3 (1 - x_4) - L_{12} x_1 x_2 - L_{13} x_1 x_3 - L_{23} x_2 x_3. \end{aligned}$$

Здесь приняты следующие обозначения: 1 – U, 2 – Zr, 3 – Fe, 4 – O; R – газовая постоянная; L_{ij} – энергия взаимодействия между i и j компонентами в расплаве. Необходимые параметры взаимодействия между металлическими атомами оценивались с использованием соответствующих фазовых диаграмм. В частности, применяя фазовые диаграммы U-Zr, U-Fe, Zr-Fe, определено, что $L_{12} = 19\,075$ Дж/моль, $L_{13} = -14\,780$ Дж/моль и $L_{23} = -65\,860$ Дж/моль [29]. Основная неопределенность связана с необходимостью оценки параметров взаимодействия кислорода с металлическими элементами. Для оценки использовались результаты экспериментов серии STFM-Fe (табл. 2).

В условиях отсутствия надежной термодинамической информации для системы U-Zr-Fe-O целью экспериментов серии STFM-Fe ставились выяснение особенностей взаимодействия расплавов кориума и железа, определение равновесных концентраций сосуществующих оксидной и металлической фаз в зависимости от времени, степени окисленности кориума и соотношения масс кориума и железа. Условия проведения экспериментов сформулированы таким образом, чтобы помимо ответов на поставленные вопросы получить экспериментальную основу для построения адекватной термодинамической модели расплавов U-Zr-Fe-O. В частности, для синтеза всех составов кориумов применены высокочистые материалы.

С целью повышения относительной точности определения кислорода в оксидной и металлической фазах, а также упрощения термодинамической модели на начальном этапе, вместо нержавеющей стали использовалось достаточно чистое железо. Начальные эксперименты выполнялись при

малых ($\sim 0,02$) отношениях масс Fe и кориума, что должно обеспечить достижение более полного равновесия между оксидным и металлическим расплавами.

Необходимые параметры взаимодействия металлических атомов с кислородом определены из экспериментально установленного равновесия оксидного и металлического расплавов в экспериментах STFM-Fe №№ 3...5 и составили: $L_{14} = -9\,184$ Дж/г-атом, $L_{24} = -42\,470$ Дж/г-атом и $L_{34} = 106\,480$ Дж/г-атом [29].

Развитая модель позволяет проводить оценки парциальных термодинамических характеристик расплавов системы U-Zr-Fe-O, прогнозировать составы и массы образующихся при взаимодействии U-Zr-O кориума и железа равновесных оксидного и металлического расплавов. Однако для прогнозирования пространственной конфигурации бассейна расплава активной зоны необходимо параллельно с определением масс и составов оксидной и металлической фаз знать их плотности в зависимости от соотношения компонентов и температуры.

Многообразие образующихся в результате взаимодействия расплава кориума и стали составов равновесных оксидной и металлической фаз практически исключает эмпирический подход к решению поставленной задачи. Известные литературные данные по температурным зависимостям плотностей отдельных составляющих этой системы в расплавленном состоянии недостаточны для построения концентрационно-температурных зависимостей плотностей интересующих расплавов даже в идеальном приближении. Поэтому целью исследования служила разработка модели для оценки объемных свойств любых расплавов в системе U-Zr-Fe-O.

К нахождению плотностей интересующих составов подойдем через определение соответствующих молярных объемов [30]. Примем, что молярный объем U-Zr-Fe-O расплава как термодинамическая функция также обладает свойствами регулярного раствора. В общем случае выражение для молярного объема в рассматриваемой системе может быть записано как

Т а б л и ц а 15. Температурные зависимости плотностей расплавов U, Zr и Fe

Фаза	Величина		$T - T_m, K$	Источник информации
	$\alpha, \text{г/см}^3$	$\beta, \text{г/(\text{см}^3 \cdot K)}$		
U	17,315	$2,146 \cdot 10^{-3}$	$T - 1406$	[31]
Zr	6,106	$2,414 \cdot 10^{-4}$	$T - 2133$	[32]
Fe	7,0505	$7,06 \cdot 10^{-4}$	$T - 1808$	[33]

$V_{(xi)} = x_1 V_1 + x_2 V_2 + x_3 V_3 + x_4 V_4 + \Delta V^{xs}$, (3)
 где x_1, x_2, x_3, x_4 – концентрации; V_1, V_2, V_3, V_4 – стандартные молярные объемы U, Zr, Fe и O, соответственно; ΔV^{xs} – избыточный объем образования расплава из отдельных компонентов. Молярные объемы U, Zr и Fe могут быть определены по известным и наиболее надежным, по мнению авторов, температурным зависимостям плотностей, приведенным в табл. 15, в виде линейного уравнения

$$\rho = \alpha - \beta (T - T_m),$$

где T_m – температура плавления металла; α и β – постоянные.

Исследуя связь ΔV^{xs} с характером системы, авторы [34] показали, что для сплавов, близких к идеальным, изотерма избыточного объема близка к нулю. Для сплавов, имеющих положительное отклонение от закона Рауля, $\Delta V^{xs} > 0$. Системы, характеризующиеся отрицательными отклонениями от закона Рауля, имеют $\Delta V^{xs} < 0$. Полагая, что в рассматриваемых расплавах функция $V(x_i)$ обладает свойствами регулярного раствора, запишем

$$\Delta V^{xs} = k(x_1 x_2 L_{12} + x_1 x_3 L_{13} + x_1 x_4 L_{14} + x_2 x_3 L_{23} + x_2 x_4 L_{24} + x_3 x_4 L_{34}).$$

Здесь k – коэффициент пропорциональности, связывающий избыточный объем образования расплава с избыточной энтальпией образования этого же расплава. При таком подходе получим, что в уравнении (3) неизвестны V_4 – молярный объем атомарного кислорода в конденсированном состоянии и коэффициент пропорциональности k . Для их определения воспользуемся экспериментальными результатами по плотности расплавов UO_2 [35]

$\rho_{[\text{UO}_2]} = 8,860 - 9,285 \cdot 10^{-4}(T - 3120)$, г/см³
 и кориума C-100 состава ($\text{U}_{0,60443} \text{Zr}_{0,39557}$) O_2 [10]

$$\rho_{[\text{C-100}]} = 7,4 - 4,5 \cdot 10^{-4}(T - 2973)$$
, г/см³.

Переходя от плотностей к молярным объемам и решая полученную систему уравнений, найдем, что

$$k = -1,331 \cdot 10^{-4} + 7,91762 \cdot 10^{-8} T, \text{ см}^3/\text{Дж};$$

$$V_4 = 16/(2,8442 - 1,63525 \cdot 10^{-4} T), \text{ см}^3/\text{моль O}.$$

Найденная совокупность значений L_{ij} , V_4 и k вместе с известными по литературным данным [31...33] величинами V_1, V_2, V_3 позволяет проводить оценки молярных объемов и плотностей любого расплава системы U-Zr-Fe-O по соотношению

$$\rho_{(xi)} = (x_1 A_1 + x_2 A_2 + x_3 A_3 + x_4 A_4) / V_{(xi)},$$
 где A_i – атомная масса.

Заключение

Результаты выполненных экспериментов дают достаточно полное представление о высокотемпературных процессах, протекающих на внутрикорпусной стадии тяжелой аварии. Ниже в табл. 16 приведены результаты оценок плотностей расплавов оксидной и металлической фаз в экспериментах серии STFM-Fe.

Из табл. 16 можно видеть, что в экспериментах с участием кориума C-32 с атомным отношением U/Zr = 1,2 плотность металлической фазы больше плотности оксидной фазы устанавливается при отношении вовлеченных во взаимодействие масс Fe и кориума до величины $K_1 \sim 0,3$. При большей величине этого отношения, как это имеет место в эксперименте STFM-Fe № 18 ($K_1 = 0,328$), значения плотностей меняются местами. Естественно, что в экспериментах с участием кориума C-32, но с меньшим атомным отношением U/Zr = 0,9 (STFM-Fe №№ 19, 21...24), в результате снижения равновесной концентрации урана в металлической фазе граница обратной инверсии приходится на меньшую величину $K_1 \sim 0,25$.

Увеличение степени окисленности кориума приводит к снижению интенсивнос-

Т а б л и ц а 16. Плотность расплавов в экспериментах серии STFM-Fe (оценка)

№ эксперимента	Кориум	U/Zr	Температура, °C	$K_1 = m_{Fe}/m_{кор}$	Плотность по расчету, г/см ³	
					оксидная фаза	металлофаза
2	C-32	1,2	2 500	0,019	7,754	8,524
3	C-32	1,2	2 500	0,018	7,816	8,883
5	C-32	1,2	2 500	0,016	7,774	8,464
4	C-32	1,2	2 500	0,048	7,668	8,467
9	C-32	1,2	2 500	0,111	7,451	8,332
14	C-32	1,2	2 500	0,183	7,171	7,470
16	C-32	1,2	2 500	0,219	7,564	7,817
17	C-32	1,2	2 500	0,211	7,567	7,805
18	C-32	1,2	2 500	0,328	7,574	7,236
6	C-50	1,2	2 550	0,018	7,728	8,491
7	C-70	1,2	2 600	0,017	7,612	8,352
10	C-70	1,2	2 600	0,052	7,480	7,559
20	C-70	1,2	2 600	0,211	7,402	6,843
19	C-32	1,2	2 500	0,011	7,761	8,080
21	C-32	0,9	2 500	0,055	7,555	8,262
22	C-32	0,9	2 500	0,106	7,463	8,336
23	C-32	0,9	2 500	0,005	7,964	8,376
24	C-32	0,9	2 500	0,280	7,430	7,269

ти взаимодействия фаз. В результате в серии экспериментов STFM-Fe №№ 7, 10, 20 с кориумом C-70 граничное отношение масс, при котором металлическая фаза вновь становится менее плотной, приходится на величину $K_1 \sim 0,2$.

По экспериментальным результатам проекта МАСКА построено обобщенное уравнение (2), прогнозирующее соотношение масс в стратифицированном бассейне расплава, образующихся при взаимодействии Fe и оксидного кориума, в зависимости от начального отношения K_1 и количества поглощенного кислорода, выраженного через степень окисления Zr. Увеличение степени окисленности кориума приводит к уменьшению массы металлического расплава и его плотности.

Как известно, активная зона ВВЭР-1000 составляет 105 т (80 т UO₂ и 25 т Zr). Общая масса стальных конструкций в корпусе реактора сопоставима с массой активной зоны. В процессе тяжелой аварии водо-водяного энергетического реактора с плавлением активной зоны кориум взаимодействует с внутрикорпусными конструктивными элементами, имеющими более низкую температуру плавления. По мере вовлечения в процесс взаимодействия все новых кон-

струкционных элементов (масс) состав образующихся оксидной и металлической фаз непрерывно изменяется.

При этом ожидаемое отношение $m_{Fe}/m_{оксид}$ масс, вовлекаемых в процесс взаимодействия на внутрикорпусной стадии, может существенно превышать величину 0,33, достигнутую в экспериментах [11...13]. Поэтому, используя уравнение (2), выполнены экстраполяционные оценки до отношения масс $m_{Fe}/m_{оксид} = 0,667$ для двух величин степени окисления Zr. При этом предполагалось расплавление всей активной зоны (105 т). Результаты представлены в табл. 17.

Выполненные оценки показывают, что в результате взаимодействия со стальными конструкциями следует ожидать в корпусе реактора образование в больших объемах металлической фазы расплава, содержащей в своем составе значительную долю атомов урана и циркония. Результаты серии STFM-FP [14, 28] позволяют полагать, что накопившиеся в облученном топливе металлические продукты деления (Mo, Ru и, вероятно, Pd, Tc, Rh) будут преимущественно концентрироваться в металлической фазе расплава.

Таблица 17. Массы фаз, образующихся при взаимодействии Fe с расплавленной активной зоной ВВЭР-1000 (105 т)

Степень окисленности Zr	Масса Fe, т	$K_1 = m_{Fe}/m_{оксид}$	Масса оксидной фазы, т	Масса металлической фазы, т
C-30	30	0,286	72,6	62,4
	40	0,381	67,5	77,5
	50	0,476	63,6	91,4
	60	0,571	60,6	104,4
	70	0,667	58,1	116,9
C-70	30	0,286	95,4	39,6
	40	0,381	93,8	51,2
	50	0,476	92,4	62,6
	60	0,571	91,1	73,9
	70	0,667	90,1	84,9

Список литературы

1. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Эволюция энергетики в XXI веке. М.: ИзДАТ, 2008.
2. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. РОССИЯ в мировой энергетике в XXI веке. М.: ИзДАТ, 2006.
3. Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю., Сидоренко В.А., Чернилин Ю.Ф. Атомная энергетика. М.: ИзДАТ, 2004.
4. Tsurikov D. Masca 2 Project: Major Activities and Results. Masca 2 Seminar 2007. Cadarache, France, 11-12 October 2007.
5. D'yakov E.K., Daragan V.D., Strizhov V.F. et al. Studies on Thermal Conductivity of Corium of C-22 and C-100 Composition. OECD RASPLAV Project, Report RP-TR-22, May, 1996.
6. Strizhov V. et al. The RASPLAV-A Facility Feasibility Study Summary Report. Volume III: Appendices B through D. Appendix B: Property Data Base that Used in Calculation. IBRAE, 1995, p. B-10.
7. Asmolov V., Vishnevsky V., D'yakov E. et al. Study of Corium Electrical Resistance. OECD RASPLAV Project, Report RP-TR-7, July, 1995.
8. Asmolov V.G., Merzlyakov A.V., Vishnevsky V.Yu. Kinematic Viscosity Measurement of C-100 and C-22 Corium. OECD RASPLAV Project. RRC "Kurchatov Institute". Report RP-TR-18. April 1996.
9. Asmolov V., Abalin S., Merzlyakov A. Corium Surface Tension Measurement. In: RASPLAV Final Report. Attachment C. Property Studies: Methodology and Results. OECD RASPLAV Project. RRC "Kurchatov Institute", July 2000.
10. Асмолов В.Г., Загрязкин В.Н., Вишневецкий В.Ю. и др. Плотность UO_2 - ZrO_2 расплава // Теплофизика высоких температур, 2003, т. 41, № 2, с. 714–719.
11. Асмолов В.Г., Загрязкин В.Н., Цуриков Д.Ф. и др. Исследование взаимодействия оксидного расплава и стали в корпусе ВВЭР-1000 при тяжелой аварии // Атомная энергия, 2008, т. 104, вып. 4, с. 208–211.
12. Tsurikov D.F., Vishnevsky V.Yu., D'yakov E.K. et al. Research into the Interaction between Iron and Molten Coria. OECD MASCA Project. RRC "Kurchatov Institute". Report MP-TR-19. April 2005.
13. Асмолов В.Г., Вишневецкий В.Ю., Дьяков Е.К. и др. Исследование процессов взаимодействия в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии. Взаимодействие расплавов оксидного кориума и стали. Препринт ИАЭ-6423/3, 2006.
14. Асмолов В.Г., Вишневецкий В.Ю., Дьяков Е.К. и др. Исследование процессов взаимодействия в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии. Распределение продуктов деления между металлической и оксидной фазами расплава. Препринт ИАЭ-6424/3, 2006.
15. Асмолов В.Г., Вишневецкий В.Ю., Дьяков Е.К. и др. Исследование процессов взаимодействия в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии. Влияние V_4C на стратификацию U-Zr-O-кориума и его взаимодействие с расплавом на основе Fe. Препринт ИАЭ-6422/3, 2006.
16. Tsurikov D.F., Vishnevsky V.Yu., D'yakov E.K. et al. Study of Melt Stratification and Distribution of Major Species (U, Zr, O, Fe(SS)) between Layers under Oxidizing Atmosphere: STFM-Ox Test Series. OECD MASCA Project. RRC "Kurchatov Institute". Report MP-TR-27. 2006.
17. Asmolov V., Degaltsev Yu., D'yakov E. et al. Study of Carbon and Separation Impact on Suboxidised Corium Stratification. OECD MAS-

CA Project. RRC "Kurchatov Institute". Report MP-TR-2, June 2001.

18. *Skokan A.* High Temperature Phase Relations in the U-Zr-O Systems / In: Proc. 5th Int. Meeting on Thermal Nuclear Reactor Safety, Karlsruhe, Spt. 9-13, 1984, p. 1035-1042.

19. *Hayward P., George I.* Dissolution of UO₂ in molten zircaloy-4. Part 4: phase evolution during dissolution and cooling of 2 000 to 2 500 °C specimens // J. Nucl. Mater., 1996, v. 232, N 1, p. 13-22.

20. *Андреевский Р.А., Спивак И.И.* Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. Справочник. Челябинск: Metallurgy, Челябинское отделение, 1989.

21. *Асмолов В.Г., Вишневский В.Ю., Дьяков Е.К. и др.* Изучение влияния В₄С на стратификацию U-Zr-O-кориума и процессы его взаимодействия с расплавом на основе Fe. OECD MASCA Project. RRC "Kurchatov Institute". Report MP-TR-7. September 2002.

22. *Цуриков Д.Ф., Вишневский В.Ю., Дьяков Е.К. и др.* Изучение влияния В₄С в составе U-Zr-O-кориума на процессы его взаимодействия с расплавом на основе Fe. OECD MASCA Project. RRC "Kurchatov Institute". Report MP-TR-20. May 2005.

23. *Асмолов В.Г., Загрязкин В.Н., Цуриков Д.Ф. и др.* Исследование влияния В₄С на взаимодействие оксидного расплава и стали в корпусе ВВЭР-1000 при тяжелой аварии // Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 2, с. 63-67.

24. *Hofmann P., Markiewicz M., Spino J.* Reaction Behavior of В₄С Absorber Material with Stainless Steel and Zircaloy in Severe Light Water Reactor Accidents // Nucl. Technol., 1990, v. 90, p. 226-244.

25. *Adroguer B.* Technical Note DRS/SEMAR 99/95. Status on В₄С in Severe Accident Conditions. Uncertainties and Experiments Proposed. Cadarache, 13 January 2000.

26. *Asmolov V., Khabensky V., Beshta S. et al.* The MA-3 and MA-4 Tests: Zirconium and Uranium Partitioning between Oxide and Metallic Phases of Molten Corium. OECD MASCA Project. RRC "Kurchatov Institute". Report MP-TR-9, February 2003.

27. *Асмолов В.Г., Вишневский В.Ю., Дьяков Е.К. и др.* Распределения продуктов деления между металлической и оксидной фазами расплава кориума по результатам экспериментов STFM-FP. OECD MASCA Project. RRC "Kurchatov Institute". Report MP-TR-10. Апрель 2003.

28. *Асмолов В.Г., Вишневский В.Ю., Цуриков Д.Ф. и др.* Исследование распределения про-

дуктов деления между металлической и оксидной фазами расплава в корпусе ВВЭР-1000 при тяжелой аварии // Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 1, с. 3-7.

29. *Асмолов В.Г., Загрязкин В.Н., Цуриков Д.Ф.* Термодинамика U-Zr-Fe-O-расплавов // Теплофизика высоких температур, 2007, т. 45, № 3, с. 347-354.

30. *Асмолов В.Г., Загрязкин В.Н., Цуриков Д.Ф.* Оценка плотности U-Zr-Fe-O-расплавов // Теплофизика высоких температур, 2008, т. 46, № 4, с. 635-638.

31. *Шпильрайн Э.Э., Фомин В.А., Качалов В.В.* Плотность и поверхностное натяжение урана в жидкой фазе // Теплофизика высоких температур, 1988, т. 26, № 5, с. 892-900.

32. *Коробенко В.Н., Савватимский А.И.* Свойства жидкого циркония до 4 100 К // Журнал физической химии, 2003, т. 77, № 10, с. 1742-1747.

33. *Баскин А.С.* Плотность и структура жидкого железа от плавления до критической точки. 1. Экспериментальные данные о плотности // Расплавы, 1995, № 6, с. 12-22.

34. *Сидоров О.Ю., Саранулов Ф.Н.* Оценка избыточного объема бинарных расплавов с отрицательными отклонениями от закона Рауля // Расплавы, 1992, № 2, с. 58-63.

35. *Breitung W., Reil K.O.* The Density and Compressibility of Liquid (U, Pu)-Mixed Oxide // Nucl. Sci. and Eng., 1990, v. 105, № 7, p. 205-217.

Контактная информация об авторах статьи – Асмолов Владимир Григорьевич, зам. директора РНЦ "Курчатовский институт", тел.: (499)

196-93-20, e-mail: Asmolov@nsi.kiae.ru;

Загрязкин Валерий Николаевич, в.н.с., тел.: (499)196-99-10, e-mail: zvn@nsi.kiae.ru;

Цуриков Дмитрий Федорович, директор ИЯР, тел.: (499)196-91-28, e-mail: d.tsurikov@nsi.kiae.ru;

Вишневский Вячеслав Юрьевич, нач. отдела, тел.: (903)731-72-84 (моб.), e-mail: via-vishnevskiy@yandex.ru;

Дьяков Евгений Константинович, гл. конструктор-технолог, тел.: (495)746-29-47, e-mail: U1067@dialup.podolsk.ru;

Котов Александр Юрьевич, инженер, тел.: (495)218-48-85;

Ретников Владимир Михайлович, нач. группы, тел.: 8-276-938-47.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 4,
с. 3-25.

Технология разработки распределенных вычислительных систем на базе супер-ЭВМ для решения комплексных задач ядерной энергетики

*В.Ф. Токаренко, П.Н. Алексеев, А.В. Глембоцкий,
М.И. Гуревич, А.В. Краюшкин, В.И. Лебедев,
РНЦ "Курчатовский институт", 123182, Москва, пл. Курчатова, 1,
И.М. Беляков, А.М. Варгин, О.А. Воронова, Ю.Ф. Данилов,
А.А. Деулин, В.В. Евдокимов, Д.В. Кульнев, П.С. Лобанов,
М.С. Самигулин, Г.П. Семенов, Р.М. Шагалиев, Т.В. Шемякина,
РФЯЦ-ВНИИЭФ, 607188, г. Саров Нижегородской обл., пр-т Мира, 37,
В.А. Данилов, И.Д. Ракитин,
ОАО "СНИИП", 123060, Москва, ул. Расплетина, 5
Поступила в редакцию 22.07.2009 г.*

Разработана технология, создающая удобную среду для коллективного решения на распределенной многопроцессорной вычислительной системе (РМВС) с супер-ЭВМ глобальных задач ядерной энергетики (ЯЭ) с максимальным использованием накопленных знаний и программных разработок, которые получили широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом. Она также создает удобную среду для новых программных разработок решения задач с углубленным моделированием различного рода физико-технических процессов в объектах ЯЭ.

Ключевые слова: многопроцессорные вычислительные системы, супер-ЭВМ, вычислительный объект, программные комплексы, интеллектуальная оболочка, распределенная библиотека прикладного программного обеспечения.

Technology of Development of the Distributed Computing Systems on the Basis of the Super Computer for the Decision of Complex Tasks of Nuclear Power. *V.F. Tokarenko, P.N. Alekseev, A.V. Glembotsky, M.I. Gurevich, A.V. Krayushkin, V.I. Lebedev, RRC "Kurchatov Institute", 1, Kurchatov Sq., Moscow, 123182, I.M. Belyakov, A.M. Vargin, O.A. Voronova, Yu.F. Danilov, A.A. Deulin, V.V. Evdokimov, D.V. Kul'neev, P.S. Lobanov, M.S. Samigulin, G.P. Semenov, R.M. Shagaliev, T.V. Shemyakina, RFNC-VNIIEF, 37, Mira Ave., Sarov, Nizhni Novgorod region, 607188, V.A. Danilov, I.D. Rakitin, JSC "SNIIP", 5, Raspletina St., Moscow, 123060.* It is developed the technology creating the comfortable environment for the collective solving on distributed multiprocessor computing system with super computer the global problems of nuclear power with maximal use of saved up knowledge and codes which are widely used as in our country and abroad. This technology also creates the suitable environment for new codes development for solving the tasks with the profound modeling the various physical-technical processes in nuclear power installations.

Key Words: Multiprocessor Computing Systems, Super Computer, Computing Object, Code Complexes, Intellectual Environment, Distributed Library of Applied Software.

1. Применение супер-ЭВМ для решения задач ЯЭ

Крайне важной составной частью исследований и разработок при переходе к будущей крупномасштабной ЯЭ является создание и применение нового поколения компьютерных программ и технологий моделирования сложных систем и производств, основанных на современных методах моделирования и использующих последние достижения в области вычислительной техники (супер-ЭВМ) [1].

Такие программы и технологии моделирования обеспечат оптимальное формирование и построение целостной системы энергетики, ускоренное выполнение графиков проектно-конструкторских работ и заметное сокращение затрат при применении новой технологии проектирования и сопровождения объектов ЯЭ "от колыбели до могилы".

Появится возможность разработки и сопровождения разветвленной компьютеризированной системы поддержки и сохранения знаний. Система управления отраслью

сможет быть поставлена на новый уровень, обеспеченный современными программно-техническими средствами корпоративного управления проектами и способный эффективно поддержать самые амбициозные программы развития.

Необходимость разработки нового поколения математических моделей, баз данных и программ как для системы ЯЭ в целом, так и для отдельных элементов, давно назрела в нашей отрасли. Результаты многолетних научных исследований и разработок, находящихся в фондах конструкторских организаций и научно-исследовательских институтов, содержатся, к сожалению, в виде слабо упорядоченных информационных массивов и приближенных инженерных программ, использующих эмпирические данные.

За рубежом уже несколько лет ведутся работы по направлению Next Generation Simulation Program. Применение современных информационных технологий обеспечивает сохранение и вовлечение в инновационный процесс научно-технического и интеллектуального потенциала.

Опыт использования современных компьютерных технологий в зарубежной ЯЭ показывает перспективу повышения эффективности действующих отечественных ядерно-энергетических систем (ЯЭС) на 15...20 % за счет продления ресурса энергоблоков до 50...60 лет, повышения единичной мощности, повышения КИУМ, улучшения топливоиспользования, оптимизации конструкции ТВС, снижения количества персонала станций и сокращения эксплуатационных затрат.

Без перехода на новый уровень моделирования и проектирования невозможно создать проект конкурентоспособного серийного референтного российского энергоблока большой мощности, удовлетворяющего международным тендерным требованиям; организовать ускоренное выполнение графиков конструкторских работ; осуществить заметное сокращение сроков строительства и капитальных затрат; увеличить экспортный потенциал ЯЭ; успешно осуществить внедрение новой технологической платформы, включающей замкнутый топливный цикл, быстрые реакторы с расширенным

воспроизводством топлива, атомно-водородную энергетику и реакторы-пережигатели долгоживущих РАО; существенно сократить потребление природного газа для целей электроэнергетики и обеспечить сохранение экспортного потенциала России в отношении органического топлива.

Эффективность решения инженерных и научных задач непосредственно зависит от своевременного внедрения инноваций в вычислительную и моделирующую базы. Развитие комплексных моделей процессов и явлений, также как и комплексное моделирование объектов, позволяет проводить детальные исследования без натурных экспериментов.

Особенно это важно там, где натурные исследования не только дороги, но и невозможны, например, при анализе тяжелых аварий или прогнозов состояния ядерных реакторов и систем на дальнюю перспективу. Развитие и применение супер-ЭВМ необходимо как поддержка комплексных моделей процессов и систем, как средство отработки систем и схем управления ядерными энергетическими, в том числе ядерно- и радиационно-опасными объектами.

Цель технологической базы нового поколения – разработка комплексного пакета средств моделирования для проектирования, анализа и инженерно-конструкторской проработки будущих систем ЯЭ с повышенным уровнем безопасности, ускоренными графиками разработки и сниженными затратами на строительство за счет полностью автоматизированного процесса разработки. Рассмотрим основные направления использования супер-ЭВМ для нужд ЯЭ (рис. 1).

Возможности применения супер-ЭВМ покрывают весь временной и пространственный диапазон. Большинство решаемых в ЯЭ задач носит комплексный характер и требует взаимосвязанного решения.

Любой проект требует стержневой глобальной задачи, которая объединила бы вокруг себя усилия разработчиков и принесла существенный экономический эффект при успешной ее реализации. Такой задачей может стать проект комплексного анализа всего топливного цикла (рис. 2).

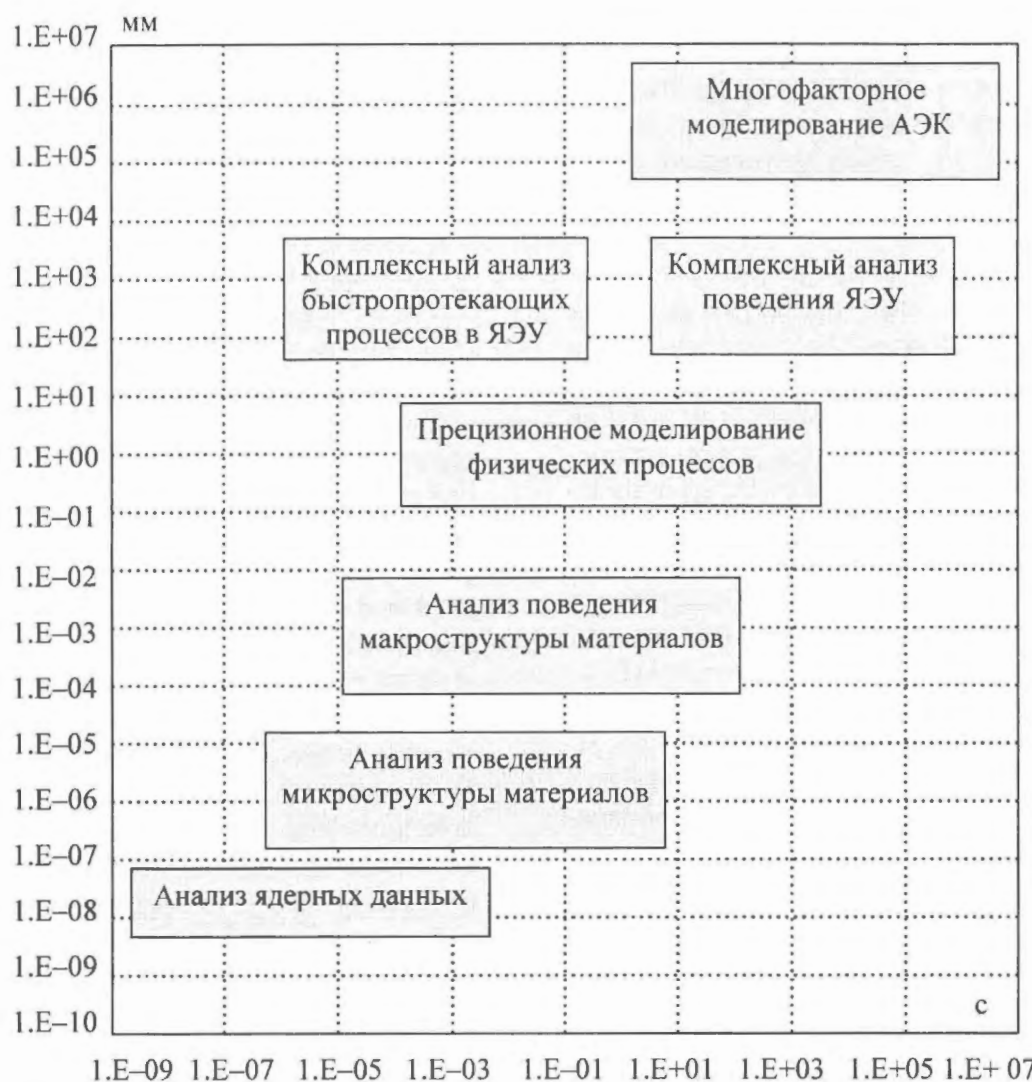


Рис. 1. Возможности применения супер-ЭВМ для нужд ЯЭ: мм – характерные размеры; с – характерные времена; АЭК – атомно-энергетический комплекс

Решение такой задачи создаст эффективную модель топливного цикла, оптимизирует всю систему в целом и каждый элемент в отдельности, что даст большой экономический эффект и повышение конкурентоспособности ЯЭ. Важно отметить целесообразность объединения стадий проектирования и расчетного моделирования систем (рис. 3).

Создание подобных полномасштабных программных комплексов возможно только на базе открытых разноплановых, но связанных систем (среды) моделирования. Такая среда может состоять из РМВС различного типа, включающих супер-ЭВМ и функционирующих в разных операционных системах (ОС).

Важным требованием к среде является возможность ее настройки относительно

простыми средствами на комплексное моделирование таких аспектов, как нейтроника, теплогидравлика, термомеханика и прочность, радиационные и химические процессы, динамика, АСУ ТП, системы контроля и управления, безопасность и др., конкретного объекта на всех этапах его жизненного цикла. Такая система с максимальной эффективностью обеспечит как разработку новых перспективных установок с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах, так и работы по повышению экономической эффективности и безопасности существующих ЯЭУ и ЯЭС.

Первоочередные задачи сегодняшнего дня для системы:

- обоснование продления срока эксплуатации,



Рис. 2. Схема полномасштабного программного комплекса моделирования топливного цикла



Рис. 3. Объединение стадий проектирования и расчетного моделирования систем

- улучшение экономических характеристик,
- повышение безопасности эксплуатации,
- оперативное внедрение современных решений.

Глобальные задачи:

- создание конкурентоспособных проектов;
- инновационное развитие ЯЭ;
- переход к современным технологиям проектирования ЯЭУ за счет повышения точности вычислений и использования более совершенных методов и программных средств нового поколения;
- разработка новых и модернизация действующих АСУ ТП и систем контроля и управления ЯЭС;
- оценка вкладов различных источников и обоснование допустимых погрешностей в расчетах ЯЭУ для сосредоточения на наиболее значимых направлениях, создание инструментов для оценки и ранжирования погрешностей;
- обеспечение качественно нового подхода к реакторному проектированию и повышение конкурентоспособности российских ЯЭУ.

Разработанная в РФЯЦ-ВНИИЭФ "Программа работ по созданию виртуальных объектов АЭК на распределенных МВС с суперкомпьютерами" [2] в основном и нацелена на решение перечисленных задач. По этой программе определены следующие направления:

- 1) Разработка и внедрение в ведущих организациях отрасли технологии удаленного доступа к вычислительным ресурсам ВЦ коллективного пользования ВНИИЭФ, в том числе в защищенном исполнении.
- 2) Создание и адаптация отечественных программных пакетов моделирования замкнутого топливного цикла.
- 3) Создание и адаптация программных пакетов 3D проектирования и расчетного моделирования.
- 4) Разработка программных пакетов нового поколения для прецизионного моделирования РУ различного типа на супер-ЭВМ, создания виртуальных энергоблоков действующих ЯЭС и ЯЭС новых поколений.

5) Опытно-промышленное использование созданных пакетов программ и технологий моделирования на супер-ЭВМ, проектируемых в отрасли.

Разработка новых кодов, ориентированных на современные супер-ЭВМ, является длительным процессом. Поэтому возникла необходимость в создании специальной технологии, с помощью которой можно, применяя существующее верифицированное прикладное программное обеспечение (ППО), приступить к решению вышеперечисленных задач ЯЭ на современных РМВС с супер-ЭВМ. Эта технология создает удобную среду для разработки кодов нового поколения повышенной точности, адаптированных к ОС супер-ЭВМ.

Разработка такой технологии выполнена РНЦ "Курчатовский институт" и РФЯЦ-ВНИИЭФ в рамках Федеральной Целевой Программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы" по контракту "Технология разработки программных комплексов, ориентированных на СуперЭВМ, для исследований функционирования сложных технических систем на всех этапах их жизненного цикла" с Федеральным агентством по науке и инновациям от 18 мая 2007 г. № 02.514.11.4031 [3...6].

2. Технология разработки самонастраивающейся системы решения задач ЯЭ на РМВС с супер-ЭВМ

Предпосылкой разработки технологии, дающей возможность

- легко объединять различное ППО,
- проводить совместные расчеты на РМВС с супер-ЭВМ,
- сохранять закрытость кодов и форматов данных,
- выполнять оценку и прогноз состояния работающих систем,

послужила, как уже отмечалось выше, необходимость при решении задач функционирования сложных технических систем, таких как ЯЭ, на всех этапах их жизненного цикла анализировать разнородные взаимосвязанные физико-химические и механические процессы.

Решение таких глобальных задач не под силу какой-либо отдельной организации, даже обладающей мощными вычислительными средствами. Эти задачи можно решать только путем декомпозиции общей задачи на подзадачи, причем декомпозиция может быть выполнена на уровне моделей как отдельных процессов, так и отдельных явлений, технических объектов, описывающих совокупность процессов.

Разработкой моделей и кодов отдельных процессов занимаются организации отрасли либо смежных отраслей, по роду деятельности которых они нужны. Но такие коды, как правило, не рассчитаны на их использование при решении комплексных задач с взаимосвязанными и разнородными процессами.

Центр моделирования, обладающий супер-ЭВМ, мог бы взять на себя задачу формирования замкнутой модели для решения конкретной проблемы ЯЭ и обеспечение обмена информацией между кодами, моделирующими отдельные физические процессы и явления. Причем глобальная модель по ходу развития процессов должна динамически перестраиваться с подключением или отключением отдельных кодов.

Необходимо, чтобы при включении верифицированного кода в среду супер-ЭВМ он не претерпевал бы каких-либо серьезных изменений, так как при его модернизации могут возникнуть ошибки, которые нарушат точность моделирования. При этом возможны внесения в код дополнительных операторов, которые оптимизировали бы процедуру организации обмена данными между кодами, но не влияли на процесс вычисления. Реализовать перечисленные требования можно, если все задачи по управлению и обмену данными с внешней средой для каждого кода или программного комплекса будут решаться с помощью специальных приставок к коду.

Таким образом, первостепенной задачей разработки технологии является создание совместно с авторами кода для каждого кода (претендента на включение в среду супер-ЭВМ) программной приставки, которая и обеспечивала бы такое включение. При этом каждый участник решаемой проблемы

должен обеспечить настройку своего кода, которая соответствовала бы текущему состоянию моделируемого объекта. Это позволит автоматически подключать код к процессу моделирования в случае возникновения в нем необходимости. Такая технология реализует режимы самонастройки модели на решение конкретной задачи с требуемой точностью.

В разработанной технологии программные приставки к коду названы интеллектуальными оболочками (ИО) кодов. ИО совместно с кодом образует базовый элемент технологии – вычислительный объект (ВО), в котором ИО решает следующие задачи:

- ИО вместе с кодом образует ВО;
- обеспечивает обмен данными;
- вырабатывает общие правила счета и управления кодом;
- производит конвертирование данных.

Коды, для которых созданы ИО, образуют распределенную библиотеку (РБ) ППО, поддерживаемую специальным программным обеспечением (СПО), названным интеллектуальной средой РБППО (ИС РБППО), которая обеспечивает:

- гибкость при объединении независимых программных продуктов для проведения совместных вычислений;
- сохранение закрытости кодов, моделей и форматов данных;
- минимизацию затрат разработчика на внесение изменений в программные продукты для подключения к системе совместных расчетов;
- экономическую заинтересованность разработчика в решении комплексных задач;
- расчеты в вычислительных центрах на супер-ЭВМ с удаленным динамическим контролем;
- динамическую самонастройку расчетной модели на моделируемый процесс;
- кроссплатформенность (Windows, Linux) и поддержку различных языков программирования (C, C++, Fortran, Perl и др.);
- децентрализацию системы обмена для манипулирования большими объемами данных;

- отладку с помощью утилиты "эмулятор" системы взаимодействия кода без участия других реальных кодов участников расчета;
- возможность проведения связанных расчетов с использованием произвольной группы вычислительных систем (ВС) под управлением разных ОС.

Технология реализует следующий алгоритм, изображенный на схеме (рис. 4 – 1-я стр. цветной вкладки), формирования глобальной задачи.

Ставит задачу заказчик, которым могут быть руководство отрасли, главный конструктор объекта либо другие ответственные за разработку и эксплуатацию организации. Поставив задачу, заказчик отдает распоряжение подведомственным организациям обеспечить необходимой информацией соответствующие подразделения разработчиков РБППО, а также дает указания всем заинтересованным организациям принять участие в формировании задачи.

Заказчик уведомляет Центр проведения расчетов о необходимости решения поставленной задачи, после чего Центр принимает непосредственное участие в формировании задачи. На этом этапе проводится декомпозиция общей задачи на подзадачи. Определяются ВС, на которых будут решаться подзадачи, и каналы связи с ними. Когда задача сформирована, на всех ВС создаются макеты, на которых проводится отладка подзадач. Такие макеты могут состоять только из ВО, в которых вместо кодов включены их имитаторы. Настройка и отладка кодов независимо могут проводиться их разработчиками либо держателями.

После завершения макетирования и отладки кодов их исполняемые файлы по каналам связи передаются в соответствующие ВС, где они включаются в ВО вместо имитаторов. В процессе моделирования непосредственное участие принимают через удаленную связь держатели кодов. Полученные результаты моделирования после постобработки (это отдельная задача, которая выполняется специальной системой) поставляются заказчику, а также всем заинтересованным организациям по разрешению заказчика. Система допускает через

удаленную связь участие заказчика в процессе моделирования.

Такая схема организации подготовки задач и проведения расчетных исследований позволит при решении глобальных задач ЯЭ использовать все необходимые ресурсы от исходных данных и специалистов до соответствующего программного обеспечения и вычислительных ресурсов.

2.1. Архитектура РМВС

Основные требования к аппаратной структуре РМВС для данного проекта:

- возможность выполнения на максимально широком классе РМВС;
- поддержка выполнения как 64-разрядных приложений, так и 32-разрядных последовательных приложений пользователей;
- применение в качестве вычислительных узлов многопроцессорных (многоядерных) модулей с большой оперативной памятью, достаточной для эффективного выполнения последовательных приложений.

Традиционная структурная схема РМВС, удовлетворяющая требованиям данного проекта, представлена на рис. 5 (1-я стр. цветной вкладки) и предполагает, что вход в ВС, разработку, отладку, запуск программ (приложений) на счет и контроль их выполнения пользователи осуществляют из инструментальной подсистемы (FrontEnd/Servises/...) РМВС.

Инструментальная подсистема включает инструментальные серверы, включенные в файловую и управляющую коммуникационные подсистемы (или просто имеющие какой-то сетевой доступ к файловым и управляющим серверам ВС). Основное назначение инструментальных серверов – трансляция, отладка заданий, подготовка к счету и запуск для исполнения в вычислительной подсистеме ВС. ПО инструментальной подсистемы включает набор компиляторов для языков С, С++, Фортран, коммуникационные библиотеки (MPI), средства отладки и профилирования для последовательных и параллельных приложений.

Управляющая подсистема включает в себя управляющие серверы и обеспечивает:

- управление ресурсами РМВС (мониторинг состояния, распределение узлов вы-

числительного поля параллельным и последовательным приложениям);

– систему управления заданиями, которая осуществляет планирование заданий пользователей на выполнение (ввод заданий с инструментальной подсистемы, распределение по вычислительной подсистеме, загрузка, управление, прекращение, завершение заданий и т.п.).

Файловая подсистема состоит из файловых серверов и файловой коммуникационной подсистемы, соединяющей файловые серверы с вычислительными узлами. Данная структура обеспечивает равный по скорости доступ процессов параллельного приложения к файлам, расположенным на файловых серверах РМВС с использованием стандартного сетевого протокола (NFS) и в параллельной файловой системе на файловых серверах под управлением параллельной файловой системы (PFS).

В данной схеме выполнение всех пользовательских процессов параллельных и непараллельных приложений осуществляется на счетных узлах вычислительного поля.

Базовый вариант операционной системы РМВС – ОС Linux с программным обеспечением для коммуникационной среды, файлового, управляющего и иного сервиса.

Основные требования к системному ПО РМВС:

– возможность разработки, отладки, профилирования последовательных и параллельных приложений для языков C, C++, Фортран;

– возможность разработки (инструментальные средства) и выполнения (на вычислительных узлах) как 64-разрядных приложений, так и 32-разрядных последовательных приложений пользователей;

– коммуникационные библиотеки, соответствующие стандарту MPI-1 или выше;

– возможность разработки (инструментальные средства) и выполнения (на вычислительных узлах) приложений, использующих стандартные средства POSIX IPC взаимодействия процессов внутри узла;

– возможность динамической загрузки процессом дополнительных библиотечных модулей (SO модули, аналог DLL в ОС Windows) на вычислительные узлы в про-

цессе выполнения параллельного приложения;

– поддержка xml;

– поддержка запуска специализированного пакета задания, состоящего из множества параллельных и последовательных задач разных пользователей с указанием соседства (указанные процессы должны выполняться на одном узле) процессов различных задач. Как дополнительная возможность – реализация динамической загрузки новых параллельных и последовательных задач разных пользователей с указанием соседства из выполняемого параллельного приложения.

РМВС может состоять из компьютеров различных классов, объединенных через Интернет по закрытым каналам. Примерная схема РМВС, приведенная на рис. 6, способна в настоящее время обеспечить решение комплексных задач ЯЭ по вышеописанному алгоритму. Рассмотренная РМВС состоит из компьютеров разных классов и под управлением различных ОС.

Базовой в этой системе является супер-ЭВМ РФЯЦ-ВНИИЭФ как наиболее мощная. Она может взять на себя наиболее сложные по вычислительным затратам задачи. РИЦ “Курчатовский институт”, РФЯЦ-ВНИИТФ, РАН, СПбГУ, МГУ на базе супер-ЭВМ могут обеспечить всесторонний анализ эффективности и безопасности перспективных энергоблоков, а также разработку эффективной модели топливного цикла.

Подключение к системе рабочих станций проектных организаций позволяет реализовать вторую, определенную в разделе 1, глобальную задачу – объединение стадий проектирования и расчетного моделирования. В комплексном моделировании могут принимать участие и организации, не обладающие высокопроизводительной вычислительной техникой, но являющиеся разработчиками либо держателями кодов, которые могут быть использованы в комплексе. Они могут отладить коды на собственных компьютерах и передать их исполняемые файлы для включения в систему, а затем по каналам связи отслеживать их функционирование и при необходимости вносить соответствующие коррективы.

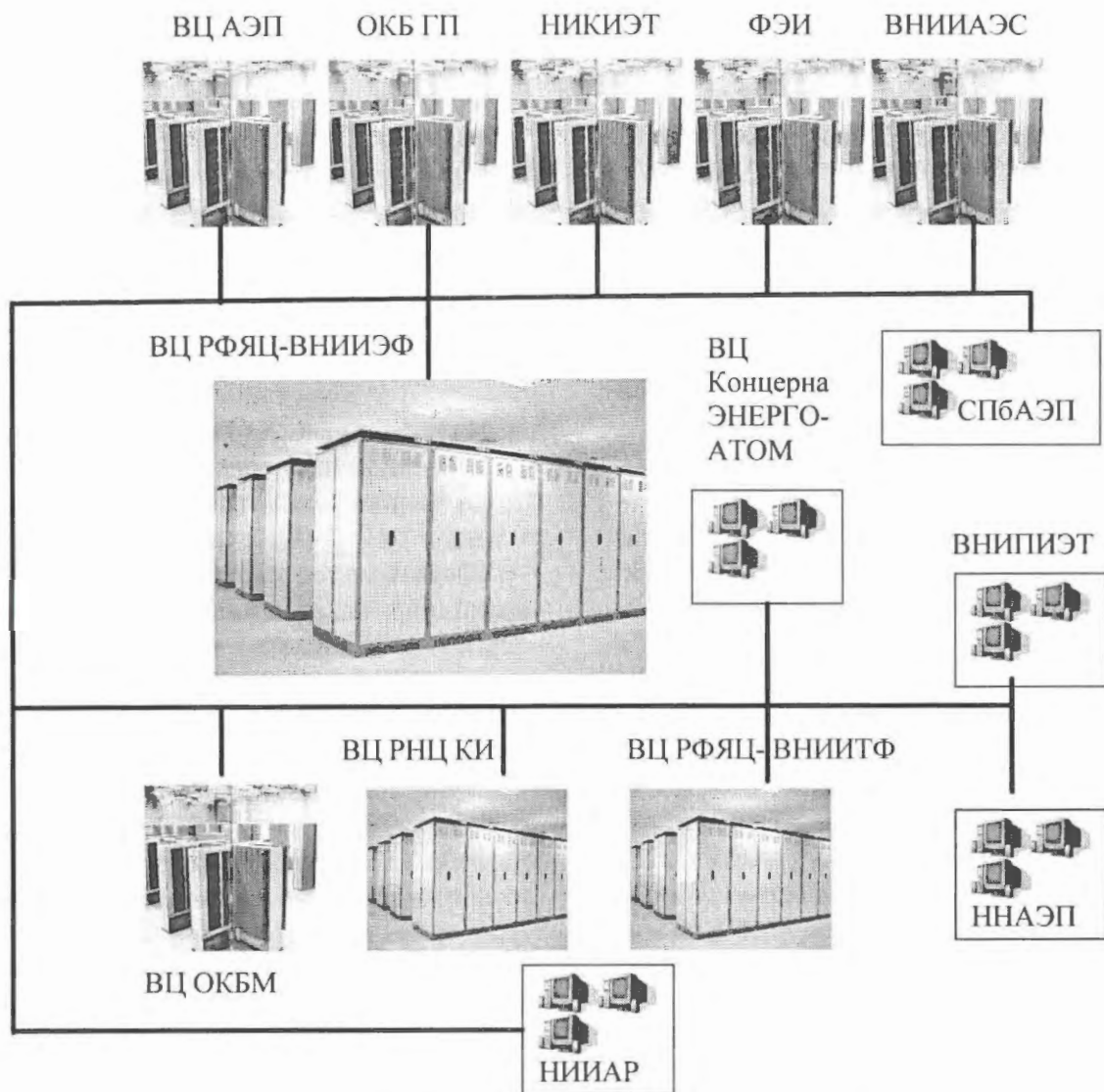


Рис. 6. РМВС для решения комплексных задач ЯЭ

2.2. Вычислительный объект

Базовым элементом технологии служит ВО, представляющий собой один виртуальный макропроцесс, состоящий из группы взаимодействующих процессов для моделирования одного класса физического процесса, объекта или явления.

Для каждого ВО, включенного в систему, введен ряд атрибутов или паспорт ВО, характеризующих процесс с этим кодом во время совместного счета, например, следующие параметры:

- класс физического кода (т.е. способность к моделированию определенного круга физических явлений, например, перенос нейтронов или теплогидравлика);
- собственный идентификатор кода;

- ряд параметров, определяющих область применимости данного кода.

Все эти параметры известны (или зашиты) в ИО кода, которая рассылает их другим ВО и контролирует выполнение кодом расчета, например, при выходе какого-либо из параметров за пределы допустимых для кода значений ИО останавливает процесс счета этим кодом и сообщает об останове всем другим ВО.

Все макропроцессы ВО запускаются и в режиме коллективных коммуникаций обмениваются паспортами и специальными файлами-описателями задачи. По информации, содержащейся в описателях, каждая ИО определяет ВО, с которым ей необходимо установить двухточечную связь. Этот этап обеспечивает формирование необходимой информации для связанного расчета. ИО

каждого кода должны знать, по каким адресам посылать массивы данных при обмене информацией между физическими кодами и все ли физические процессы запущены для начала связанного расчета. Таким образом, реализуется самонастраивающаяся расчетная модель.

Все запущенные макропроцессы ВО могут функционировать как в режиме двухточечной связи, так и в ждущем режиме, если они не подключены к модели. Для ВО в режиме двухточечного обмена синхронизацией выполнения процессов, корректировкой выбора временных шагов (шагов физического времени моделирования), организацией обменов информацией между различными физическими процессами занимаютсЯ ИО каждого ВО.

Реализованная концепция организации системы интеграции кодов допускает возможность различного способа организации моделирования связанных физических процессов:

- на каждом временном шаге в процессе решения связанной задачи последовательно рассчитываются значения физических величин в каждом коде ВО. По окончании расчета шага каждый код через свою ИО передает в следующий код новые значения своих величин на этом шаге, служащие исходными данными для расчета шага в следующем коде;

- все коды работают на временном шаге параллельно. В качестве исходных они используют значения величин, относящихся к другим кодам, с предыдущего шага по времени. В этом случае по окончании временного шага все коды обмениваются друг с другом данными для продолжения счета на следующем шаге.

ВО выполняет следующие функции:

- проводит численное моделирование своего физического процесса (процессов);
- обменивается с другими ВО, участвующими в расчете, управляющими и синхронизирующими сообщениями (например, величина прогнозируемого шага по времени, сообщение об останове кода по выходу значения за пределы допустимого и т.п.);
- в соответствии с управляющими директивами проверяет те или иные условия и

сообщает об их выполнении (например, команда на запись разреза для последующего продолжения счета);

- на шагах по времени обменивается данными с другими ВО.

При достижении каким-либо кодом границы определения соответствующая ИО групповой рассылкой выдает команду на прекращение процесса моделирования. В режиме групповой рассылки ВО обмениваются паспортами и описателями, устанавливают новые двухточечные связи между ВО.

Между отключенными и подключенными к модели ВО в автономном итерационном режиме выполняется синхронизация по входным и выходным данным. Во время синхронизации все остальные ВО модели находятся в ждущем режиме. После выполнения синхронизации ИО подключенных ВО в режиме группового обмена рассылают команды всем ВО на продолжение счета. Отключенные ВО остаются функционировать в ждущем режиме. Таким образом реализуется режим динамической перестройки модели.

Выше обсуждалось, что основная цель создания данной системы – объединение в единый программный комплекс программ, отдельных физических процессов комплексной задачи, созданных различными коллективами исполнителей. Разумеется, каждая из таких программ поддерживает собственную структуру данных, как правило, существенно отличающуюся от других программ. В то же время большинство расчетов требует в процессе счета обмена данными между кодами, моделирующими отдельные физические процессы.

В таких случаях всегда возникает проблема либо преобразования информации из одного формата в другой, либо применения некоего стандартного формата данных. В этой версии системы интеграции принимается, что каждый код сохраняет собственную структуру данных. Задачу преобразования структуры данных при обменах с другими кодами выполняют специальные конверторы, которые входят в состав ИО соответствующих кодов. Отметим, что все обмены между ВО производятся с помо-

щью процедур библиотеки MPI и контролируются ИО.

На этапе регулярного счета каждый ВО может посылать другому коду физические данные в конце своего шага по времени. Перед посылкой данных ВО посылает управляющее сообщение. В данной версии системы интеграции кодов принято, что все процессы конвертации отправляемых и принимаемых данных являются функцией ИО. Выходной конвертор преобразует данные из внутренних представлений кода (именование массивов, их структура, используемые размерности величин и т.п.) к некоторому стандартизованному представлению этих данных, при этом сохраняя внутреннюю структуру информации (например, счетные сетки). Входной конвертор, получая информацию в стандартизованном формате от другого ВО, конвертирует данные (как правило, с переинтерполяцией) во внутренние массивы своего счетного кода (например, с одной счетной сетки и с переводом в нужные размерности величин).

В начале шага коды получают от своих ИО (которые уже обменялись между собой сообщениями и выработали следующий шаг обмена и необходимость каких-либо глобальных действий типа запись контрольной точки файла-разреза информации для продолжения счета) управляющее сообщение, содержащее следующие параметры: физическое время, на которое должен выйти код, и информацию о признаках глобальных действий.

Коды обмениваются информацией в точках синхронизации, которые могут быть как локальными (для обмена информацией между двумя кодами), так и глобальными (помимо обмена информацией коды создают контрольные точки для возможного возобновления счета).

Коды обмениваются информацией со своей ИО, используя специально разработанные API-функции (Application Program Interface). ИО кода осуществляет управление счетом для кода и вырабатывает моменты глобальной и локальной синхронизации. Код производит расчет моделируемых им процессов до назначенного ИО момента времени.

В реализованной версии технологии ИО обеспечивают выполнение следующих функций:

- взаимодействие кода и ИО кода с помощью API-функций;
- обеспечение точек синхронизации для двухточечного обмена информацией между кодами;
- получение и передача обменных функций кода;
- управление кодом для выхода на очередную точку синхронизации;
- управление кодом в глобальных точках синхронизации (запись контрольных точек для продолжения расчета и т.д.);
- вызов соответствующих конверторов для преобразования информации к внутреннему виду кода.

Передача и прием информации в системе взаимодействия разнородных кодов осуществляются в векторном виде. При этом каждый код со своей ИО выступает в двух ипостасях: поставщик и получатель информации.

Чтобы разнородные коды свободно обменивались информацией, создана система конверторов данных. Реализованы стандартные входные и выходные конверторы, но также оставлена возможность подключения специфического конвертора для кода (рис. 7).

Выбор и загрузка конверторов производится динамически средствами ИО соглас-



Рис. 7. Структура конвертора

но информации, указанной в файле-описателе ВО. Для каждой загружаемой копии конвертора существует свой конфигурационный файл, который загружается и обрабатывается средствами ИО, и содержащаяся в нем информация передается в конвертор через специальные подпрограммы ИО.

При работе с поставщиком информации конвертор кода преобразует обменные функции из внутреннего представления данных величин в коде в общепринятый формат. Но при этом обменные функции отправляются на сетку кода отправителя. При работе с получателем информации конвертор кода преобразует полученные обменные функции к внутреннему представлению данных величин в коде.

Для корректной работы связанной системы поставщик и получатель информации имеют четкое представление, с какими физическими величинами они работают и к какому объекту моделирования они относятся. Таким образом, для каждого вектора определена следующая служебная информация:

- длина вектора обменной функции;
- физический смысл обменной функции (ключ из единого словаря имен физических функций);
- точка привязки вектора обменной функции;
- информация о сетке, на которой передается обменная функция.

Для работы конверторов приняты два постулата:

- для всей задачи задана общепринятая карта привязки (например, применение нумерации, введенной разработчиками РУ);
- задан единый словарь описания обменных функций.

Код-поставщик информации данных формирует их для отправки в используемых им размерностях. Данные формируются на собственной сетке кода с использованием понятной коду точки привязки. После отправки данных в ИО поставщика они попадают в выходной конвертор, выполняющий над полученными данными следующие операции:

- приведение к общепринятым физическим величинам, указанным в едином

словаре физических функций для данной обменной функции;

- пересчет точки привязки на общепринятую обменную карту.

Данные, доставленные в буфер ИО получателя, хранятся там до запроса, полученного для этих данных от кода получателя. После поступления запроса о данных в ИО он попадает в выходной конвертор, который пересчитывает точку привязки на общепринятую карту. ИО производит поиск во входном буфере данных с соответствующей парой (обменная функция, точка привязки) и отправляет их на обработку во входной конвертор. Здесь производятся следующие операции:

- пересчет точки привязки с общепринятой обменной карты на точку привязки кода получателя;
- пересчет физических величин на величины, принятые в коде получателя;
- интерполяция полученного вектора на сетку кода получателя.

После удачного завершения всех вышеуказанных операций данные доставляются коду получателя.

Разработаны два метода подключения кода к ИО: прямой и через программу-обертку. В прямом методе код подключается к ИО через ее API-функции. Схематично метод подключения изображен на рис. 8.

Среди множества различных средств межпроцессорного взаимодействия для обмена данными между ИО и кодом выбраны именованные каналы. FIFO подходит для решения поставленных задач передачи дан-

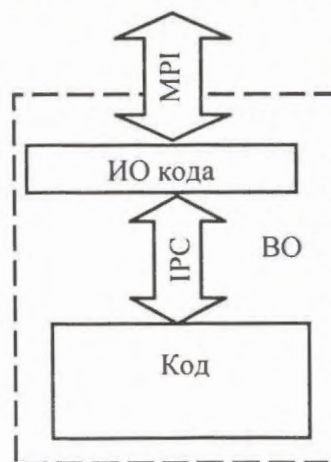


Рис. 8. Прямое подключение кода к ИО через API-функции

ных, являясь при этом легким и удобным в обращении средством.

Именованные каналы обладают рядом преимуществ по сравнению с другими средствами межпроцессорного взаимодействия в рамках поставленных требований к свойствам системы. FIFO обеспечивают взаимодействие неродственных процессов, не требуя реализации механизма контроля доступа к общим ресурсам, так как системные операции `read(2)` и `write(2)` являются атомарными. Именованные каналы со стороны разработчиков ПО ИО реализуют поддержку выполнения задач как 32-, так и 64-разрядных приложений.

Так как FIFO – однонаправленный канал, то для передачи и пересылки данных создаются, как минимум, два канала. Также код и ИО обмениваются служебной информацией для организации контроля над приемом/передачей данных для синхронизации и других целей. Поэтому созданы еще два канала для обмена сервисной информацией. Структуру связи между ИО и кодом можно представить схемой, изображенной на рис. 9.

Любое взаимодействие ИО и исполняемого кода (получение следующей глобальной точки синхронизации, определение дальнейших действий и др.) сводится к процедурам передачи и приема данных. Опишем принцип этих процедур в точке синхронизации. Через сервисный канал FIFO_SERV2 задача сообщает ИО о характе-

ре своих действий, а именно, что она хочет: передать или получить данные. Отдельный поток ИО, прочитав пожелания задачи и в зависимости от них, или принимает от нее данные, читая канал FIFO_DATA2, или после конвертации данных из общего вида к виду задачи передает их ей, записывая в канал FIFO_DATA1, если таковые имеются.

Следует отметить, что если задача требует данные, которые еще не доставлены, то ИО через сервисный канал FIFO_SERV1 сообщает приложению о невозможности завершить операцию, что приводит к блокировке исполняемого кода. Блокировка снимается при поступлении в сервисный канал FIFO_SERV1 сообщения о наличии данных, далее задача производит чтение данных из канала FIFO_DATA1. Тем самым может возникнуть нежелательная блокировка взаимодействующих компонентов общей системы при использовании блокирующих типа точка-точка API-функций `pss_put_data(...)` и `pss_get_data(...)`. Такая ситуация исключается, если сначала передаются все физические данные и лишь потом начинается прием.

Подключение через программу-обертку. При создании ВО не исключено возникновение ситуации, когда изменение исходных кодов невозможно или является нежелательным по каким-либо причинам. Подобная ситуация может коснуться в первую очередь кодов, которые рассчитывают только один шаг. Данного типа коды при-

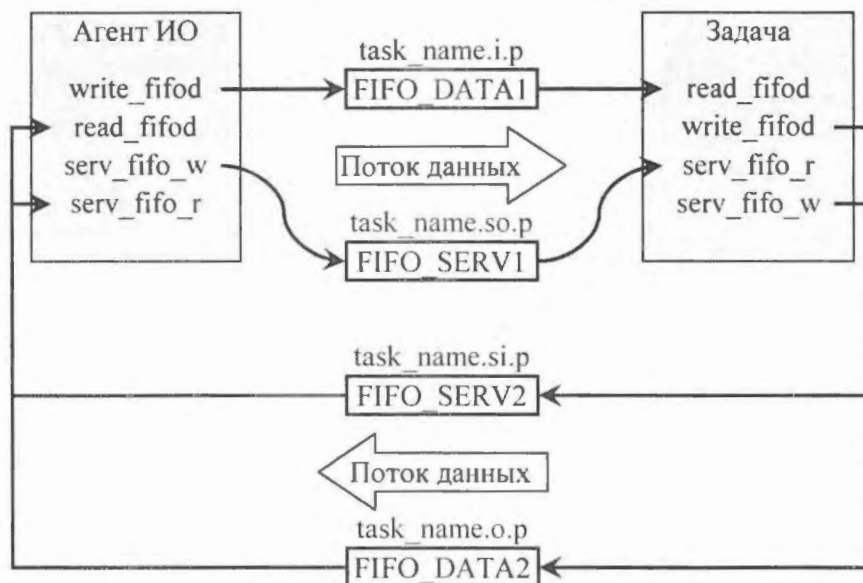


Рис. 9. Структура связей между агентом ИО и исполняемым кодом

меняют, как правило, файлы для считывания или выдачи физических данных, имеющих определенный формат. Таким образом, для подключения этих расчетных кодов к ИО возникает необходимость в новом инструменте, реализация которого возможна при использовании оберток API-функций под Perl. Данный язык представляет собой удобное средство для работы с файлами и со строками, что послужило основным фактором для выбора. Схематично созданный ВО с помощью программы-обертки изображен на рис. 10.

Расчетные коды вызываются из программы-обертки Perl. Perl-обертка производит инициализацию кода в системе ИО вызовом PSS_INIT(...), получает входные данные через ИО и подготавливает их для кода вызовом PSS_GET(DATA) и SET_DATA(DATA), запускает сам код вызовом EXEC(PROGRAM), обрабатывает его выходные данные и передает их через ИО вызовом GET_REZULT(REZ) и PSS_PUT(REZ,...), также получает информацию по синхронизации семейством вызовов, объединенных под одним названием PSS_SYNC(...), и завершает взаимодействие с ИО вызовом PSS_FIN(...).

2.3. Состав и структура ИС РБППО

В данном разделе описаны основные функциональные возможности текущей



Рис. 10. ВО, созданный с помощью программы-обертки

реализации СПО РБППО. Полное описание ИС РБППО изложено в следующей статье этого же сборника.

Основные свойства системы:

- масштабируемость – возможность использования под "одну" задачу полного вычислительного поля PMBC. В реализации системы применяются программные технологии (MPI), обеспечивающие максимально возможные характеристики по эффективному взаимодействию ВО с использованием коммуникационной среды PMBC;
- поддержка выполнения в рамках задачи как 32-, так и 64-разрядных приложений;
- интерфейс связи с приложениями на языках Fortran, C, C++;
- текущая поддержка "стандартного" варианта СПО PMBC и возможность настройки на любой класс СПО PMBC;
- использование удобных системно-сервисных (GUI) программ в части интеграции ВО в задачу;
- поддержка выполнения в рамках задачи как параллельных приложений ВО, так и последовательных.

ИС РБППО разработана как программный пакет PSS (Parallel Scalable Suit), который включает в себя следующие компоненты:

- базовая библиотека функций (PSS_API) – API пользователя (разработчика ВО) к функциям взаимодействия вычислительных кодов с ИО, предназначенная для разработки программ на языках программирования C, C++ и Fortran;
- библиотека низкоуровневых функций (PSS_LAPI) – API разработчика компонент ИО, в частности, специализированных конверторов, загружаемых как динамические модули в ИО ВО, предназначенная для разработки программ на языках программирования C, C++;
- пакет системно-сервисных приложений и утилит (PSS_UTIL) – набор программ и утилит, упрощающих разработку и сопровождение программ в среде пакета PSS.

Для кодов ВО, функционирующих в рамках РБППО на мультипроцессорных ВС под управлением ОС Linux/Unix, создана технология разработки и отладки параллельных приложений для мультипроцес-

сорных ВС, функционирующих под управлением ОС семейства Linux/Unix, в среде ОС Windows на ПЭВМ разработчика программ. Для этого разработаны инструментальные средства отладки и профилирования параллельных MPI-программ и собственная версия WMPI библиотеки MPI для ОС Windows, что позволяет проводить начальную разработку и отладку параллельных программ на рабочих станциях пользователей.

Основные преимущества данной технологии:

- нет необходимости в использовании дорогостоящих ресурсов параллельной вычислительной ЭВМ;
- доступность;
- наличие развитых сред программирования, предоставляющих графический GUI интерфейс;
- ускорение сроков разработки приложений.

Условно процесс отладки можно разбить на две составляющие:

- отладка непосредственно самого кода ВО с применением имеющихся инструментальных средств в среде разработки приложений;
- отладка правильности функционирования кода ВО в процессе выполнения в рамках РБППО.

2.4. Моделирующий комплекс

Пользователи РМВС, выполняющие расчеты своих приложений, авторизуются на РМВС традиционным для семейства ОС Unix способом с использованием уникального символьного имени (login) и пароля. Символьному имени пользователя РМВС присваивается уникальное число – идентификатор пользователя (UID), а сам пользователь имеет принадлежность к группе пользователей, которой присваивается свой идентификатор (GID), в соответствии с которым пользователи получают доступ к данным.

Следует иметь в виду, что пользователь может иметь принадлежность к нескольким группам. Как правило, данные пользователей из отдельной группы защищены от доступа из другой группы. Эта политика при-

емлема для выполнения отдельных приложений, которые не применяют данных других пользователей. В проекте предполагается проведение "связанных" расчетов с использованием общих для расчета файлов-описателей задачи. Поэтому в данной реализации предусматривается создание отдельной группы для всех пользователей, принимающих участие в расчете по данной технологии.

Следует отметить, что пользователи данной единой группы могут иметь как личные (доступные только данному пользователю), так и общие данные (доступные всем членам данной группы).

Рабочие каталоги ВО. Разработка вычислительных кодов ВО может осуществляться пользователем РМВС в его собственном рабочем каталоге (например, в каком-либо подкаталоге домашней иерархии пользователя) и иметь статус личных данных этого пользователя, которые могут быть недоступны остальным членам группы.

Для проведения "связанных" расчетов необходимо создание рабочих каталогов, статус данных в которых является общим для членов данной расчетной группы. Поэтому предполагается для проведения расчета выделение специальных рабочих каталогов ВО, в которых располагаются файлы данных, необходимые для проведения данного типа расчета, и собственно исполнимый модуль вычислительного кода ВО.

Метаинформация ВО. Для каждого ВО, включаемого в систему, разработчиками системы или разработчиком данного ВО подготавливается паспорт ВО, который характеризует данный ВО. Как правило, паспорт ВО готовится один раз и является неизменным для всех задач, использующих данный ВО. В текущей реализации в паспорте ВО указываются следующие параметры:

- уникальное имя, под которым он идентифицируется в системе;
- класс физического кода;
- параллельный или последовательный код;
- версия данного кода;

- параметры, определяющие область применимости данного кода.

Данные паспорта ВО используются ИО системы при ее инициализации. Паспорт подготавливается в формате xml либо с помощью графического приложения GenPassport, либо в обычном текстовом редакторе.

Данные паспорта являются, как правило, неизменными, а для конкретного расчета могут изменяться в зависимости от типа задачи, в которой используется данный ВО. Поэтому параметры описания ВО для конкретного задания могут быть выделены в отдельный файл либо быть составной частью паспорта.

Файл описателя ВО подготавливается, как и паспорт, в формате xml либо с помощью графического приложения GenDescriptor, либо в обычном текстовом редакторе. Данные описателя ВО применяются ИО системы при ее инициализации для установки требуемых связей (каналов) с другими ВО данной задачи.

Для предварительной проверки корректности параметров паспортов и описателей ВО в рамках полной задачи осуществляется контроль программой статического анализа данной метаинформации (StatCheck). В первой фазе анализа выполняется синтаксический анализ параметров и их значений, а во второй фазе – проверка полноты информации для инициализации и связывания ВО в данной задаче.

Применение программы статического анализа позволяет на начальном этапе подготовки задания (подготовке метаинформации и всех ВО задачи) избежать использования дорогостоящего времени РМВС и применять РМВС только для отладки задачи на последующих вычислительных этапах.

Традиционно на РМВС распределение ресурсов, запуск задач на счет и управление их выполнением осуществляются одной из компонент СПО РМВС – системой управления заданиями (СУЗ). Наиболее сложной частью СУЗ является система планирования и распределения ресурсов для потока параллельных приложений. Например, ресурсы вычислительного поля РМВС – динамические, т.е. не исключается воз-

можность вывода части ресурсов РМВС на профилактику или ремонт. При этом оставшиеся вычислительные ресурсы РМВС достаточны для выполнения требуемой задачи.

Другим примером повышения эффективности применения вычислительных ресурсов РМВС служит архитектурно-зависимое распределение ресурсов под конкретное параллельное приложение. В данном случае СУЗ распределяет ресурсы в соответствии с геометрией параллельного приложения, учитывая при этом и базовые требования по производительности узла и оперативной памяти.

В нашем случае счет "связанного" потока задач представляет еще более сложную задачу. Поэтому в рамках данного проекта используется "интеллектуальная" функциональность СУЗ РМВС с расширением за счет вновь разработанных программных компонент (программы-генераторы управляющих команд СУЗ), которые решают "привязку" РБППО к СУЗ конкретной РМВС.

Использован СУЗ на базе PBS (Portable Batch System). Ее коммерческий вариант – PBS/Pro, открытая версия (Open Source) – OpenPBS, ее дальнейшее развитие для больших РМВС – TORQUE. Другие известные нам СУЗ – LSF (Platform Computig), SGE (SUN), LL (IBM), SLURM (LLNL) и другие имеют в требованиях данного проекта аналогичную СУЗ PBS функциональность. Их основное отличие в языках описания заданий на выполнение. Поэтому разработанные в рамках данного проекта программы-генераторы управляющих команд СУЗ легко модифицируемы в части настройки на конкретные СУЗ, применяющиеся на исполнительной РМВС.

Программы-генераторы управляющих команд (StartPSS) осуществляют подготовку файлов сценариев на запуск ВО и ИО задачи через СУЗ. На первом этапе осуществляется подготовка сценариев запуска собственно вычислительных приложений ВО как параллельных, так и последовательных, с описанием требуемых для их выполнения ресурсов. Данная информация о ресурсах приводится в метаинформации

описания ВО задач или задается в параметрах конфигурационного файла программы StartPSS.

После выполнения распределения ресурсов для всех ВО задачи и их запуска средствами СУЗ осуществляется подготовка сценария запуска параллельного MPI-приложения ИО задачи и его загрузка на вычислительные узлы, исполняющие вычислительные приложения ВО. На этом этапе загрузки "связанной" задачи завершается. Управление выполнением задачи осуществляется стандартными средствами данной СУЗ, например, послать требуемый сигнал вычислительному приложению, посмотреть используемое приложением время CPU и др.

Для принудительного удаления задачи, находящейся в состоянии счета, т.е. удаления всех приложений данной задачи (ВО, ИО) системными средствами, применяется команда KillPSS.

Общую структуру моделирующего комплекса на супер-ЭВМ и на РМВС с супер-ЭВМ можно представить следующим образом. ВО обмениваются данными через ИО в среде MPI. На супер-ЭВМ структура комплексной задачи из ВО может быть представлена в виде схемы, изображенной на рис. 11. В случае проведения расчета на

нескольких ВО, объединенных в сеть, существует возможность связывания через систему "шлюзов" (рис. 12).

2.5. Проведение с помощью разработанной технологии демонстрационных расчетов

На примере РБМК с помощью разработанной технологии, используя существующие коды различных организаций, созданы программные комплексы для супер-ЭВМ расчета нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне реактора. Используются коды STEPAN и КОБРА [7], MCU [8] (разработки РНЦ "Курчатовский институт"), KORAT [9], PATEG [10] (разработки РФЯЦ-ВНИИЭФ), SimWorT 3D Viewer (SimPort разработки ЗАО НПП "Интердум") [11]. Для каждого кода созданы ИО. Все коды, за исключением MCU, подключены к ИО напрямую через API-функции оболочек. Код MCU подключен через программу-обертку, с помощью которой реализуется настройка входных и выходных данных.

Подключенные к ИО исполняемые файлы кодов, за исключением SimWorT 3D Viewer, образовали из ВО в программной среде супер-ЭВМ (Linux) РБПО (версии 1) моделирования нейтронных, теплогидрав-



Рис. 11. Структура комплексной задачи на супер-ЭВМ

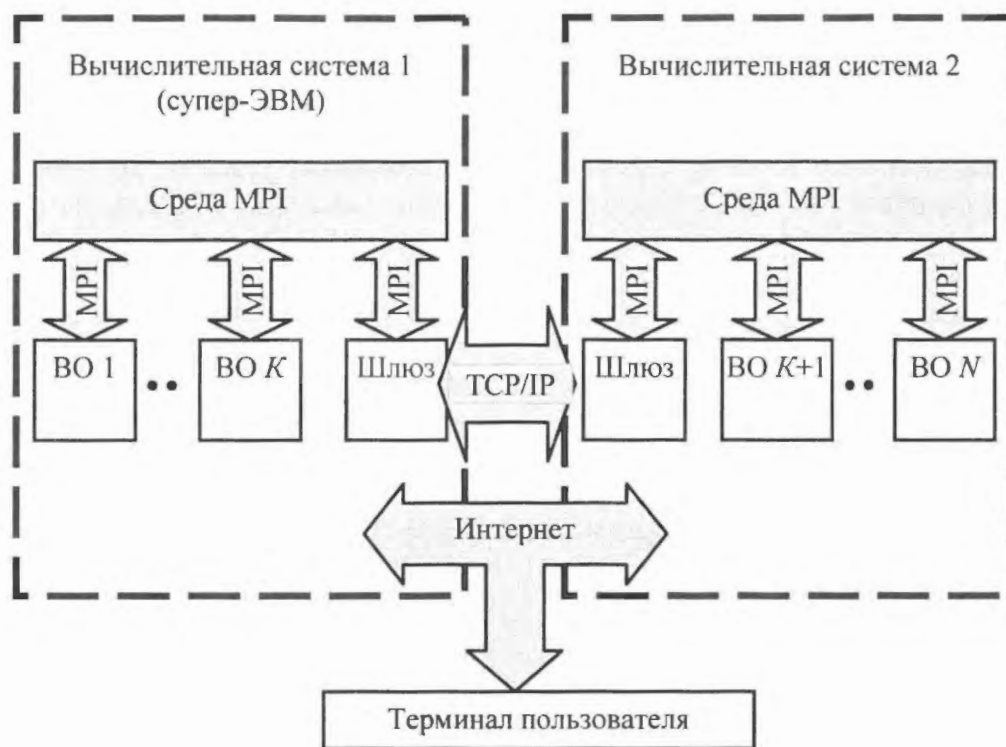


Рис. 12. Структура комплексной задачи на PMBC

лических процессов в активной зоне РБМК. VO SimWorT 3D Viewer обеспечивает в режиме on-line визуализацию результатов моделирования на удаленных вычислительных системах (под Windows). Ниже описана технология создания ВО, сборки вычислительных комплексов моделирования процессов в активной зоне РБМК и объектах энергоблока, визуализации процессов моделирования на удаленных компьютерах и результатов расчета.

Основная задача раздела – наглядно продемонстрировать, как с помощью разработанной технологии можно создавать программные комплексы расчета различного рода процессов в изучаемых объектах. Одним из таких объектов может быть полячейка активной зоны реактора.

В качестве полячейки выбраны четыре смежных канала РБМК, помещенные в графитовые блоки. В каждом канале находится ТВС, состоящая из 18-ти твэлов. Граничные условия по нейтронам в полячейке приняты следующие: на боковой поверхности – трансляционная симметрия, верхняя и нижняя – черная поглощающая поверхность.

Граничные условия по теплоносителю: на входе в каналы – температура и расход,

на выходе – давление. Расчет на критичность полячейки выполнен с учетом изменения температуры и плотности материала, для чего создан вычислительный комплекс из ВО с кодом MCU и ВО с кодом РАТЕГ. Управление и обмен данными с кодом MCU реализованы через программу-обертку Perl-обертка в ИО MCU.

Кратко изложим алгоритм работы кода MCU со своей ИО через программу-обертку, которая применяется для реализации обмена данными между расчетными кодами MCU и РАТЕГ, а также запускает код MCU. Обертка содержит функции `set_data()`, `get_fin_data()`, `exec_cmcu()` и основной блок, в котором вызываются данные функции и функции обмена данными с кодом РАТЕГ. Функция `set_data()` производит запись полученных от РАТЕГ данных в файл конфигурации кода MCU, функция `exec_cmcu()` – запуск MCU, а функция `get_fin_data()` выполняет чтение данных из файла результатов кода MCU для последующей их отправки в код РАТЕГ. Всего происходит четыре обмена данными, результаты по некоторым из них представлены ниже.

ВО MCU получает от ВО РАТЕГ следующий excel файл с температурами топлива и теплоносителя и плотностью теплоносителя. Принимается, что температура и плот-

ность графита и конструкционных материалов не меняются. Это допущение принципиально, но упрощает обменные процессы между ВО. Структура файла приведена в табл. 1. Здесь указывается: какая передается обменная функция, размерность вектора передачи, номер канала с какого и в какой передаются данные, точки привязки вектора передачи.

Далее конфигурационный файл принимает конвертор, который приводит размерности обменных функций к размерностям, принятым в MCU. Затем конвертируемый конфигурационный файл обрабатывается программой Perl-обертка. Эта программа выполняет следующие операции:

- по плотности теплоносителя вычисляет весовую долю водорода и кислорода в теплоносителе;
- редактирует входной файл MCU;
- запускает код MCU.

После 4-й итерации между ВО MCU и ВО PATEГ получены следующие результаты:

=====

RGS TALLY MODULE OUTPUT

=====

```

Number of Series      :      2
Full Number of Particles :    12 000
Number of Tally Materials:     129
Number of Tally Zones  :     129
Number of Tally Objects :     29
ISTR                  :      0
NRET 3214 DOWN
FIXED
FINISH tally
ALL DISPERSIONS ARE PRINTED IN PER
CENT
<<NEUTRON SPECIFIC TALLIES FOR
WHOLE SYSTEM>>
Mean   Disp DispOfDisp AssymFactor
Keff abs. : 5.81115E-01 1.54449E+01
Keff col. : 5.78260E-01 1.61193E+01
Keff t.len.: 5.79976E-01 1.62836E+01
Keff comb. : 6.55198E-01 1.05642E-05
Keff Briss.: 5.98987E-01 3.81731E-06
<<PARTICLE TYPE      1 >>
Physical module particle type: 1 (neutrons)
The estimation type: by collision

```

и соответственно нейтронные потоки в 129-ти зонах полячейки.

В некоторых случаях может возникнуть необходимость выполнить расчеты на су-

пер-ЭВМ с помощью какого-либо кода или жестко связанного программного комплекса. Такие расчеты можно провести с помощью их ИО. Как пример приведем расчет стационарного режима "холодного" реактора без изменения входных данных с помощью кода MCU без подключения других ВО. Подключение MCU к ИО выполнено через программу-обертку, осуществляющую только инициализацию кода, не изменяя входных и выходных параметров. Таким образом реализуется стандартный запуск MCU через ИО. Как пример рассчитаны нейтронно-физические характеристики РБМК.

Моделировалась активная зона, состоящая из графитовой кладки, в которую помещены 1 661 технологических и 211 каналов управления и защиты. Вся активная зона разбита на 22 расчетные зоны, состоящие из 22-х различных материалов. Все исходные данные заданы в стандартном для кода MCU файле исходных данных, названном fn 206. Вся активная зона представлена одним расчетным объектом. Расчет выполнен для 2 000 нейтронных поколений. Максимальное число серий с учетом размеров активной зоны принято равным 2 000. Ниже приводятся фрагменты результатов расчета критического состояния реактора.

*****MCU - Options:*****

```

CM5          MEMORY: NP.MEM
TG5
RGS5

```

=====

TG TRANSPORT MODULE OUTPUT

=====

```

Keff-Collision  0.946688 (0.0008)

```

=====

END OF TG TRANSPORT MODULE OUTPUT

=====

=====

RGS TALLY MODULE OUTPUT

=====

```

Number of Series      :      2 000
Full Number of Particles :    2 000 000
Number of Tally Materials:     22
Number of Tally Zones  :     22

```


Number of Tally Objects : 1
 ISTR : 0
 NRET 3214 DOWN
 FIXED
 FINISH REG

с помощью кода через его ИО без дополнительных ВО.

В качестве следующего примера использования технологии рассмотрен режим несанкционированного извлечения стержня РР. Выполним моделирование этого режима с помощью вычислительного комплекса, созданного из ВО, рассчитывающих нейтронно-теплогидравлические процессы в активной зоне реактора на базе кодов KORAT-3D и PATEG. Пусть стержень РР со скоростью 40 см/с извлекается с 677 до 370 см от верхнего концевика. Включена система автоматического регулирования (АР), которая по суммарному сигналу внутриреакторных датчиков, расположенных в ячейках с координатами 60-16, 60-61, 17-16, 17-61, перемещает 4 стержня АР, размещенные в ячейках 52-25, 52-51, 26-25, 26-51, в активную зону реактора (рис. 13).

На рис. 14 приведена расчетная схема гидравлического тракта КМПЦ РБМК, где приняты следующие обозначения: 1...6 – нижняя водяная магистраль. 7 – активная зона. 8...15 – верхняя пароводяная магистраль, ТЭ2 – тепловой элемент 2 (стенка ТК - кольца - графит). Результаты расчета приведены на рис. 15 (2-я стр. цветной вкладки).

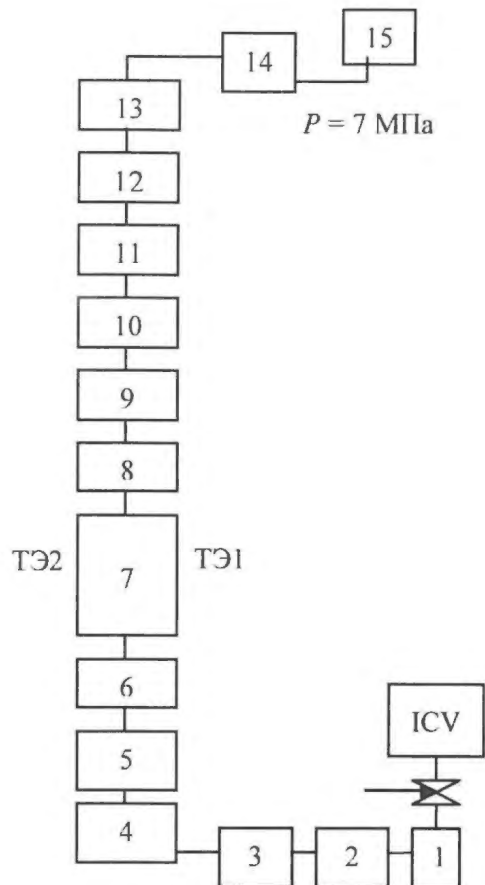


Рис. 14. Расчетная схема теплогидравлического контура реактора в коде PATEG

длиной 7 м), ТЭ2 – тепловой элемент 2 (стенка ТК - кольца - графит). Результаты расчета приведены на рис. 15 (2-я стр. цветной вкладки).

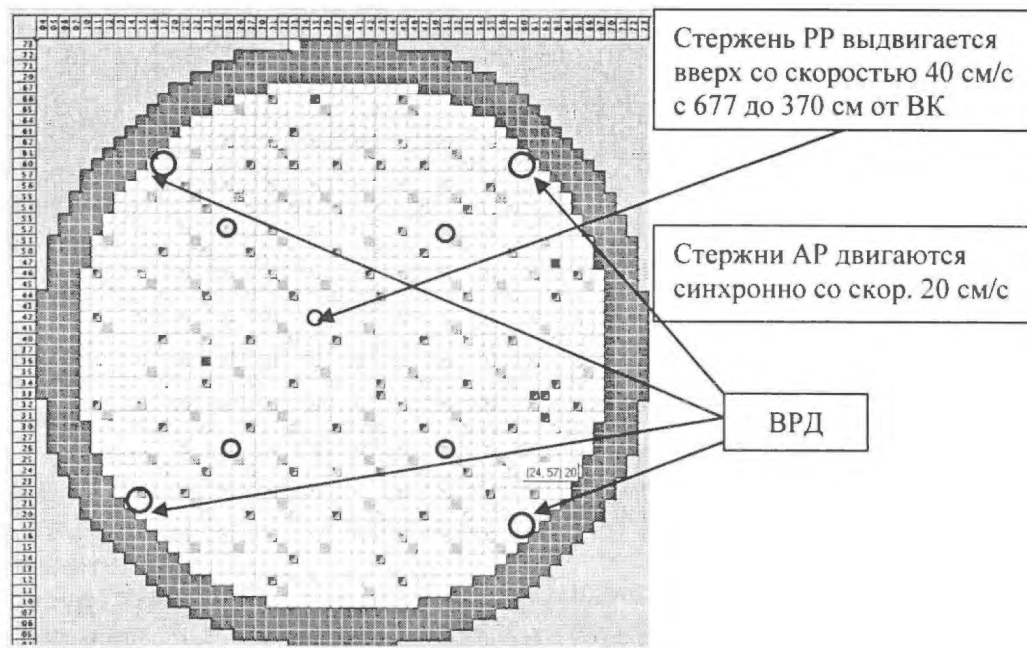


Рис. 13. Постановка тестовой задачи РУ РБМК-1000: ВК – верхний концевой выключатель; ВРД – внутриреакторный датчик

Реализована следующая технология создания ВО:

– для настройки конверторов разработан общий формат обменных данных для этого класса задач;

– подготовлен файл конфигурации для конвертора данных, имеющий формат xml и содержащий описание используемых обменных функций и их размерностей, правила пересчета физических величин и высотных сеток, описание картограммы перевода точек привязки.

В качестве обменного формата данных выбран следующий:

– нумерация каналов – согласно конструкторской документации;

– для высотных сеток – направление снизу вверх, в качестве начала координат – нижний срез активной зоны, размерность – в метрах;

– перечень и размерности физических обменных функций представлены в табл. 2.

Связывание программ KORAT-3D и PATEG. В связанных динамических расчетах номинальных и аварийных режимов используются диффузия нейтронов в многогрупповом трехмерном приближении, кинетика нейтронно-ядерного взаимодействия (KORAT-3D), течение теплоносителя в двухскоростном, двухтемпературном многоканальном термогидравлическом приближении (PATEG). При этом на каждом временном шаге программы PATEG и KORAT-

3D обмениваются трехмерными распределениями рассчитанных функций. При счете производится обмен следующими функциями (табл. 3):

Таблица 3. Обменные функции

KORAT-3D	PATEG
Удельная мощность тепловыделения в топливо, Дж/(с·см ³)	Температура топлива, градус К
	Плотность теплоносителя, кг/м ³
Удельная мощность тепловыделения в графит, Дж/(с·см ³)	Температура графита, градус К

Обе представленные программы реализованы и функционируют как независимые коды, каждый из которых имеет свой собственный формат данных. Отличия в форматах представления данных следующие:

- несовпадающая нумерация каналов (сквозная по числу всех каналов активной зоны в программе KORAT-3D и сквозная по числу топливных каналов в программе PATEG (рис. 16);
- различные высотные сетки (рис. 17);
- размерность физических величин обменных функций (табл. 4).

Таблица 4. Размерности физических величин

KORAT-3D	PATEG
Грамм	Килограмм
Сантиметр	Метр
Секунда	Секунда
Градус К	Градус К

Таблица 2. Перечень и размерности физических обменных функций

Название физической величины	Физический смысл физической величины обменной функции	Размерность
Total:Power	Мощность тепловыделения	Дж/с
Coolant:Power_density	Удельная мощность тепловыделения в теплоноситель	Дж/(с·м ³)
Coolant:Temperature	Температура теплоносителя	Градус К
Coolant: Density	Плотность теплоносителя	кг/м ³
Fuel: Power_density	Удельная мощность тепловыделения в топливо	Дж/(с·м ³)
Fuel: Temperature	Температура топлива	Градус К
Fuel: Density	Плотность топлива	кг/м ³
Graphite:Power_density	Удельная мощность тепловыделения в графит	Дж/(с·м ³)
Graphite: Temperature	Температура графита	Градус К
Graphite: Density	Плотность графита	кг/м ³

	4	5	6	7	10	11	12	13	14	15	16	17	20	21	22	23
73																
72																
71																
70																
67																
66																
65																
64															54	
63														75	76	77
62													105		106	
61												122	123	124	125	126
60											156		157	158	159	
57										183	184	185	186	187	188	189
56									221		222	223	224		225	
55								243	244	245	246	247	248	249	250	251
54									285	286	287		288	289	290	

KORAT-3D: от 1 до 2 488

	4	5	6	7	10	11	12	13	14	15	16	17	20	21	22	23									
73																									
72																									
71																									
70															55	56									
67													83	84	85	86									
66													115	116	117	118	119								
65													149	150	151	152	153	154							
64													185	186	187	188	189	190	191						
63													223	224	225	226	227	228	229	230					
62													263	264	265	266	267	268	269	270	271				
61													305	306	307	308	309	310	311	312	313	314			
60													349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359		
57													395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	
56													443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	
55													491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503
54													541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553

РАТЕГ: от 1 до 1 561

Рис. 16. Нумерация каналов (фрагмент картограммы)

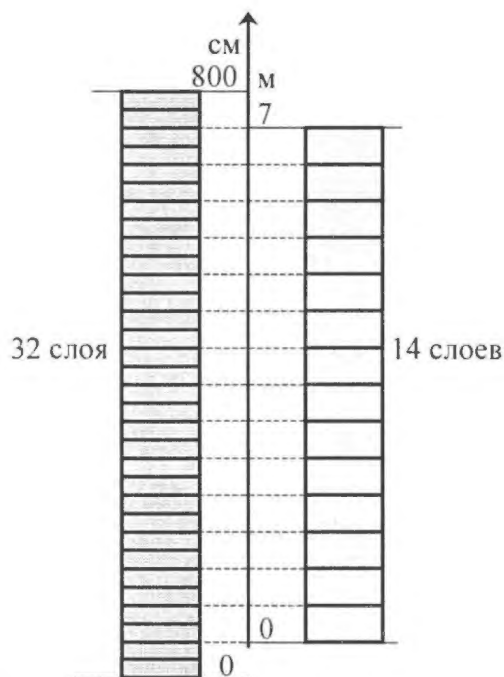


Рис. 17. KORAT-3D и РАТЕГ. Высотные сетки

Подключение программ к интеллектуальной оболочке. При объединении программ путем подключения их к ИО исключается обмен данными непосредственно между программами. Программа обменивается данными со своей ИО, при этом данные отдаются и принимаются в том формате, который принят в программе, и на своих сетках. В свою очередь ИО программ обмениваются данными между собой.

Обмен данными происходит в векторном виде, и каждый пакет данных сопровождается точкой привязки и сеткой отправителя. При получении данных программа указывает свою сетку, на которую необходимо переинтерполировать принимаемые данные. Приведение размерностей и пересчет точек привязки вынесены в конверторы.

Технология подключения программ к ИО включает в себя несколько этапов:

Рисунки к статье В.Ф. Токаренко и др.
 “Технология разработки распределенных вычислительных систем
 на базе супер-ЭВМ для решения комплексных задач ядерной энергетики”

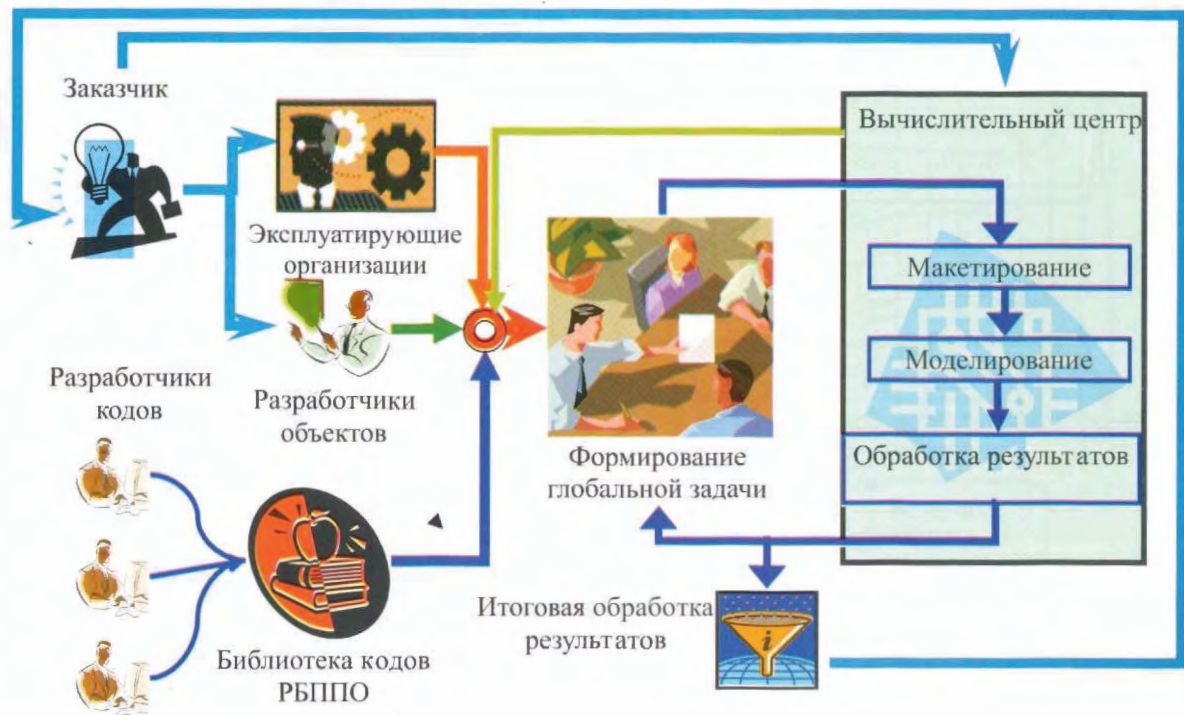


Рис. 4. Структурная схема формирования задачи

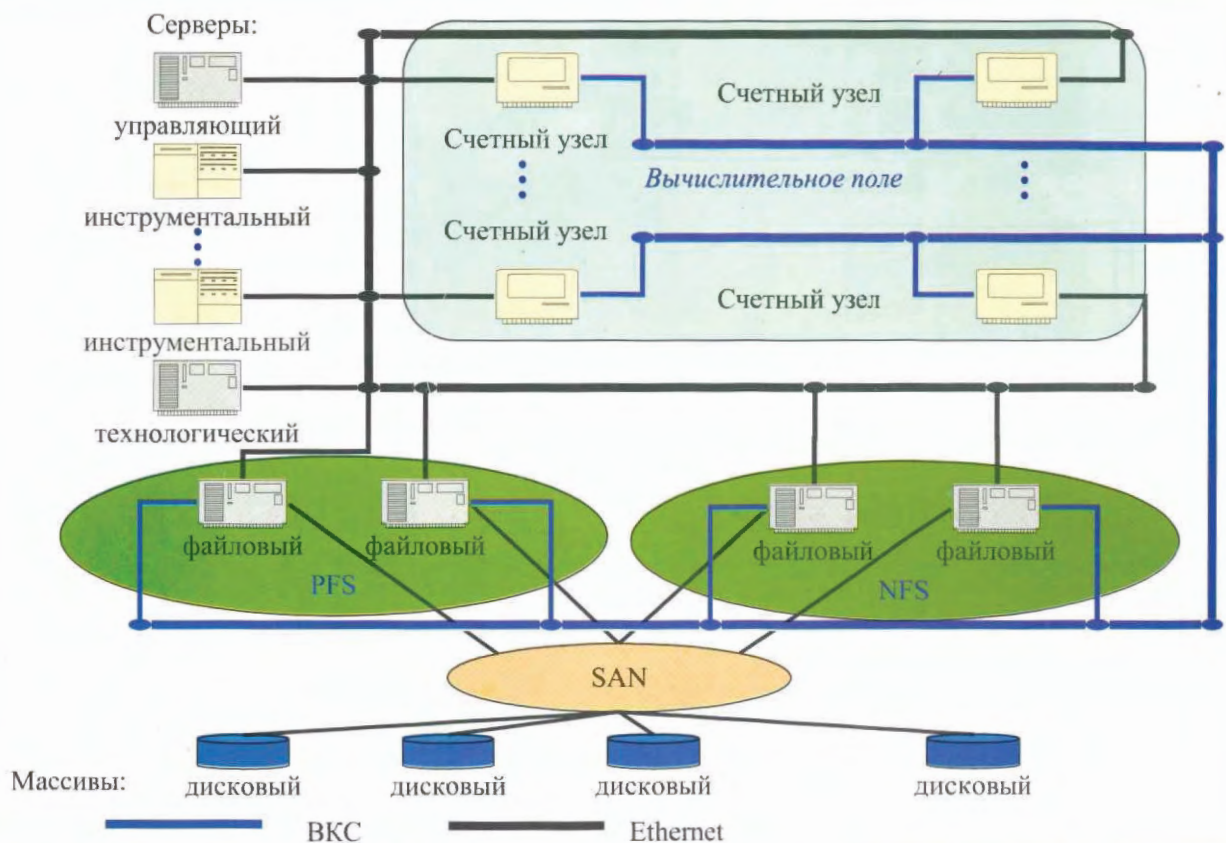


Рис. 5. Структурная схема PMBC: SAN – сеть доступа к хранилищу данных, ВКС – высокопроизводительные каналы связи

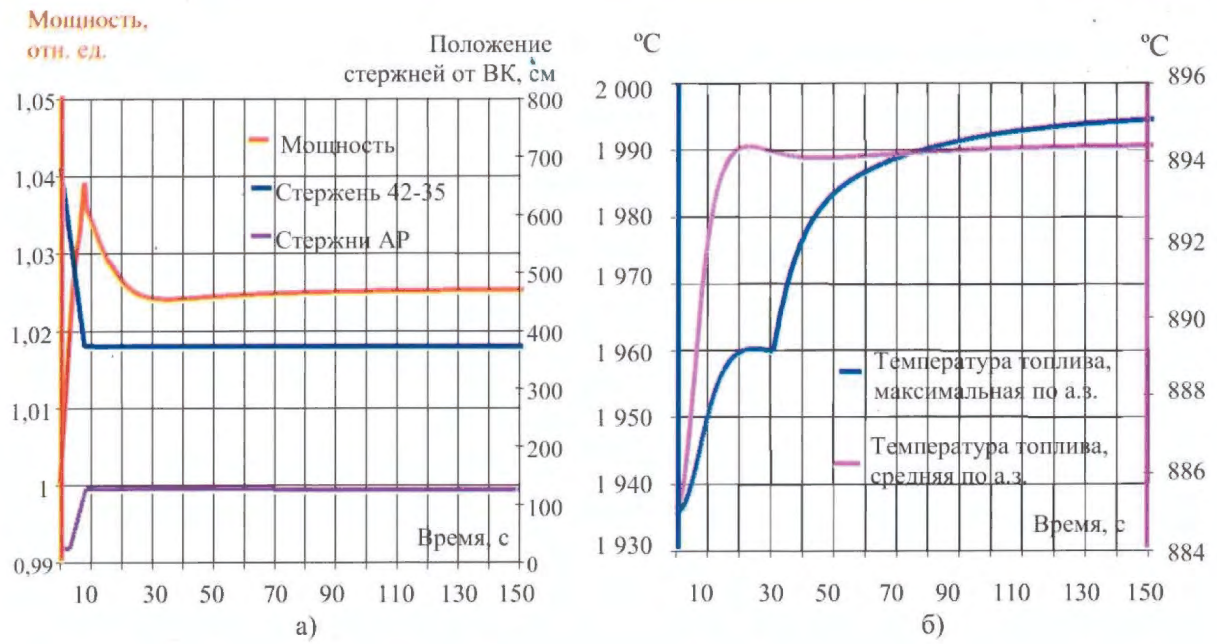


Рис. 15. Некоторые результаты расчета тестовой задачи РУ РБМК- 1000:
 а) изменение мощности и положения органов регулирования;
 б) изменение температуры топлива и графита, а.з. – активная зона

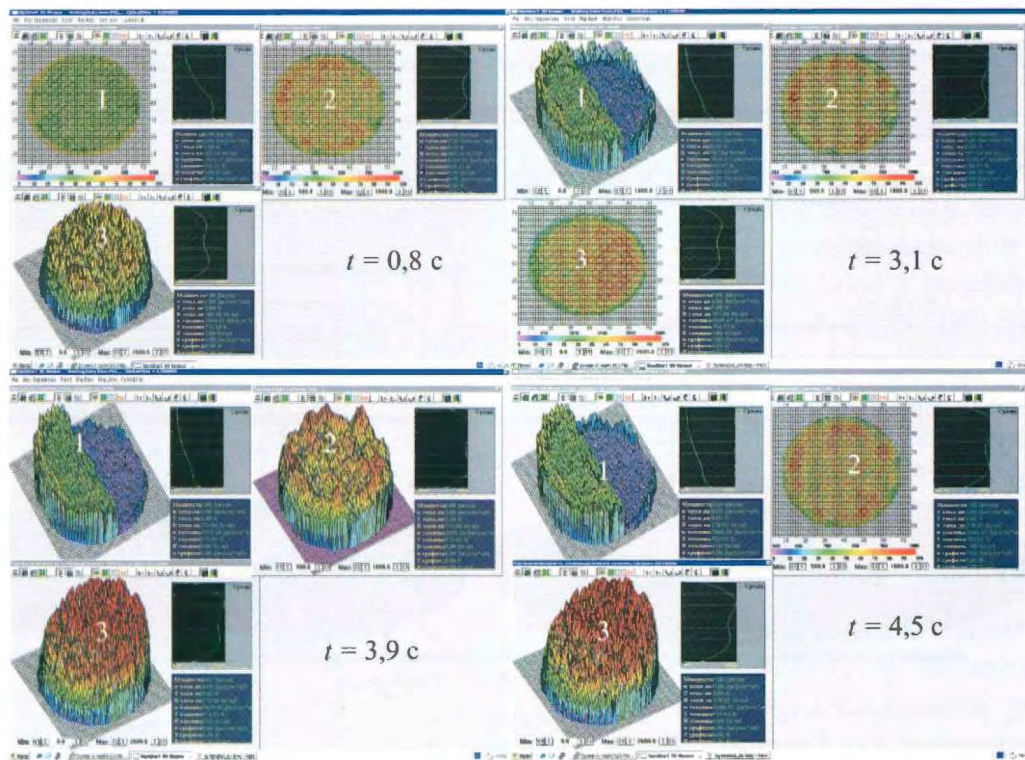


Рис. 18. Изменения плотности теплоносителя, температуры топлива и энерговыделения в активной зоне в моменты времени $t = 0,8, 3,1, 3,9$ и $4,5$ с от начала аварии:
 1 – плотность теплоносителя; 2 – температура топлива; 3 – энерговыделение

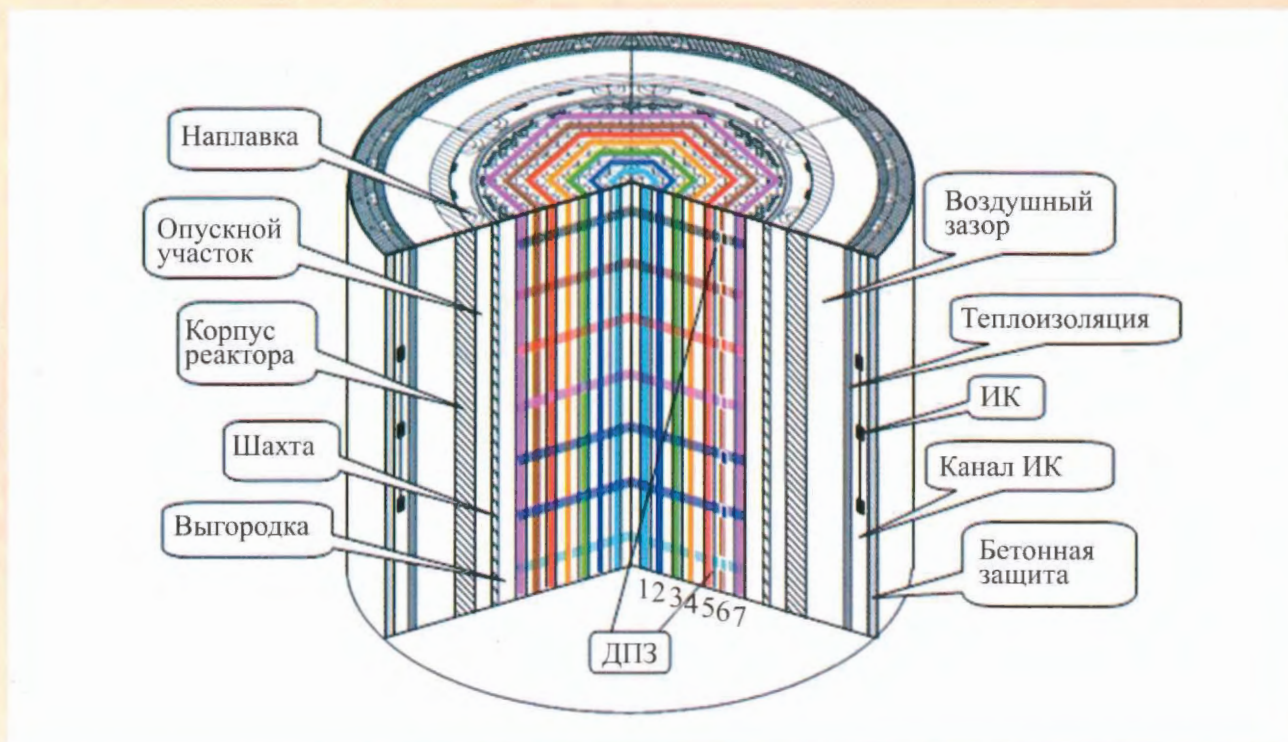


Рис. 1. Схема распределения детекторов плотности нейтронного потока в ВВЭР-1000 с цветовым обозначением орбит и слоев: 1...7 – цифровое обозначение слоев

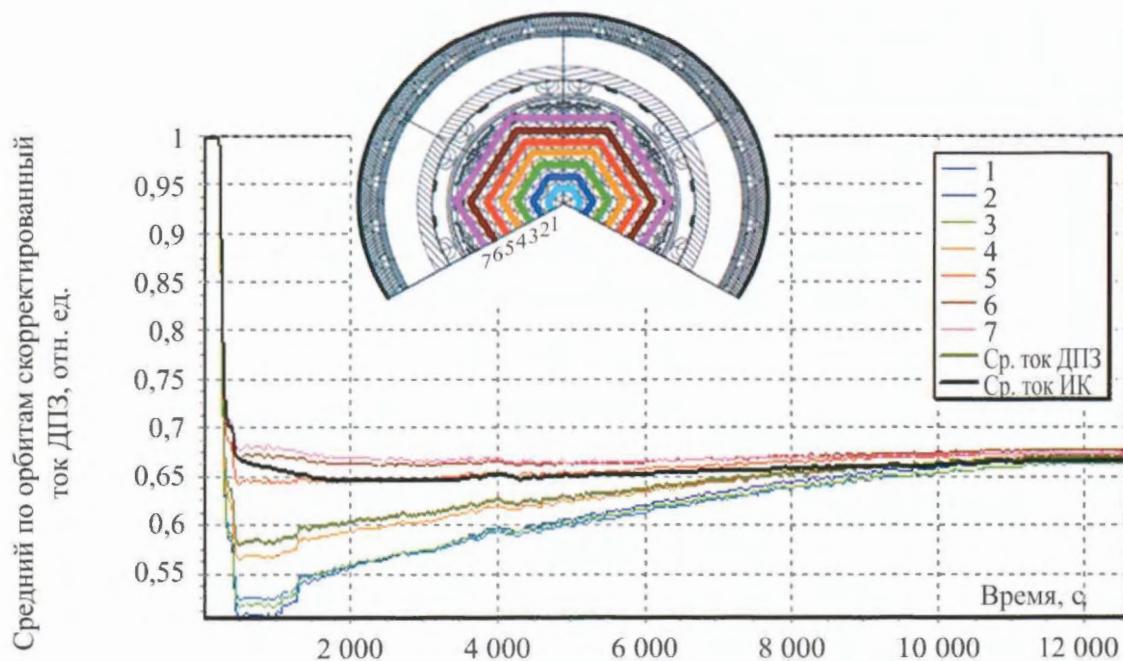


Рис. 2. Среднее по орбитам (цветовое соответствие орбит на рис. 1 и 2) скорректированное значение тока ДПЗ, среднее по всем ДПЗ скорректированное значение тока, среднее значение тока 6-ти ИК рабочего диапазона (типовой график для ВВЭР-1000)

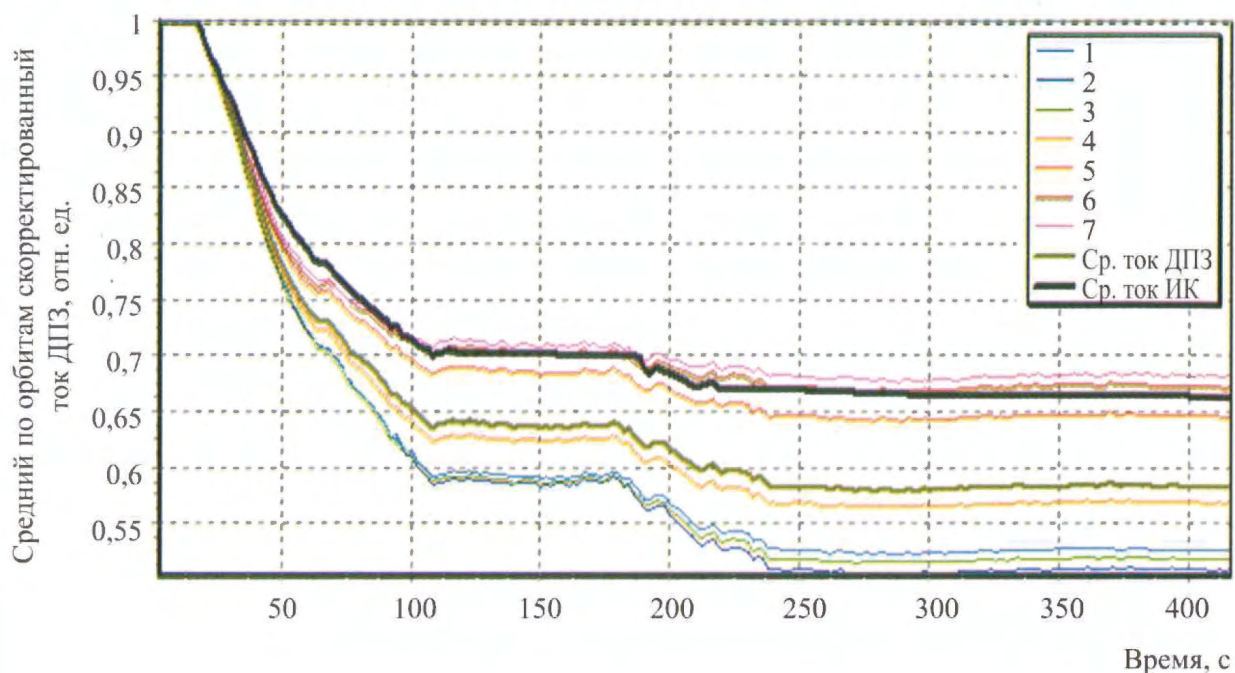


Рис. 4. Среднее по орбитам (цветовое соответствие орбит на рис. 1 и 4) скорректированное значение тока ДПЗ, среднее по всем ДПЗ скорректированный ток, среднее значение тока бти ИК рабочего диапазона (типовой график для ВВЭР-1000)

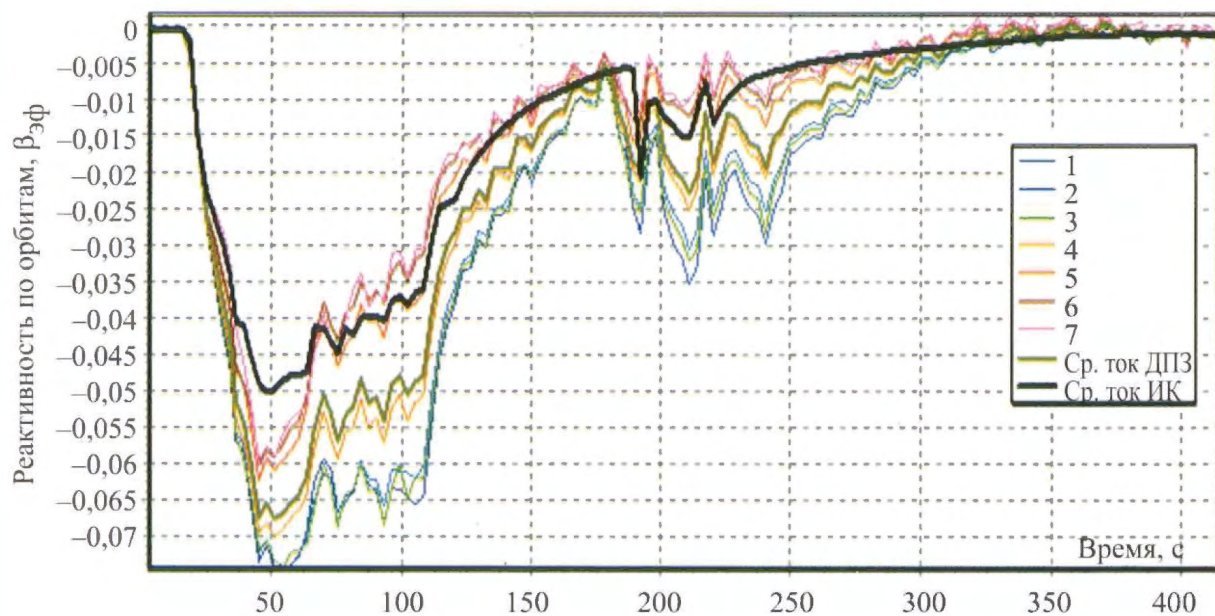


Рис. 6. Реактивности, рассчитанные по исходным данным переходного процесса (типовой график для ВВЭР-1000)

– разработку общего формата обменных данных для данного класса задач для настройки конверторов;

– подготовку файла конфигурации для конвертора данных, входящего в состав ИО. Файл конфигурации конвертора имеет формат xml и содержит описание используемых обменных функций и их размерностей, правила пересчета физических величин и высотных сеток, описание картограммы перевода точек привязки.

В качестве третьего режима рассмотрим "тяжелую" аварию, вызванную разрывом напорного коллектора одной петли КМПЦ. Эта авария приводит к полному прекращению подачи теплоносителя в аварийную половину активной зоны реактора. Рассматривается авария при несрабатывании аварийной защиты. Расчет этого режима выполнен с помощью комплекса, состоящего из ВО с кодами STEPAN и KOBRA, моделирующими нейтронно-теплогидравлические процессы в активной зоне.

Обработка результатов расчета проводилась ВО SimWorT 3D Viewer, который запущен на вычислительном комплексе 2, состоящем из одного персонального компьютера с ОС Windows. Результаты обработки расчетов переданы в Москву по Интернету. На рис. 18 (2-я стр. цветной вкладки) приведены 4 слайда из полученных результатов, на которых изображены результаты расчета первых 4,5 с развития аварии.

ВО созданы по технологии, описанной выше для кодов KORAT-3D и PATEG. Только в отличие от ВО KORAT-3D и PATEG в STEPAN и KOBRA число каналов и высотная разбивка совпадают и соответственно равны 1 661 и 14. Совпадают нумерация каналов и размерности физических величин.

Заключение

Разработанная технология создает грид-сети из различного класса компьютеров, включая супер-ЭВМ, и ПО для поэтапного решения задач развития крупномасштабной ЯЭ в нашей стране. Можно выделить в соответствии со Стратегией развития АЭК [1] следующие этапы Программы работ по решению этих задач.

Этап 1 (2009-2015 гг.). Работы ведутся по 4-м основным направлениям:

- создается объединенная РМВС на предприятиях АЭК и внедряется технология коллективного решения комплексных задач;

- решаются первоочередные задачи эксплуатации, введения в эксплуатацию и вывода из эксплуатации объектов ЯЭ;

- решаются задачи расширения рынка сбыта атомной энергии и разработки базовых элементов крупномасштабной ЯЭ;

- разрабатываются коды нового поколения, ориентированные на РМВС, для углубленного решения задач 2-го и 3-го этапов Стратегии.

Этап 2 (2016-2030 гг.). Работы этапа ведутся по следующим направлениям:

- увеличивается вычислительная мощность РМВС и вводится в эксплуатацию новая версия ИС РБППО с кодами нового поколения, повышающая эффективность использования вычислительных ресурсов и обеспечивающая комфортный интерфейс с пользователем;

- на базе кодов нового поколения решаются первоочередные задачи вывода из эксплуатации энергоблоков первого и второго поколений и замещения их установками третьего поколения;

- выполняются расчетные исследования объектов крупномасштабной ЯЭ.

Этап 3 (2031-2050 гг.). Работы этапа во многом будут определяться уровнем развития вычислительной техники, а основные направления – 3-м этапом Стратегии:

- дальнейшее развитие кодов нового поколения, основанных на моделировании процессов на молекулярном уровне для углубленных исследований всех физико-химических, биологических и механических процессов в АЭК и окружающей среде;

- оптимизация интерфейсной базы пользователя;

- решение всего комплекса задач крупномасштабной ЯЭ.

Список литературы

1. Аврорин Е.Н., Вербицкая О.В., Алексеев П.Н. и др. Стратегия расширенного развития АЭК. Итоговый отчет по госконтрактам № 28.07.

081.74 от 26.11.07 г. и № Н.4м.25.04.08.248 от 18.02.08 г. Отчет РФЯЦ-ВНИИТФ № 3-02/7 от 25.11.08 г. Снежинск, 2008.

2. **Программа** работ по созданию виртуальных объектов АЭК на распределенных МВС с суперкомпьютерами, г. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009.

3. **Токаренко В.Ф., Беляков И.М., Деулин А.А. и др.** Технология разработки программных комплексов, ориентированных на Супер-ЭВМ, для исследований функционирования сложных технических систем на всех этапах их жизненного цикла. Этап № 1. Выбор направления исследований. Шифр 2007-4-1.4-00-06-085. Отчет РИЦ "Курчатовский институт", гос. рег. № 0120.0810069, инв. № 46-21/3-07, 2007.

4. **Токаренко В.Ф., Беляков И.М., Деулин А.А. и др.** То же. Этап № 2. Теоретические исследования поставленных перед НИР задач. Шифр 2007-4-1.4-00-06-085. Отчет РИЦ "Курчатовский институт", гос. рег. № 0120.0810069, инв. № 46-08/4-07, 2007.

5. **Токаренко В.Ф., Беляков И.М., Деулин А.А. и др.** То же. Этап № 3. Экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач. Шифр 2007-4-1.4-00-06-085. Отчет РИЦ "Курчатовский институт", гос. рег. № 0120.0810069, инв. № 46-21/14-08, 2008.

6. **Токаренко В.Ф., Беляков И.М., Деулин А.А. и др.** То же. Этап № 4. Экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач. Обобщение и оценка результатов исследований. Шифр 2007-4-1.4-00-06-085. Отчет РИЦ "Курчатовский институт", гос. рег. № 0120.0810069, инв. № 46-21/30-08, 2008.

7. **Краюшкин А.В., Бабайцев В.Н., Глембоцкий А.В. и др.** Верификационный отчет по программе STERAN/КОВРА для анализа аварий в РБМК. Отчет РИЦ "Курчатовский институт", инв. № 33-02/30, 2002.

8. **Абагян Л.П., Алексеев Н.И., Глушков А.Е. и др.** Программа MCU-REA_2 с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.2. Отчет РИЦ "Курчатовский институт", № 36/19-2001, 2001.

9. **Федотова Л.П., Шагалиев Р.М.** Математическая методика КОРAT-3D численного решения трехмерных групповых задач диффузии нейтронов на регулярных и нерегулярных пространственных сетках // ВАНТ. Сер.: Методики и программы численного решения задач математической физики, 1994, вып. 4.

10. **Самигулин М.С., Воронова О.А., Данилов Ю.Ф. и др.** Системный двухжидкостной термогидравлический код РАТЕГ. Моделирование термогидравлики ВВЭР-1000 на внутрикорпусной стадии тяжелой аварии. В сб. "Вопросы безопасности ЯЭС с ВВЭР". Том 2. Анализ ава-

рийных ситуаций: компьютерные коды и экспериментальные исследования. Труды научно-практ. семинара, С.-Петербург, 12-14 сентября 2000 г.

11. **Данилов В.А., Зенков А.Д., Малкин С.Д. и др.** Компьютерная технология SimPort: опыт внедрения // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2002, вып. 3, с. 64–71.

Контактная информация об авторах статьи – Токаренко Виктор Федорович, нач. лаб., тел.: (499)196-70-16, e-mail: tvf@dhtp.kiae.ru;

Алексеев Павел Николаевич, дир. отделения, тел.: (499)196-76-21, e-mail: apn@dhtp.kiae.ru;

Глембоцкий Алексей Владимирович, н. с., тел.: (499)196-72-33, e-mail: glemba@gsnet.ru;

Гуревич Михаил Исаевич, г. н. с., тел.: (499)196-94-89, e-mail: gurevich@adis.vver.kiae.ru;

Краюшкин Александр Викторович, нач. отдела, тел.: (499)196-75-82, e-mail: gala@dcsr.vver.kiae.ru;

Лебедев Вячеслав Иванович, г. н. с., тел.: (499)196-97-54;

Беляков Игорь Михайлович, нач. отдела, тел.: (83130)40-740, e-mail: wht@vniief.ru;

Варгин Анатолий Михайлович, нач. отдела, тел.: (83130)27-418, e-mail: vargin@vniief.ru;

Воронова Ольга Александровна, с. н. с., тел.: (83130)27-370, e-mail: voronova@vniief.ru;

Данилов Юрий Федорович, с. н. с., тел.: (83130)28-677, e-mail: danilov@vniief.ru;

Деулин Андрей Александрович, м. н. с., тел.: (83130)28-865, e-mail: A.Deulin@vniief.ru;

Евдокимов Вячеслав Владимирович, нач. лаб., тел.: (83130)28-570, e-mail: slava@vniief.ru;

Кульнев Дмитрий Вадимович, нач. лаб., тел.: (83130)28-426, e-mail: dik@vniief.ru;

Лобанов Павел Сергеевич, инженер-программист, тел.: (83130)28-625, e-mail: P.S.Lobanov@vniief.ru;

Самигулин Масхуд Сунгатович, нач. лаб., тел.: (83130)27-401, e-mail: sms@vniief.ru;

Семенов Георгий Петрович, нач. лаб., тел.: (83130)27-237, e-mail: semenov@vniief.ru;

Шагалиев Рашид Мирзагалиевич, нач. отделения, тел.: (83130)28-314, e-mail: R.M.Shagaliev@vniief.ru;

Шемякина Татьяна Вячеславовна, н. с., тел.: (83130)28-162, e-mail: tshem@vniief.ru;

Данилов Виктор Александрович, н. с., тел.: (499)943-76-76, e-mail: victor@oirt.sniip.ru;

Ракитин Игорь Дмитриевич, нач. отдела, тел.: (499)943-76-76, e-mail: igor_rakitin@oirt.sniip.ru

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 4, с. 26–54.

Распределенная библиотека ППО и ее интеллектуальная среда

В.Ф. Токаренко,

РНЦ "Курчатовский институт", 123182, Москва, пл. Курчатова, 1,
 И.М. Беляков, А.М. Варгин, О.А. Воронова, Ю.Ф. Данилов,
 А.А. Деулин, В.В. Евдокимов, Д.В. Кульнеев, П.С. Лобанов,
 М.С. Самигулин, Г.П. Семенов, Р.М. Шагалиев, Т.В. Шемякина,
 РФЯЦ-ВНИИЭФ, 607188, г. Саров Нижегородской обл., пр-т Мира, 37
 Поступила в редакцию 22.07.2009 г.

Приводится описание специального программного обеспечения (СПО), поддерживающего распределенную библиотеку прикладного программного обеспечения (ППО) для многопроцессорной вычислительной системы (МВС) с супер-ЭВМ.

Ключевые слова: многопроцессорные вычислительные системы, супер-ЭВМ, вычислительный объект, программные комплексы, интеллектуальная среда, распределенная библиотека прикладного программного обеспечения.

The Distributed Library of the Applied Software and Its Intellectual Environment. *V.F. Tokarenko, RRC "Kurchatov Institute", 1, Kurchatov Sq., Moscow, 123182, I.M. Belyakov, A.M. Vargin, O.A. Voronova, Yu.F. Danilov, A.A. Deulin, V.V. Evdokimov, D.V. Kul'neev, P.S. Lobanov, M.S. Samigulin, G.P. Semenov, R.M. Shagaliev, T.V. Shemyakina, RFNC-VNIIEF, 37, Mira Ave., Sarov, Nizhni Novgorod region, 607188.* Special software supporting the distributed library of the applied software for multiprocessor computing system with the super computer is described.

Key Words: Multiprocessor Computing Systems, Super Computer, Computing Object, Code Complexes, Intellectual Environment, Distributed Library of Applied Software.

Распределенную библиотеку ППО (РБППО) образуют коды, подключенные к своим интеллектуальным оболочкам (ИО). Код вместе с ИО создает вычислительный объект (ВО). Агентом ИО назван каждый отдельный процесс ИО, который обслуживает один вычислительный код, обеспечивая ему конвертирование данных и корректный обмен с другими вычислительными кодами через их агенты.

Передача данных между кодом и агентом ИО осуществляется посредством именованных каналов. Для передачи данных между агентами ИО применяется технология MPI (стандарт MPI 1.1). Ниже описан реализованный программный блок поддержки РБППО, названный интеллектуальной средой РБППО (ИС РБППО) [1, 2]. Он предназначен для организации связей между кодами различных производителей и обеспечивает возможность комбинирования произвольного множества кодов, участвующих в расчете задачи, без компиляции и сборки исполняемых файлов.

Также обеспечивается возможность получения от поставщика кода единого исполняемого файла (без исходных текстов) для решения всего множества задач, решаемых кодом. Работа этого программного блока возможна как на современных МВС, так и на однопроцессорных персональных компьютерах (ПК).

Основные свойства ИС РБППО:

- масштабируемость – возможность использования под "одну" задачу полного вычислительного поля МВС. В реализации системы применяются программные технологии (MPI), обеспечивающие максимально возможные характеристики по эффективному взаимодействию ВО с использованием коммуникационной среды МВС;
- поддержка выполнения в рамках задачи как 32-, так и 64-разрядных приложений;
- интерфейс связи с приложениями на языках Fortran, C, C++;
- текущая поддержка "стандартного" варианта СПО МВС и возможность настройки на любой класс СПО МВС;

– применение удобных системно-сервисных (GUI) программ в части интеграции ВО в задачу;

– поддержка выполнения в рамках задачи как параллельных приложений ВО, так и последовательных.

ИС РБППО разработана как программный пакет PSS (Parallel Scalable Suit), включающий в себя следующие компоненты:

– базовая библиотека функций (PSS_API) – API (Application Program Interface) пользователя (разработчика ВО) к функциям взаимодействия вычислительных кодов с ИО, предназначенная для разработки программ на языках программирования С, С++ и Fortran;

– библиотека низкоуровневых функций (PSS_LAPI) – API разработчика компонент ИО, в частности, разработки специализированных конверторов, загружаемых как динамические модули в ИО ВО, предназначенная для разработки программ на языках программирования С, С++;

– пакет системно-сервисных приложений и утилит (PSS_UTIL) – набор программ и утилит, упрощающих разработку и сопровождение программ в среде пакета PSS.

На рисунке приведена схема структуры ИС РБППО.

Структура каталогов пакета PSS

Организацию системы PSS удобно представить через структуру его директорий. Директория верхнего уровня содержит скрипты и инструментальные средства, необходимые для построения PSS. Также

здесь располагается ряд поддиректорий для различных типов файлов.

Общие средства построения системы включают `acinclude.m4`, `autogen.sh`, `configure.ac`, `Makefile.am`, `INSTALL`, `README` и содержимое директории `auxdir`. Команды `autoconf` и `make` используются для построения системы PSS в автоматическом режиме.

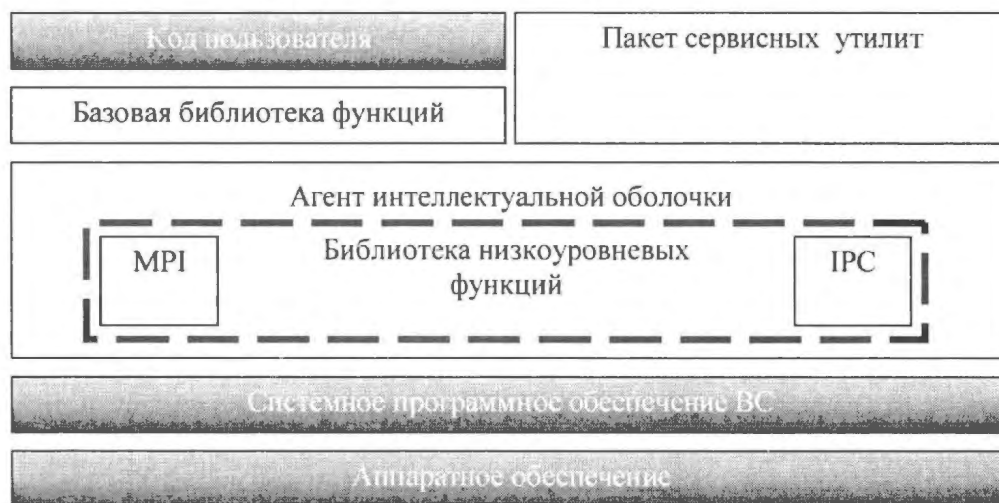
Ниже представлен список всех верхнеуровневых директорий:

- `auxdir` применяется для построения PSS;
- `src` содержит все исходные коды, а также исходные коды тестов.

Исходные коды

В директорию `src` входят следующие поддиректории:

- `common` – содержит файлы реализации и заголовочные файлы общих модулей, которые используются для компиляции системы PSS и получения библиотеки с API-функциями, а также файлы описания констант общего применения;
- `converter` – содержит файлы реализаций и заголовочные файлы модулей, используемых для работы с конверторами;
- `f90modules` – модули для поддержки языка Фортран 90;
- `lib` – реализация библиотеки API-функций;
- `pss_agent` – реализация агента ИО;
- `tests` – содержит различные тесты для проверки системы.



Структура компонент ИС РБППО

Также в директорию *src* входят следующие файлы:

- *aio.conf* – пример конфигурационного файла системы PSS;
- *Makefile.am* – применяется утилитой *automake*. В дальнейшем файлы автоматического построения системы упоминаться не будут.

Директория *common* содержит общие файлы и определения констант. Данная директория содержит следующие файлы:

<i>fifo_func_covers.h</i>	Работа с именованными каналами FIFO
<i>fifo_func_covers.c</i>	
<i>log.h</i>	Ведение логов различных уровней
<i>log.c</i>	
<i>pss_funcsdefine.h</i>	Идентификаторы обменных функций и классов кода по их символьному представлению
<i>pss_funcsdefine.c</i>	
<i>task_conversation.h</i>	Связь между агентом ИО и расчетным кодом
<i>task_conversation.c</i>	
<i>macros.h</i>	Внутренние константы ИО
<i>macros_const.h</i>	Общие константы для ИО и подключаемого кода (C)
<i>macros_constf.h</i>	Общие константы для ИО и подключаемого кода (Фортран)

Файл *fifo_func_covers.h* является заголовочным файлом, в котором описаны интерфейсы функций-обертки для работы с именованными каналами FIFO:

- `int open_fifo (char *path_fifo, int flags, int *pdes_fifo)` – создает и открывает FIFO по пути *path_fifo*, режим открытия (только для чтения, только для записи, запись и чтение) указывается через параметр *flags*, дескриптор открытого FIFO сохраняется по адресу *pdes_fifo*;
- `int do_write (int fd, const void *buf, size_t count)` – записывает в FIFO с дескриптором *fd* массив элементов *buf*, размер которого равен *count*;
- `int do_read (int fd, void *buf, size_t count)` – читает из FIFO с дескриптором *fd* *count* элементов и записывает их в массив *buf*.

Реализация данных функций находится в файле *fifo_func_covers.c*.

В файле *log.h* представлены интерфейсы функций, которые применяются для ведения логов различных уровней:

- `int init_log (const char *name_logfile, unsigned int level, const char *prefix)` – открывает лог-файл с именем *name_logfile*, уровень ведения логов задается в переменной *level* (в файл ведения логов будут добавляться только те записи, уровень которых не выше указанного в переменной *level*). Через параметр *prefix* есть возможность указать префикс, который будет добавляться к каждой записи;

- `void destroy_log (void)` – закрытие лог-файла и освобождение занятой памяти;
- `void error (const char *fmt,...)` – создать запись в лог-файле уровня `LOG_LEVEL_ERROR`;
- `void info (const char *fmt,...)` – создать запись в лог-файле уровня `LOG_LEVEL_INFO`;
- `void debug (const char *fmt,...)` – создать запись в лог-файле уровня `LOG_LEVEL_DEBUG`;
- `void debug2 (const char *fmt,...)` – создать запись в лог-файле уровня `LOG_LEVEL_DEBUG2`;
- `void debug3 (const char *fmt,...)` – создать запись в лог-файле уровня `LOG_LEVEL_DEBUG3`.

Далее приведенные функции отличаются от только что описанных тем, что к записи не добавляется префикс:

- `void nonprefix_error (const char *fmt,...)`,
- `void nonprefix_info (const char *fmt,...)`,
- `void nonprefix_debug (const char *fmt,...)`,
- `void nonprefix_debug2 (const char *fmt,...)`,
- `void nonprefix_debug3 (const char *fmt,...)`.

Также в файле `log.h` описан перечислимый тип `t_debug`, в котором указаны все возможные уровни ведения логов. В файле `log.c` описана структура `log`, в которой хранится необходимая информация об открытом логге, и представлены реализации функций ведения логов.

В файле `pss_funcdefine.h` представлены интерфейсы функций, позволяющие получить идентификаторы обменных функций и типов кода по их символьному представлению:

- `int pss_funcsdefine_init (char* file_name)` – инициализация списка идентификаторов. В случае необходимости возможна загрузка перечня идентификаторов из файла, имя которого передается в `file_name`;
- `pss_code get_code_id (char *code_name)` – возвращает идентификатор кода по его имени, в случае отсутствия возвращает `PSS_CODE_NONE`;
- `pss_func get_func_id (char *func_name)` – возвращает идентификатор обменной функции по ее имени, в случае отсутствия возвращает `PSS_FUNC_NONE`;
- `int pss_funcsdefine_Free (void)` – освобождает память, выделенную под служебные структуры.

В файле `pss_funcdefine.c` содержится реализация данных функций.

В файле `task_conversation.h` содержатся интерфейсы функций, посредством которых осуществляется связь между агентом ИО и расчетным кодом. Приведем список этих функций:

- `int init_agent_ipc_canal (const char *task_name)` – данная функция вызывается со стороны агентов ИО и применяется для открытия каналов FIFO передачи данных и сервисных сообщений, что обеспечивает связь агента с расчетным кодом;
- `int init_task_ipc_canal (const char *task_name)` – данная функция вызывается со стороны расчетного кода и применяется для открытия каналов FIFO передачи данных и сервисных сообщений, что обеспечивает связь расчетного кода с агентом ИО;

- `void close_ipc_canal (void)` – закрытие всех FIFO каналов;
- `int write_serv_msg_ipc_canal (const void *buf, size_t count)` – данная функция позволяет записать сервисное сообщение в соответствующий FIFO канал. Сообщение хранится по адресу `buf`, его длина передается через параметр `count`;
- `int read_serv_msg_ipc_canal (const void *buf, size_t count)` – данная функция позволяет прочитать сервисное сообщение из соответствующего FIFO канала. Сообщение записывается в массив `buf`, читается `count` элементов;
- `int write_data_ipc_canal (const void *buf, size_t count)` – данная функция позволяет записать данные в соответствующий FIFO канал. Данные хранятся по адресу `buf`, их количество передается через параметр `count`;
- `int read_data_ipc_canal (const void *buf, size_t count)` – данная функция позволяет прочитать данные из соответствующего FIFO канала. Данные сохраняются в массиве `buf`, читается `count` элементов;
- `int writev_data_ipc_canal (const struct iovec *iov, int iovcnt)` – данная функция позволяет записать вектор данных `iov` в соответствующий FIFO канал;
- `int readv_data_ipc_canal (const struct iovec *iov, int iovcnt)` – данная функция позволяет прочитать вектор данных `iov` из соответствующего FIFO канала.

В файле `task_conversation.c` содержатся реализации этих функций. Также в этом файле описана структура `fifo_ipc_canal`, которая содержит дескрипторы открытых FIFO, и представлены две статические функции для открытия каналов и установки значений этой структуры:

- `static int set_elem_agent_ipc_canal (const char *task_name, const char *postfix, int type_access, int *pelem_ipc_canal)` – вызывается в функции `init_agent_ipc_canal (...)`, т.е. вызов происходит со стороны агента ИО;
- `static int set_elem_task_ipc_canal (const char *task_name, const char *postfix, int type_access, int *pelem_ipc_canal)` – вызывается в функции `init_task_ipc_canal`

(...), т.е. вызов происходит со стороны расчетного кода.

В файлах `macros.h`, `macros_const.h` описаны общие константы, которые используются как в агенте ИО, так и в библиотеке API-функций. Файл `macros_const.h` должен включаться в клиентский код. Файл `macros_constf.h` включен для поддержки расчетных кодов, написанных на Фортране.

Директория `f90modules` содержит интерфейсные модули для взаимодействия с ИО программ, реализованных на языке Фортран. Данная директория содержит следующие файлы:

<code>CreateChoiceSrc</code>	Командный файл для генерации модулей для работы с различными типами данных
<code>pss_api__typeb__typeg_pg.f90</code>	Прототип модуля функций, формальные параметры которых не содержат родовых указателей
<code>pss_api_nch.f90</code>	Модуль для функций, формальные параметры которых не содержат родовых указателей

В файле `pss_api_nch.f90` описан модуль Фортран 90 с функциями, формальные параметры которых не содержат родовых указателей (указатели типа `void *`).

Так как Фортран не поддерживает тип `void`, то для функций с параметрами типа `void *` написан отдельный файл `pss_api__typeb__typeg_pg.f90`. Из этого файла посредством скрипта `CreateChoiceSrc` получаем несколько файлов с модулями, в каждом из которых тип `void *` заменен на один из возможных типов: `integer(1)`, `integer(4)`, `real(4)`, `real(8)`. В результате работы командного файла также создается файл `pss_api.f90`, который включает в себя все Фортран-интерфейсы для подпрограмм, описанных в файле `pss_apif.h`, и подключается пользователем в программы.

Директория `lib` содержит API-функции для взаимодействия кода с ИО (интерфейсы и библиотека). Данная директория содержит следующие файлы:

<code>pss_api.h</code>	Интерфейсы API-функций для взаимодействия кода с ИО
<code>pss_apif.h</code>	Интерфейсы API-функций для взаимодействия кода на языке Фортран с ИО

В файле `pss_api.h` представлены интерфейсы API-функций, которые используют клиентский код для взаимодействия с агентом ИО:

- `int pss_init (unsigned int rank_appl, unsigned int type_appl, const char *task_name)` – инициализация работы с ИО;
- `int pss_finalize (void)` – завершение работы с ИО;
- `int pss_get_mind (unsigned int wishful_mind, unsigned int *pmind_resulting)` – определение дальнейшей стратегии счета;
- `int pss_put_data (const void *buf, unsigned int count, unsigned int type_data,`

`unsigned int physical_type_data, unsigned int dest, unsigned int anchor_point, const void *grid, unsigned int size_grid, unsigned int type_data_grid)` – передача данных;

- `int pss_get_data (void *buf, unsigned int count, unsigned int type_data, unsigned int physical_type_data, unsigned int anchor_point, const void *grid, unsigned int size_grid, unsigned int type_data_grid)` – прием данных;
- `int pss_get_data_nonblock (void *buf, unsigned int count, unsigned int type_data, unsigned int physical_type_data, unsigned int anchor_point, const void *grid, unsigned int size_grid, unsigned int type_data_grid)` – неблокирующий прием данных;
- `int pss_get_global_time_sync_max (double wishful_gl_time_sync, double *pnext_gl_time_sync)` – синхронизация физического времени по критерию максимума;
- `int pss_get_global_time_sync (double wishful_gl_time_sync, double *pnext_gl_time_sync, unsigned int op)` – синхронизация физического шага по времени;
- `int pss_reset_transput_buffer (void)` – сброс обменных буферов;
- `int pss_transfer_barrier (void)` – функция синхронизации счета.

В файле `pss_api.c` содержатся реализации этих функций. Также в этом файле находятся следующие внутренние статичес-

Директория `pss_agent` представляет реализацию агента ИО. Данная директория содержит следующие файлы:

<code>aio.c</code>	Функция <code>main()</code> , инициализация, завершение работы
<code>communication.h</code>	Интерфейсы функций для инициализации/деинициализации коммуникационной среды
<code>communication.c</code>	
<code>operations_task_info.h</code>	Функции для сбора и предоставления информации о расчетном коде
<code>operations_task_info.c</code>	
<code>Service_contacts.h</code>	Главный цикл агента, взаимодействие между агентами кодов
<code>Service_contacts.c</code>	
<code>xml_reader.h</code>	Доступ к потоковому чтению xml-файлов
<code>xml_reader.c</code>	

кие функции для проведения обменов задачи с ее агентом:

- `static int __MPI_BARRIER (void)` – функция-обертка `MPI_Barrier`;
- `static unsigned int get_size_elem_data (unsigned int type_data)` – получение размера типа данных;
- `static int write_agent_info_passed_data (unsigned int dest, unsigned int anchor_point, unsigned int physical_type_data, unsigned int count, unsigned int type_data, unsigned int size_grid, unsigned int type_data_grid)` – запись запроса на передачу;
- `static int write_agent_info_demand_data (unsigned int count, unsigned int anchor_point, unsigned int physical_type_data, unsigned int size_grid, unsigned int type_data_grid, const void *grid)` – запись запроса на прием данных;
- `static int read_data_agent (unsigned int count, unsigned int type_data, void *buf)` – получение данных от агента ИО;
- `static int convert_buf_type (void *buf_dst, void *buf_src, unsigned int count, unsigned int type_data_dst, unsigned int type_data_src)` – приведение типа данных элементов буфера от типа `type_data_src` к типу данных `type_data_dst`.

В файле `pss_api.c` представлены API-функции, которые используют клиентский код, написанный на языке Фортран, для взаимодействия с агентом ИО. Единственное отличие этих функций от описанных в файле `pss_api.h` заключается в том, что возвращаемое значение перенесено в последний дополнительный аргумент.

Файл `aio.c` содержит функцию `main()` и следующие статические функции:

- `static int usage (void)`,
- `static int init (int *pargc, char ***pargv)`,
- `static void safe_exit (int exit_code)`.

Файл `communication.h` содержит интерфейсы функций для инициализации/деинициализации коммуникационной среды, а также для получения статусной информации:

- `int open_communication (int *pargc, char ***pargv)` – данная функция производит инициализацию коммуникационной среды (вызов функции `MPI_Init(...)`) с последующим получением общей информации (вызов функций `MPI_Comm_size(...)` и `MPI_Comm_rank(...)`);
- `int close_communication (void)` – данная функция производит закрытие коммуникационной среды (вызов функции `MPI_Finalize()`);
- `int get_agent_id (void)` – возвращает ранг агента ИО;
- `int get_agents_amount (void)` – возвращает количество запущенных параллельных процессов в ИО, т.е. количество агентов.

В файле `communication.c` находятся реализации этих функций.

Файл `operations_task_info.h` содержит интерфейсы функций, необходимых для сбора и предоставления информации о расчетном коде, которая находится в xml-данных и в конфигурационном файле ИО. Ниже приведен список этих функций:

- `int get_task_info (char *user_xml_dir, char *user_conf_file)` – данная функция про-

изводит получение всех возможных данных о расчетном коде,

- `void free_task_info_structs (void)` – выполняет освобождение памяти, занятой под структуры для хранения информации о задаче.

Далее приведены функции, которые предоставляют доступ к различным данным о задаче. Название функций говорит о типе получаемых данных, поэтому приводить описание для них будет излишним:

- `char *get_task_name (void)` – получить имя обслуживаемой задачи;
- `char *get_conv_name (void)` – получить имя xml-файла с конфигурацией конвертора;
- `char *get_lib_conv_name (void)` – получить имя библиотеки конвертора;
- `box_info *get_first_inbox_info (void)` – получить указатель на структуру, в которой содержится информация о первом `inbox`e`;
- `box_info *get_first_outbox_info (void)` – получить указатель на структуру, в которой содержится информация о первом `outbox`e`;
- `unsigned int get_amount_inboxes (void)` – получить количество `inbox`ов`;
- `unsigned int get_amount_outboxes (void)` – получить количество `outbox`ов`;
- `unsigned int get_amount_contacts (void)` – получить количество классов, с которыми контактирует обслуживаемая задача;
- `int get_class_id_contact (unsigned int num_contact)` – получить идентификационный номер контактирующего класса;
- `int *get_mas_rank_contact (unsigned int num_contact)` – получить список рангов агентов, которые входят в контактирующий класс;
- `unsigned int get_size_mas_rank_contact (unsigned int num_contact)` – получить количество рангов агентов, которые входят в контактирующий класс;
- `unsigned int get_amount_transput_agents (void)` – получить общее количество рангов агентов, которые контактируют с текущим агентом;
- `unsigned int get_amount_task_class_names (void)` – получить количество клас-

сов, к которым принадлежит обслуживаемая задача;

- `int *get_mas_task_classes_id (void)` – получить массив идентификационных номеров классов, к которым принадлежит обслуживаемая задача;
- `int get_rank_agent (void)` – получить ранг текущего агента;
- `int get_amount_tasks (void)` – получить общее количество запущенных задач.

Также в файле `operations_task_info.h` описана структура `box_info`, в которой хранится информация о входных и выходных конверторах. Реализация функций сбора и предоставления информации о расчетном коде находится в файле `operations_task_info.c`. В этом файле размещены также статические внутренние функции для разбора конфигурационных файлов.

В файле `operations_task_info.c` находится описание следующих структур:

- `struct linkage_task_agent` – для хранения информации из конфигурационного файла,
- `task_contact_info` – для хранения информации о контактах с задачей,
- `full_info_about_task` – для хранения всей информации о задаче.

В файле `service_contacts.h` описаны интерфейсы следующих функций:

- `int loop_service_contacts (void)` – содержит главный рабочий цикл агента ИО,
- `void free_service_contacts_structs (void)` – функция освобождения памяти, занятой под рабочие структуры.

В файле `service_contacts.c` находятся реализации этих функций, а также статические внутренние функции для обмена данных агента с задачей и другими агентами и функции-обертки для MPI-вызовов. Также в этом файле описана структура `struct_data`, которая используется для хранения принимаемых и передаваемых данных.

В файле `xml_reader.h` представлены интерфейсы функций, которые предоставляют доступ к потоковому чтению xml-файлов:

- `int new_reader_for_file (char *filename)` – данная функция создает поток для чтения xml-файла `filename` для потокового чтения;

- void del_reader_for_file (void) – удаляет поток для чтения открытого xml-файла;
- char *get_var_value_from_xml (char *varname) – данная функция позволяет получить значение узла varname в xml-данных;
- char *get_current_node_name (void) – получить текущее имя узла;
- int go_to_node_in_xml (char *name_node) – перейти на узел name_node в xml-данных;
- int go_to_next_node_in_xml (void) – перейти на следующий узел в xml-данных;
- char *get_attr_no (int no) – получить значение атрибута с номером по текущему узлу;
- void free_xml_data (char *data) – очистить память, занятую под xml-данные. Необходимо использовать после каждого вызова следующих функций: char *get_var_value_from_xml (char *varname), char *get_current_node_name (void), char *get_attr_no (int no).

Реализация этих функций представлена в файле xml_reader.c.

Директория convertor – реализация системы конвертирования обменных функций, средства динамического подключения конверторов, прототип конвертора пользователя. Данная директория содержит следующие файлы:

ioconv.h	Описание структур для хранения информации, необходимой для конвертирования обменных данных
ioconv_proto.h	Интерфейсы API-функций базового и пользовательского конверторов, а также некоторых служебных функций
ioconv_base.c	Реализация базовой части конвертора
ioconv_user.c	Реализация прототипа пользовательской части конвертора
ioconv_config.c	Разбор xml-файла конфигурации и инициализация конвертора начальными данными
ioconvif.h	Описание интерфейса динамического конвертора
ioconv_load.c	Реализация динамической загрузки конвертора и связывание интерфейса с пользовательскими функциями конвертора

Система конвертирования организована так, что конвертор разделен на базовую и пользовательскую части. Базовая часть является неизменной и настраивается через xml-файл конфигурации. Пользовательская часть по умолчанию только вызывает функции базового конвертора, однако в случае

необходимости пользователь может реализовать свою систему конвертирования путем внесения изменений в файл ioconv_user.c. Подключение конвертора происходит динамически согласно конфигурации РБПО средствами динамически подключаемых библиотек.

Файл ioconv.h содержит объявление служебных структур, необходимых для хранения данных базового конвертора, загружаемых из xml-файла конфигурации:

- ioconv_info – учетная информация конвертора,
- ioconv_dimen – информация по преобразованию физических размерностей,
- ioconv_funcdimen – данные по привязке обменной функции к преобразованию размерности,
- ioconv_userdata – пользовательские данные конвертора,
- ioconv_martable – структура для организации списка для хранения данных карты пересчета точек привязки,
- ioconv_data – общая структура данных конвертора, объединяющая в себе все данные с использованием вышеперечисленных структур.

Файл ioconv_proto.h содержит объявления интерфейсов API-функций базового и пользовательского конверторов, а также некоторых служебных функций базового конвертора.

Конструкторы и деструкторы описанных выше структур данных:

- IOConv_Data*IOConv_Data__IOConv_Data (void);
- void IOConv_Data__DestIOConv_Data (void);

- IOConv_Info *IOConv_Info__IOConv_Info (void);
- void IOConv_Info__DestIOConv_Info (void);
- IOConv_Dimen **IOConv_Dimen__IOConv_Dimen (void);
- void IOConv_Dimen__DestIOConv_Dimen (void);
- IOConv_FuncDimen**IOConv_FuncDimen__IOConv_FuncDimen (void);
- void IOConv_FuncDimen__DestIOConv_FuncDimen (void);
- IOConv_UserData *IOConv_UserData__IOConv_UserData (void);
- void IOConv_UserData__DestIOConv_UserData (void).

Служебные функции базового конвертора:

- int LinkDimensions (void) – производит связывание обменных функций с типами физических преобразований,
- int CheckMapTable (void) – производит проверку корректности задания картограммы пересчета точек привязки.

Служебные функции работы со списком картограммы пересчета точек привязки:

- IOConv_MapTable*GetNextMapTable (void) – переводит текущий элемент списка данных картограммы на следующий,
- IOConv_MapTable* GetFirstMapTable (void) – возвращает первый элемент списка,
- IOConv_MapTable* GetLastMapTable (void) – возвращает последний элемент списка,
- int GetIsFullMapTable (void) – возвращает признак целостности картограммы пересчета,
- void ResetMapTable (void) – сбрасывает указатель текущего элемента на начало,
- void AddToMapTable (IOConv_MapTable *) – добавление элемента,
- void AddToMapTable_point (unsigned int loc_a, unsigned int glob_a) – добавление точки,
- void AddToMapTable_vector (unsigned int loc_a, unsigned int loc_b, unsigned int

glob_a, unsigned int glob_b) – добавление вектора.

Общие функции базового конвертора:

- int Init (void) – инициализация,
- int Finalize (void) – завершение работы с конвертором, любая дальнейшая работа с конвертором запрещена.

Функции базового конвертора преобразования физических величин:

- int LocalToGlobalValue (double *buf, int count, int physical_type_data, unsigned int anchor_point) – пересчет значений к глобальной физической размерности,
- int GlobalToLocalValue (double *buf, int count, int physical_type_data, unsigned int anchor_point) – пересчет значений к локальной физической размерности.

Функции базового конвертора преобразования точек привязки:

- int LocalToGlobalAnchorPoint (unsigned int*local_anchor_point, unsigned int* global_anchor_point) – пересчет точки привязки к глобальной нумерации,
- int GlobalToLocalAnchorPoint (unsigned int *local_anchor_point, unsigned int *global_anchor_point) – пересчет точки привязки к локальной нумерации.

Функции базового конвертора интерполяции физических величин на сетку получателя:

int InterpolValue (int physical_type_data, unsigned int anchor_point, const double *source_buf, int source_count, const double *source_grid, int source_size_grid, unsigned int source_type_data_grid, double *dest_buf, int dest_count, const double *dest_grid, int dest_size_grid, unsigned int dest_type_data_grid) – производит переинтерполяцию значений обменной функции с сетки источника на сетку получателя.

Также здесь содержатся объявления функции конвертора пользователя, функциональная нагрузка которого соответствует функциям базового конвертора:

- int IOConv_Init,
- int IOConv_Finalize,
- int IOConv_LocalToGlobalValue,
- int IOConv_GlobalToLocalValue,
- int IOConv_LocalToGlobalAnchorPoint,

- int IOConv_GlobalToLocalAnchorPoint,
- int IOConv_InterpolValue.

Файл `ioconv_base.c` содержит реализацию функций базового конвертора и его служебных функций, перечень которых приведен выше, а реализации функций пользовательского конвертора собраны в файле `ioconv_user.c`. Данный файл доступен для свободного редактирования пользователем проекта для сохранения возможности написания специальных средств конвертирования данных.

Файл `ioconvif.c` содержит описание интерфейса динамического конвертора и агента ИО. Интерфейс реализован в виде трех структур:

- struct `ioconvif` – собственно интерфейс конвертора;
- struct `io_global_in` – интерфейс преобразования глобальных значений в локальные;
- struct `io_local_in` – интерфейс преобразования локальных значений в глобальные.

В интерфейсах преобразования содержатся указатели на функции, которые будут связаны с функциями конвертора пользователя:

```
struct io_global_in {
int (*g2lv_func)(); /* связывается с функцией
IOConv_GlobalToLocalValue() */
int (*g2la_func)(); /* связывается с функцией
IOConv_GlobalToLocalAnchorPoint() */
int (*Interpol_func)(); /* связывается с функцией
IOConv_InterpolValue() */
};
struct io_local_in {
int (*l2gv_func)(); /* связывается с функцией
IOConv_LocalToGlobalValue() */
int (*l2ga_func)(); /* связывается с функцией
IOConv_LocalToGlobalAnchorPoint() */
};
```

Интерфейс `ioconvif` конвертора содержит две описанных выше структуры `io_global_in` и `io_local_in`, а также два указателя на функции. Первый `*__init_func` будет связан с функцией `IOConv_Init()` инициализации конвертора, а второй `*__fini_func` – с функцией освобождения конвертора `IOConv_Finalize()`.

В файле `ioconv_config.c` реализован внешне доступный метод `configure()`, который осуществляет разбор `xml`-файла кон-

фигурации конвертора и инициализацию начальными данными некоторых глобальных структур конвертора. Прототип функции: `int configure (char *file)`.

Входной параметр `file` есть имя `xml`-файла, задающего конфигурацию конвертора. Возвращаемые значения: – 1 в случае ошибки, 0 в случае нормального завершения.

В файле `ioconv_load.c` реализованы два внешне доступных метода. Один – `load_converter()` выполняет загрузку объектного кода конвертора, второй – `unload_converter()` осуществляет его выгрузку с освобождением занимаемых ресурсов.

Прототип функции загрузки конвертора: `int load_converter (ioconvif_t *ifc, char *file)`. Входные параметры: `ioconvif_t *ifc` – указатель на выделенный в памяти интерфейс `ioconvif` конвертора, `char *file` – имя объектного файла конвертора.

Функция возвращает: 0 в случае нормального завершения; – 1 в случае возникшей ошибки.

Прототип функции выгрузки конвертора: `int unload_converter (ioconvif_t *ifc)`. Входные параметры: `ioconvif_t *ifc` – указатель на выделенный в памяти интерфейс `ioconvif` конвертора.

Функция возвращает: 0 в случае нормального завершения, – 1 в случае ошибки.

Заключение

С помощью программного пакета `PSS_IS` создана первая версия ИС РБППО, поддерживающая РБППО из `ВО STEPAN` и `КОБРА` [3], `MCU` [4], `KORAT-3D` [5], `ПАТЕГ` [6], `SimWorT` [7]. Для этих `ВО` отлажен внутренний интерфейс как между кодом и ИО, так и между `ВО`. Эксперименты проводились на `MBC` и однопроцессорных ПК в ОС `Linux`, `Windows`.

Список литературы

1. Токаренко В.Ф., Беляков И.М., Варгин А.М. и др. Программное обеспечение `PSS_IS` (версия 1.0). Рекламно-техническое описание. Отчет РИЦ “Курчатовский институт” и РФЯЦ-ВНИИЭФ, гос. рег. № 0120.0810069, инв. № 36-10/16-09, 2009.

2. **Токаренко В.Ф., Беляков И.М., Деулин А.А. и др.** Технология разработки программных комплексов, ориентированных на СуперЭВМ, для исследований функционирования сложных технических систем на всех этапах их жизненного цикла. Этап № 3. Экспериментальные исследования поставленных перед НИР задач. Шифр 2007-4-1.4-00-06-085. Отчет РНЦ "Курчатовский институт", гос. рег. № 0120.0810069, инв. № 46-21/14-08, 2008.

3. **Краюшкин А.В., Бабайцев В.Н., Глембоцкий А.В. и др.** Верификационный отчет по программе STEPAN/KOBRA для анализа аварий в РБМК. Отчет РНЦ "Курчатовский институт", инв. № 33-02/30, 2002.

4. **Абагян Л.П., Алексеев Н.И., Глушков А.Е. и др.** Программа MCU-REA_2 с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.2. Отчет РНЦ "Курчатовский институт", № 36/19-2001, 2001.

5. **Федотова Л.П., Шагалиев Р.М.** Математическая методика KORAT-3D численного решения трехмерных групповых задач диффузии нейтронов на регулярных и нерегулярных пространственных сетках // ВАНТ. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1994, вып. 4.

6. **Самигулин М.С., Воронова О.А., Данилов Ю.Ф. и др.** Системный двухжидкостной термогидравлический код РАТЕГ. Моделирование термогидравлики ВВЭР-1000 на внутрикорпусной стадии тяжелой аварии. В сб. "Вопросы безопасности ЯЭС с ВВЭР". Том 2. Анализ аварийных ситуаций: компьютерные коды и экспериментальные исследования. Труды научно-практ. семинара, С.-Петербург, 12-14 сентября 2000 г.

7. **Данилов В.А., Зенков А.Д., Малкин С.Д. и др.** Компьютерная технология SimPort: опыт внедрения // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2002, вып. 3, с. 64-71.

Контактная информация об авторах статьи –

Токаренко Виктор Федорович, нач. лаб., тел.:

(499)196-70-16, e-mail: tyf@dhtp.kiae.ru;

Беляков Игорь Михайлович, нач. отдела, тел.:

(83130)40-740, e-mail: wht@vniief.ru;

Варгин Анатолий Михайлович, нач. отдела,

тел.: (83130)27-418, e-mail: vargin@vniief.ru;

Воронова Ольга Александровна, с. н. с., тел.:

(83130)27-370, e-mail: voronova@vniief.ru;

Данилов Юрий Федорович, с. н. с., тел.:

(83130)28-677, e-mail: danilov@vniief.ru;

Деулин Андрей Александрович, м. н. с., тел.:

(83130)28-865, e-mail: A.Deulin@vniief.ru;

Евдокимов Вячеслав Владимирович, нач. лаб.,

тел.: (83130)28-570, e-mail: slava@vniief.ru;

Кульнев Дмитрий Вадимович, нач. лаб., тел.:

(83130) 28-426, e-mail: dik@vniief.ru;

Лобанов Павел Сергеевич, инженер-програм-

мист, тел.: (83130)28-625, e-mail: P.S.Lobanov

@vniief.ru;

Самигулин Масхуд Сунгатович, нач. лаб., тел.:

(83130)27-401, e-mail: sms@vniief.ru;

Семенов Георгий Петрович, нач. лаб., тел.:

(83130)27-237, e-mail: semenov@vniief.ru;

Шагалиев Рашид Мирзагалиевич, нач. отдела-

ния, тел.: (83130)28-314, e-mail: R.M.Shagaliev

@vniief.ru;

Шемякина Татьяна Вячеславовна, н. с., тел.:

(83130)28-162, e-mail: tshem@vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 4,

с. 55-65.

Адаптация программы MCU-PD к параллельным вычислениям на многопроцессорных компьютерах

М.И. Гуревич, Д.С. Олейник, Д.А. Шкаровский,

РНЦ "Курчатовский институт", 123182, Москва, пл. Курчатова, 1

Поступила в редакцию 01 июня 2009 г.

Программа MCU-PD предназначена для моделирования на многопроцессорных компьютерах процессов переноса нейтронов, фотонов, электронов и позитронов аналоговыми и неаналоговыми методами Монте-Карло на основе оцененных ядерных данных в системах с трехмерной геометрией с учетом изменения изотопного состава материалов. Распараллеливание программы осуществлено на основе библиотеки функций MPI (Message Passing Interface), которая является наиболее распространенным стандартом обмена данными в параллельном программировании. Реализации библиотеки MPI существуют для большого числа операционных систем (ОС). Для установки программы на многопроцессорные компьютеры достаточно наличия на них реализации MPI и компилятора Фортран-90/95. При работе в режиме многопроцессорных вычислений программа может задействовать для расчета все доступные ей процессоры. Время расчета с использованием нескольких процессоров обратно пропорционально числу задействованных процессоров при отсутствии промежуточного обмена данными. Описаны алгоритмы распараллеливания программы и приведены результаты выполненных тестовых расчетов на многопроцессорных компьютерах.

Ключевые слова: программа MCU-PD, метод Монте-Карло, параллельные вычисления.

Adaptation of MCU-PD Code to Parallel Computing on Multiprocessor Computer. *M.I. Gurevich, D.S. Oleynik, D.A. Shkarovsky, RRC "Kurchatov Institute", 1, Kurchatov Sq., Moscow, 123182.* MCU-PD code is developed to simulate processes of neutron, photon, electron and positron transport using analog and non-analog Monte Carlo methods taking into account fuel burn up. That code is adapted for multiprocessor computing. Simulation is realized on estimated nuclear data basis and for models with three-dimensional geometry. Code parallelization is accomplished using MPI (Message Passing Interface), which is widespread standard of data exchange in parallel programming. It is important that MPI's implementations exist for plenty of operating systems. There are enough installed MPI and Fortran-90/95 compiler versions to mount MCU-PD code. Multiprocessor version of the code is able to use all available processors to perform calculations. In that case computation time inversely proportional by amount of enabled processors taking into account that intermediate data exchange is absent. In this paper algorithms of the code parallelization and results of test calculations are described.

Key Words: MCU-PD Code, Monte Carlo Method, Parallel Computing.

Введение

В последнее время для увеличения производительности вычислительных систем все больше внимания уделяется развитию параллельных вычислений на многопроцессорных компьютерах, которые за счет выполнения расчетных задач на нескольких процессорах значительно увеличивают скорость вычислений. Многопроцессорные компьютеры уже применяются в практике проведения математического моделирования сложных физических процессов [1].

В настоящее время в РНЦ "Курчатовский институт" работает суперкомпьютер, пиковая производительность которого со-

ставляет около 32 Тфлоп. Он объединяет в себе 3 456 процессорных ядер и занимает 118-е место в последней, на момент написания статьи, редакции списка самых высокопроизводительных систем мира (3-е место в России), уступая в производительности самому мощному компьютеру в 45 раз и самому мощному отечественному – в 3 раза.

Управление вычислениями на нескольких процессорах осуществляется с использованием специальных программных средств, требующих разработки соответствующих алгоритмов адаптации программ к параллельным вычислениям.

Выполнены работы по распараллеливанию программы MCU-PD [2...5]. Создана

версия программы с параллельными вычислениями на основе библиотеки функций MPI [6] – наиболее распространенного стандарта обмена данными в параллельном программировании.

Программа предназначена для моделирования процессов переноса нейтронов, фотонов, электронов и позитронов аналоговыми и неаналоговыми методами Монте-Карло на основе оцененных ядерных данных в системах с трехмерной геометрией с учетом изменения изотопного состава материалов. Основная область применения – расчет нейтронно-физических характеристик реакторных установок типа ВВЭР и PWR.

Программа адаптирована к параллельным вычислениям на различных многопроцессорных вычислительных системах. Приводится описание реализации алгоритмов распараллеливания программы MCU-PD.

1. Алгоритмы распараллеливания

1.1. *Выбор программных средств.* Методологии параллельного программирования для вычислительных систем с разными видами архитектуры отличаются друг от друга, и средства для распараллеливания программ, вводимые в язык программирования, обычно тоже различны.

Основным параметром классификации параллельных компьютеров служит наличие общей (SMP) или распределенной (MPP) памяти. Нечто среднее между SMP и MPP представляют собой NUMA-архитектуры, где память физически распределена, но логически общедоступна. Кластерные системы являются более дешевым вариантом MPP.

При поддержке команд обработки векторных данных говорят о векторно-конвейерных процессорах, которые в свою очередь могут объединяться в RVP-системы с использованием общей или распределенной памяти. Все большую популярность приобретают идеи комбинирования разных архитектур в одной системе и построения неоднородных систем [7].

Для каждого типа архитектуры имеют свои стандарты функций обмена данными между параллельными процессами для

реализации вычислений. Например, для модели с разделяемой памятью таким стандартом служит библиотека функций OpenMP, для модели с распределенной памятью – MPI, для смешанной архитектуры применяется комбинированный подход MPI + OpenMP и т.д.

Авторам программы MCU-PD в настоящее время доступны в основном многопроцессорные вычислительные системы для проведения расчетов, основанные на архитектуре с распределенной памятью. Кроме того, разработчиками MCU-PD из четырехядерных персональных компьютеров, объединенных друг с другом посредством локальной сети, собран вычислительный кластер.

Библиотека функций MPI хорошо согласуется с языками программирования семейства Фортран, на одном из которых (Фортран-90/95) написана программа MCU-PD. Данная библиотека функций удовлетворяет требованию максимальной независимости от используемой на кластере ОС. Таким образом, полученная программа без дополнительных изменений функционирует под управлением ОС семейств Unix и Windows. Принимая во внимание вышеизложенное, для адаптации программы MCU-PD к параллельным вычислениям выбран стандарт MPI.

Во многих реализациях параллельных вычислений существует процесс, который необязательно полностью задействует всю мощность отдельного процессора (здесь и далее каждое ядро многоядерного процессора рассматривается как самостоятельный процессор), осуществляя функцию мониторинга всех вычислительных процессоров, участвующих в расчете, и распределяя между ними задачи. Функция мониторинга должна иметь очень короткое время отклика на запрос любого процесса.

В идеале процесс, осуществляющий эту функцию, должен находиться в состоянии ожидания события, требующего обработки на межпроцессорном уровне, или в цикле проверок сигнала о его появлении. В этом случае при реализации один процессор будет фактически исключен из работы. При современных условиях эксплуатации прог-

раммы MCU-PD основные параллельные вычисления проводятся на небольших (порядка 16...32 процессоров) кластерах. В этом случае выделение даже одного процессора на выполнение функций мониторинга всей задачи оказывается неоптимальным.

В программе реализован подход, ориентированный на минимизацию числа синхронизаций работы процессоров, тем более что метод Монте-Карло допускает почти независимую работу отдельных процессоров. Один процессор, которому присваивается нулевой номер (далее называемый нулевым процессором), организует достаточно длинные независимые вычислительные интервалы работы остальных процессоров и также выполняет вычисления.

Длительность интервалов между обменами данных регулируется пользователем, который может выполнить вычисления с одной единственной синхронизацией в конце расчета, т.е. межпроцессорные обмены информацией будут отсутствовать. Такая организация обеспечивает возможность работы программы MCU-PD не только на кластерах со специальными коммуникационными платами, но и на обычных сетях ЭВМ, где скорость обмена информацией значительно ниже по сравнению со скоростью вычислений.

1.2. Постановка задачи. Процесс моделирования переноса излучений методом Монте-Карло в программе MCU-PD заключается в моделировании траекторий частиц, включающем их генерацию, розыгрыш свободных пробегов и взаимодействие частиц с веществом.

Моделируемые частицы объединяются в поколения фиксированной длины. При решении однородной задачи нейтроны, получающиеся в результате деления ядер нейтронами одного поколения, образуют следующее поколение. При моделировании одной траектории ей ставится в соответствие некая оценка (вклад в оценку вычисляемого функционала Y , от данной траектории).

При решении неоднородной задачи этот вклад – случайная величина с математическим ожиданием, равным искомому

значению функционала, нормированному на один нейтрон источника. Для неоднородных задач вклады траекторий являются независимыми случайными величинами. В случае неоднородной задачи нейтрон деления относится к тому же поколению, в котором находился породивший его нейтрон. Когда поколение вместе с такими новыми частицами будет исчерпано, источник выработывает новое.

Для однородной задачи траектории частиц и, следовательно, их вклады в оценки функционалов нельзя рассматривать как независимые, так как траектория частицы, рожденной в результате деления, связана с траекторией частицы, вызвавшей это деление. Поэтому при решении однородных задач несколько последовательных поколений объединяют в серию. Это необходимо для правильной оценки среднеквадратической погрешности. Если длина серии достаточно велика, то суммарные вклады по сериям можно считать независимыми случайными величинами и дисперсию оценки вычислять без учета корреляций между сериями.

Введем следующие обозначения: N_{tot} – число частиц, рождающихся в первом поколении; N_{bat} – число поколений в серии; $M = N_{\text{tot}}N_{\text{bat}}$ – число траекторий в серии; N – полное число моделируемых серий.

Предположим, что функционал только один. Тогда вклад i -й траектории в оценку функционала на j -й серии обозначим через η_{ij} и вклад в оценку j -й серии

$$\eta_j = \eta_{1j} + \eta_{2j} + \dots + \eta_{Mj}.$$

Так как случайные величины η_j считаются независимыми, то оценка нормированного на один нейтрон функционала

$$y = (\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_N) / (MN) \quad (1)$$

Оценка его дисперсии

$$\sigma^2 = \frac{(\eta_1^2 + \eta_2^2 + \dots + \eta_N^2 - y^2 M^2 N)}{M^2 N (N - 1)}. \quad (2)$$

Предположим, что имеется P процессоров ($\Pi_0, \Pi_1, \dots, \Pi_{P-1}$) и обеспечена статистическая независимость моделирования на каждом процессоре. В этом случае величины $\eta_i^{(k)}$ и $\eta_j^{(l)}$ (верхний индекс – номер процессора) независимы при любых $i, j \in [1, N]$, $k, l \in [0, P - 1]$.

Тогда оценки значения функционала и дисперсии этой оценки осуществляются по формулам

$$y = A_1 / (PMN); \quad (3)$$

$$\sigma^2 = (A_2 - y^2 PMN^2) / [N(N-1)(MP)^2], \quad (4)$$

где $A_m = \sum_{k=0}^{p-1} \sum_{j=1}^N (\eta_j^{(k)})^m$ – ненормированный m -й выборочный момент.

Таким образом, для независимого моделирования достаточно накопить суммы

$$A_1^{(k)} = \sum_{j=1}^N \eta_j^{(k)}$$

$$\text{процессора } A_2^{(k)} = \sum_{j=1}^N (\eta_j^{(k)})^2.$$

Затем на одном процессоре можно их просуммировать и получить окончательное значение оценки функционала и его статистической погрешности. Эта процедура на несколько порядков менее трудоемка, чем накопление сумм $A_1^{(k)}$ и $A_2^{(k)}$, следовательно, коэффициент распараллеливания будет практически равен 1.

Необходимость расчета многих функционалов принципиально ничего не меняет в проведении вычислений. Достаточно представить вклады траекторий и серий η_{ij} и η_j , а также их выборочные моменты $A_m^{(k)}$ и A_m , как векторы, компоненты которых индексированы числами r – номерами оцениваемых функционалов.

1.3. Статистическая независимость моделирования. Наиболее корректный способ обеспечения статистической независимости моделирования на процессорах Π_0, Π_1, \dots – это использование на каждом процессоре своей последовательности случайных чисел, независимой по отношению ко всем остальным.

В настоящее время существуют генераторы случайных чисел, имеющие практически неограниченный набор допустимых начальных значений ($\sim 10^6$), каждое из которых дает независимую от других последовательность случайных чисел. В программу MCSU-PD специально для создания параллельной версии включен генератор псевдослучайных чисел [8], алгоритм которого основан на числах Фибоначчи и обеспечивает

получение таких независимых последовательностей.

Библиотека функций MPI позволяет каждому процессору обладать информацией о его порядковом номере в расчете, который может служить в качестве уникального для каждого процессора начального значения генератора случайных чисел. Самый простой способ инициализировать генератор случайных чисел заключается в применении p -го значения, где $0 \leq p < P$ – порядковый номер процессора.

В программе MCSU-PD использован альтернативный алгоритм, согласно которому берется величина $54\ 217\ 137 + 2p$ в качестве начального значения генератора случайных чисел. Данный алгоритм выработан на основе некоторого количества тестов, цель которых заключалась в выборе таких начальных значений генератора случайных чисел, чтобы минимизировать оценки отклонений и неравномерностей.

1.4. Счет с продолжением. При моделировании переноса излучений методом Монте-Карло часто трудно заранее предсказать, какое количество серий придется промоделировать для достижения необходимой точности. Поэтому нужно обеспечить возможность продолжения набора статистики после остановки расчета. Также это бывает необходимо ввиду того, что вычисления методом Монте-Карло достаточно продолжительны по времени, а наличие контрольных точек и возможность продолжения набора статистики защищают расчеты от сбоев в работе ЭВМ.

Всю информацию, необходимую для продолжения счета, можно разбить на две категории: постоянную, созданную в процессе подготовки к проведению моделирования, и переменную информацию, изменяемую в процессе вычислений.

При работе на суперкомпьютерах коллективного пользования нельзя сказать заранее, на каких физических процессорах окажется задача при повторных запусках, и, следовательно, собственную память процессоров на внешних носителях можно применять лишь для хранения временных файлов, создаваемых на время счета. Для

размещения переменной информации приходится использовать память на общем внешнем носителе. Именно этот ресурс может оказаться для пользователя самым дефицитным.

Постоянная информация не представляет больших проблем при распространении ее по всем процессорам, участвующим в расчете, так как при ее создании все процессы находились в одинаковом состоянии и, следовательно, она едина для всех. Эта информация дублируется на все процессоры. Ее объем тот же, что и при вычислениях на одном процессоре.

Переменная информация уникальна для каждого процессора, поэтому необходимость ее распространения по всем процессорам могла бы потребовать огромных объемов памяти. Например, при расчетах с применением одного процессора по программе MCU-PD задач на выгорание под информацию, изменяемую в процессе счета, может потребоваться до 25 Мбайт на внешнем носителе.

Для сокращения объема требуемой памяти на внешних носителях проанализирован состав сохраняемой там информации. Переменную информацию можно разделить на несколько классов.

а) *Информация о состоянии процесса моделирования*

Данный класс состоит из информации, определяющей моделирование траекторий частиц. Это наиболее важный класс, так как именно на независимости моделирования траекторий базируются все оценки. Разумеется, нет нужды обеспечивать возможность прерывания процесса в любой точке – это потребовало бы сохранять всю промежуточную временную информацию.

В процессе расчета по программе MCU-PD существует момент, наиболее подходящий для прерывания работы и/или сохранения информации. Это момент, когда заканчивается моделирование всех частиц в серии. В этой точке ни одна из частиц не находится в процессе моделирования, поэтому вся информация сводится к состоянию генератора случайных чисел, фазовым координатам и нескольким дополнительным

характеристикам частиц очередного поколения.

Объем данных для следующего поколения частиц, ждущих обработки при решении однородных задач, не так уж мал. На каждую частицу надо отвести один байт на ее тип, шесть действительных чисел – на фазовые координаты, одно число – на время и еще два – на комплексный вес при решении задач с заданным значением баклинга. Для ускорения вычислений используются дополнительные геометрические параметры, количество которых зависит от типа решаемых задач.

В результате в программе MCU-PD на хранение информации об одной частице затрачивается до 80 байт. Объем данных зависит от решаемых задач и в настоящее время обычно содержит информацию о 2 000 частиц в поколении, но при расчете реактора в целом в связи с необходимостью получения подробного пространственного распределения потоков могут понадобиться и большие числа частиц в поколении.

Таким образом, на один процессор для хранения этого класса переменной информации требуется порядка 80 N_{tot} байт памяти, что в большинстве расчетов не превышает 200 кб. Такой объем необходимой памяти вполне доступен.

При создании версии программы с распараллеливанием вычислений модернизирована работа с банком частиц, ждущих обработки, так как не было существенной необходимости экономить память на внешнем носителе. На кластерах практически всегда имеется ограничение дискового пространства для пользователя, поэтому проведенная модернизация программы в данном случае заключалась в том, что перед записью на внешний носитель производится удаление лишней информации из банка.

При решении неоднородных задач работа с любым пакетом начинается с моделирования рождения новых частиц внешним источником. На внешний носитель из банка не требуется ничего сохранять за исключением заголовков очередей частиц из банка – меньше 200 байт, и это автоматически учитывается переупаковкой, так как все очереди в этот момент пусты.

б) Накапливаемая статистика

Этот класс составляют суммы вкладов траекторий в различные функционалы, а также суммы степеней этих вкладов, используемые для оценок статистических погрешностей. Ввиду большого числа одновременно оцениваемых функционалов в программе MCU-PD этот класс информации составляет более 75 % от всего объема данных, а в задачах с большим числом временных точек расчета, в которых сохраняется информация на внешний носитель, опережает практически весь объем данных.

Отметим, что данные этого класса по отдельности не нужны, а требуются лишь их суммы

$$A_v = A_v^{(0)} + \dots + A_v^{(p-1)}.$$

Библиотека функций обмена данными MPI производит объединение этих сумм по мере расчета и хранит лишь его. В программе MCU-PD это делается следующим образом.

Вводится понятие шага процесса, состоящее из фиксированного числа D серий. Тогда вычисления состоят из выполнения Q шагов, т.е. $N = DQ$. Для всех сумм вводится второй верхний индекс, означающий номер серии на шаге, а нижний индекс j теперь означает номер шага. Например, $\eta_j^{(k,l)}$ означает сумму вкладов в оценку функционалов, вычисленных на l -й серии, на j -м шаге, на k -м процессоре.

Вместо оценок $A_v^{(k)}$ функционала, вычисленных на k -м процессоре, на каждом шаге вычисляются суммы

$$B_{mj}^{(k)} = \sum_{l=1}^D (\eta_j^{(k,l)})^m.$$

Во время набора статистики на k -м шаге процессоры работают совершенно независимо. После его окончания средствами MPI на нулевом процессоре образуется общая сумма

$$B_{vj} = \sum_{k=0}^{p-1} B_{vj}^{(k)},$$

и теперь нулевой процессор вычисляет глобальную оценку $S_{vj} = S_{v,j-1} + B_{vj}$ ($S_{v,0} = 0$) по результатам вычисления на всех применяемых в расчете процессорах, которая в конце вычислений совпадает с суммой A_v . На внешний носитель сохраняются только суммы $S_{v,j}$.

Точно такой же метод используется для оценок ковариаций функционалов. Если необходимо оценить ковариацию двух функционалов с номерами λ и μ , то оценивается их второй смешанный момент. Добавляя во все обозначения дополнительный нижний индекс – номер функционала, получим следующую последовательность оценок:

$$B_{\lambda\mu}^{(k)} = \sum_{l=1}^D (\eta_{\lambda}^{(k,l)} \eta_{\mu}^{(k,l)}).$$

На нулевом процессоре с помощью MPI образуется сумма $B_{\lambda\mu} = \sum_{k=0}^{p-1} B_{\lambda\mu}^{(k)}$, и он образует глобальную оценку

$$S_{\lambda\mu} = S_{\lambda-1,\mu} + B_{\lambda\mu} \quad (S_{0\lambda\mu} = 0).$$

Значение этой величины, деленное на $(MPN)^2$, и есть оценка второго смешанного момента.

в) Информация для увеличения скорости вычислений

К этому классу относятся дополнительные данные, существенно ускоряющие вычисления. Простейший пример такой информации – списки, которые составляются для каждой геометрической зоны и определяют, какие геометрические зоны примыкают к каждой ее грани.

Подобная информация в программе MCU-PD применяется геометрическим модулем и модулем источников. Особенность этого класса информации в том, что данные, полученные любыми процессорами, эквивалентны между собой. Поэтому сохраняются данные только нулевого процессора и в начале продолжения счета именно они используются другими процессорами. Таким образом, дублирование данных по процессорам не происходит и, следовательно, их объем не критичен.

Отсутствие дублирования дает возможность заносить вышеописанную информацию в один массив, минимизируя время, затраченное на обмен данными между процессорами.

1.5. Дополнительная синхронизация.

В конце каждого шага помимо объединения статистики, полученной на разных процессорах, в программе MCU-PD производится еще один обмен данными между процессорами.

В исходных данных задачи задается максимальное время T_{\max} счета, в течение которого может выполняться ее расчет. При этом, поскольку для продолжения счета задача должна быть остановлена после полного завершения шага без потери накопленной информации (неаварийно), оценивается время моделирования траекторий одной серии $T_c = T_{\text{затр}} / (DQ_3)$, где Q_3 – число шагов, сделанных к данному моменту, а $T_{\text{затр}}$ – затраченное на это время.

Далее определяется оставшееся время $T_0 = T_{\max} - T_{\text{затр}}$ и, если $(1 - \epsilon)T_0 < T_c D$, то последний шаг укорачивается до $D_n = [(1 - \epsilon)T_0 / T_c]$ серий, а если $D_n = 0$, то вычисления прерываются. По умолчанию величина ϵ равна 0,05, что минимизирует возможные потери накопленной информации при условии, что время, требуемое на расчет одной серии, определяется с 5 %-й точностью.

Поскольку моделирование на разных процессорах происходит независимо, то величины $T_{\text{затр}}$, T_0 , T_c могут отличаться, поэтому определением условия окончания задачи занимается только нулевой процессор. Он рассылает величину D или D_n , которая и служит признаком останова для процессоров.

1.6. Параллельные вычисления в модуле выгорания. Программа MCU-PD адаптирована к проведению параллельных вычислений расчета изменения изотопного состава (выгорания) материалов в процессе кампании реакторной установки. Под материалом понимается геометрическая зона, ограниченная плоскостями и поверхностями второго порядка, параметры которых задаются пользователем. Помимо этого данная геометрической зона определяется температурой, списком нуклидов, содержащихся в ней, их ядерной концентрацией и др.

Расчет изменения изотопного состава одного материала заключается в нахождении решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, которое не зависит от решения для других материалов. Это в значительной степени облегчило процесс распараллеливания вычислений, организованный следующим образом.

Нулевой процессор снабжает каждый из остальных процессоров данными для расчета выгорания одного материала, после чего сам начинает расчет выгорания очередного материала. Закончив свой расчет, нулевой процессор сохраняет его результаты на внешний носитель. После этого он последовательно собирает результаты вычислений других процессоров и сохраняет их на внешний носитель.

Такой подход экономит оперативную память нулевого процессора, поскольку в каждый момент времени в ней содержится информация только об одном материале. Далее нулевой процессор снова снабжает остальные информацией о необработанных материалах и проводит собственные вычисления. Этот цикл продолжается до тех пор, пока не будут получены решения для всех материалов.

Возникающие при таком подходе простои процессоров, которые ожидают новые данные, в основном невелики, так как времена, затрачиваемые на получение решения для разных материалов, мало отличаются друг от друга. Таким образом, время ожидания ненулевым процессором новых данных определяется в основном скоростью записи на внешний носитель, так как межпроцессорный обмен информацией происходит достаточно быстро.

Помимо этого потеря времени возникает в том случае, когда количество выгорающих материалов не кратно количеству процессоров. В этом случае часть процессоров простаивает, ожидая пока остальные закончат расчет “своего” очередного материала. Однако, как показывает практика, время собственно расчета одного материала достаточно мало для того, чтобы пренебречь этим недостатком.

Описанный выше подход, не нарушая архитектуру программы расчета изотопного состава материалов в процессе облучения, значительно повысил ее производительность. При этом коэффициент распараллеливания составляет около 0,8 и зависит в основном от скорости обмена данных между программой и внешним носителем.

1.7. Схема вычислений на многопроцессорных компьютерах. Общая схема

расчета при этом совпадает со схемой расчета на одном процессоре [2].

Вычисление одного состояния реактора с заданным изотопным составом материалов методом Монте-Карло осуществляется как последовательное выполнение трех шагов с условными названиями INPUT, CALCULATION и OUTPUT, которые отвечают соответственно за ввод исходных данных и подготовку к началу вычислений, моделирование методом Монте-Карло уравнения переноса излучений, финальную обработку.

На шаге INPUT производятся ввод исходных данных, подготовка и запись в рабочие файлы задачи информации для проведения расчета. С запуска этого шага начинается расчет каждого варианта. Успешное завершение работы шага служит необходимым условием для запуска и работы остальных шагов. После выполнения шага образуется файл, куда заносится вся диагностика: предупреждения и сообщения об ошибках в исходных данных. При обнаружении ошибок их необходимо исправить и произвести запуск шага заново.

На последующих шагах CALCULATION и OUTPUT режим работы определяется содержанием текстового файла, который образуется путем автоматического редактирования файла с исходными данными на шаге INPUT. Пользователь может переопределить значения управляющих параметров, содержащихся в этом файле.

На шаге CALCULATION осуществляется непосредственное моделирование методом Монте-Карло уравнения переноса излучений. Во время работы на этом шаге происходит периодическая запись информации, накопленной в результате моделирования, в бинарный файл на внешний носитель. Это позволяет многократно прерывать и возобновлять вычисления без потери накопленных за время расчета результатов, а также застраховаться от потери информации в случае непредвиденного сбоя в работе ЭВМ.

На шаге OUTPUT происходят финальная обработка и запись результатов расчета в текстовый файл для их дальнейшего анализа. Данный шаг может быть выполнен после первой записи накопленной по ито-

гам моделирования информации в бинарный файл на предыдущем шаге. Как правило, это рекомендуется делать только после накопления значимой статистики.

При расчетах вариантов с изменением изотопного состава материалов реактора в процессе кампании к трем шагам расчета одного состояния добавляется шаг BURNUP. В этом случае схема расчета выглядит следующим образом. Сначала последовательно выполняются шаги INPUT, CALCULATION, OUTPUT, а потом на шаге BURNUP производится расчет новых составов материалов реактора с учетом результатов расчета потоков нейтронов и сечений скоростей реакций, вычисленных на шаге CALCULATION. Полученные изотопные составы записываются в обменный файл в формате, пригодном для использования на шаге INPUT.

Если после выполнения шага BURNUP все заданные в исходных данных шаги разбиения кампании выполнены, то программа завершает свою работу, в противном случае осуществляется переход на шаг INPUT, на котором новый изотопный состав материалов берется из обменного файла, образованного на шаге BURNUP, при его наличии в директории с файлом исходных данных.

При расчетах вариантов с изменением изотопного состава материалов реактора в процессе кампании после окончания шага OUTPUT часть полученных к данному моменту времени файлов, содержащих полезную информацию для пользователя, копируется в файлы, имеющие такие же имена, но к расширениям которых добавлено окончание вида '_Вn', где n – это количество шагов BURNUP, завершившихся к данному моменту времени.

В режиме многопроцессорных вычислений нулевой процессор помимо собственно счета контролирует прохождение задачи. Таким образом, однопроцессорный расчет с точки зрения программы – это расчет, выполняемый только на нулевом процессоре.

Управляющие файлы с уникальной для каждого процессора информацией, создаваемые ненулевыми процессорами, получают дополнение к расширению вида '_Pn', где n – номер процессора.

2. Тестовые расчеты

Параллельные вычисления выполняются на шагах CALCULATION и BURNUP, тогда как шаги INPUT и OUTPUT реализуются только на нулевом процессоре. При продолжении расчета необходимо применять то же количество процессоров, что и при первичном счете, и процедура запуска на продолжение выполняется так же, как и в случае вычислений на одном процессоре. При задании другого количества процессоров программа не выйдет на счет. Все шаги не связаны между собой с точки зрения запрашиваемого числа процессоров.

Как сказано раньше, шаги INPUT и OUTPUT могут выполняться на одном процессоре, при этом шаги CALCULATION и BURNUP можно осуществить на любом количестве процессоров. Это может быть полезно при расчетах на кластерах с высокой загруженностью очереди, поскольку позволяет выполнять отдельные этапы на одном процессоре, доступ к которому получить, как правило, легче.

Количество серий для моделирования, задаваемое в исходных данных, относится к *одному* процессору. Общее количество серий, которое будет промоделировано, получается умножением заданного количества серий на заказанное количество процессоров.

Сбор информации, накопленной процессорами, осуществляется в моменты промежуточной и финальной записей на диск. В момент промежуточной записи происходит наибольшая потеря скорости вычислений, поскольку возникают затраты времени на синхронизацию процессоров и запись на диск. Данная синхронизация связана с необходимостью сбора всей переменной информации нулевым процессором и дальнейшим сохранением ее на общий внешний носитель. Однако, так как частота этого события регулируется пользователем, программу можно эффективно использовать и в системах с медленными дисками и межпроцессорными обменами памятью.

Пользователю рекомендуется выбирать максимально возможный, но приемлемый с точки зрения аварийного прерывания счета интервал для сохранения промежуточных результатов на внешний носитель.

2.1. Описание расчетной модели. Для тестирования распараллеленной версии программы MCU-PD выбрана полномасштабная трехмерная модель ВВЭР-1000 1-го блока Волгодонской АЭС [9].

Активная зона состоит из гексагональных тепловыделяющих сборок (ТВС) различного типа, отличающихся материальным составом топлива, и окружена отражателем, в состав которого входят, начиная от центра: водяной зазор (1 мм от контура ТВС); стальная выгорodka с заполненными водой цилиндрическими каналами; шахта реактора; вода; корпус реактора.

ТВС состоит из 331-й гексагональной ячейки. По геометрии и конфигурации материалов различают четыре типа ячеек: ячейка с окисным топливом разного обогащения по изотопу ^{235}U (1,6, 2,4, 3,3 и 3,7 % весовых), центральная трубка/направляющий канал, каналы с выгорающим поглотителем и поглощающим элементом, который может перемещаться по вертикали. При вводе в ТВС выгорающих поглотителей или поглощающих элементов происходит вытеснение воды из направляющих каналов активной зоны.

В модели применяются 7 различных по обогащению и конфигурации типов ТВС.

Каналы с поглощающими элементами в определенных ТВС, входящих в органы регулирования системы управления и защиты, образуют группы общим числом 10. Положение группы задается процентом извлечения (от 0 до 100 %) из активной зоны. Полное описание модели приводится в [9].

2.2. Результаты расчетов. Расчеты по программе MCU-PD проводились на кластере, собранном в ИЯР РНЦ "Курчатовский институт" из отдельных персональных 4-х ядерных компьютеров, объединенных в локальную сеть.

В многопроцессорном режиме рассчитаны 14 различных состояний трехмерной полномасштабной модели активной зоны реактора типа ВВЭР-1000 1-го блока Волгодонской АЭС. Основные параметры рассчитанных состояний приведены в [9].

Расчетная модель реактора задавалась без наличия симметрии в исходных данных, чтобы оценить достоверность статистической погрешности рассчитанных энерговыделений в отдельных ТВС. Подобная оценка получается из анализа отклонения результатов для симметрично расположенных ТВС, которое должно согласоваться с величиной статистической погрешности.

При проведении расчетов выбранных состояний активной зоны по программе MCU-PD использовались следующие параметры моделирования:

- нейтроны нулевого поколения распределены равномерно по объему, занятому топливом в активной зоне;
- число нейтронов в поколении $N_{\text{tot}} = 3\ 000$;
- число поколений, объединенных в серию для корректной оценки статистической погрешности, $N_{\text{bat}} = 400$;
- число промоделированных поколений 34 000;
- время вычислений на 16-ти ядрах (тактовая частота ядра 2,66 ГГц) ≈ 33 часа.

Время, затраченное на расчет, позволяет предположить, что при современных темпах развития вычислительной техники (увеличение тактовой частоты процессора, оптимизация встроенного математического аппарата ЭВМ, увеличение числа процессоров и др.) в ближайшем будущем станет возможным в сравнимые с инженерными программами сроки получать по программе MCU-PD нейтронно-физические характеристики реакторных установок в процессе кампании.

В качестве результатов расчетов рассматривались эффективный коэффициент размножения, эффективность сброса АЗ и пространственное энерговыделение. Выполнено сравнение результатов с расчетами по инженерной программе БИПР-7А [10], реализующей метод Монте-Карло программе ПРИЗМА-Д [11] и с экспериментом [12].

Оценки эффективности сброса АЗ, полученные по программам, хорошо согласуются между собой (в пределах $\sim 1,5\%$), тогда как различие с экспериментальными

данными достигает 10 %. Можно предположить, что отличие расчетных данных от экспериментальных объясняется недостаточной точностью измерения эффективности сброса АЗ (табл. 1).

Таблица 1. Эффективность сброса АЗ с учетом начального состояния, %

MCU-PD	БИПР-7А	ПРИЗМА-Д	Эксперимент
6,74	6,80	6,84	6,38 ± 0,38

Результаты расчетов, полученные по программам MCU-PD и ПРИЗМА-Д, демонстрируют хорошее согласие между собой в пределах статистической погрешности. Различие в $K_{\text{эф}}$ составляет менее 0,2 % (табл. 2), в полях энерговыделения – около 2 %.

Таблица 2. Эффективный коэффициент размножения нейтронов

№ состояния	MCU-PD	БИПР-7А	ПРИЗМА-Д
2	1,0025	1,0039	1,0015
7	1,0019	1,0030	1,0009
8	1,0022	1,0030	
9	1,0026	1,0032	
10	1,0017	1,0024	
11	1,0028	1,0030	
12	1,0026	1,0026	
13	1,0023	1,0034	
15	1,0028	1,0036	1,0017
17	1,0031	1,0034	
20	1,0025	1,0025	
21	1,0014	1,0016	
A1	1,0025	1,0040	1,0016
A2	0,9391	0,9398	0,9374

Различие результатов пространственного энерговыделения между реперными программами и БИПР-7А много больше и достигает $\sim 11\%$, но не выходит за пределы точности, заявленной разработчиками программы. Статистические погрешности, рассчитанные по программе MCU-PD, хорошо согласуются с отклонением в симметричных ТВС. Различие в $K_{\text{эф}}$ составляет менее 0,25 % (табл. 2). Результаты расчетов по трем программам и подробный анализ сравнения приведены в [13, 14].

При работе в режиме многопроцессорных вычислений программа использовала

для расчета все доступные ей процессоры. Коэффициент распараллеливания программы близок к 1, поскольку для обеспечения защиты от сбоев в работе ЭВМ сохранялись промежуточные записи. В отсутствие этих записей, согласно предварительным тестам, коэффициент распараллеливания равен 1.

Заключение

Создана версия программы MCU-PD с параллельными вычислениями оценок нейтронно-физических характеристик реакторных установок типа ВВЭР и PWR на основе библиотеки функций MPI [6] как наиболее распространенного стандарта обмена данными в параллельном программировании. Реализации этой библиотеки существуют для большого числа ОС. Для установки программы на многопроцессорную ЭВМ достаточно наличия на ней любой реализации MPI с любым компилятором языка Фортран-90/95.

При работе в режиме многопроцессорных вычислений программа использует для расчета все доступные ей процессоры. Время расчета с применением нескольких процессоров при отсутствии промежуточных записей данных на диск почти обратно пропорционально числу задействованных процессоров.

В режиме параллельных вычислений по программе MCU-PD выполнены расчеты эффективного коэффициента размножения и пространственного распределения энерговыделения для 14 состояний трехмерной полномасштабной модели активной зоны ВВЭР-1000 1-го блока Волгодонской АЭС.

В ходе работ для визуализации геометрии использовался конвертор AltNCG, модернизированный при поддержке гранта РФФИ № 08-07-00288-а.

Программа MCU-PD создается при поддержке концерна ОАО "ТВЭЛ". Представленные результаты получены в ходе выполнения работ по проекту АЭС-2006.

Авторы выражают искреннюю благодарность Е.А. Гомину, С.С. Городкову и С.В. Марину, которые прочитали рукопись статьи и сделали ценные замечания.

Список литературы

1. *Велихов Е.П.* Перспективы технологического перевооружения промышленности, науки и образования России на основе массовых суперкомпьютерных технологий // Вестник РАН, 2009, № 3, т. 79, с. 237–242.
2. *Алексеев Н.И., Гомин Е.А., Олейник Д.С. и др.* Разработка программы MCU-PD2006 для расчета нейтронно-физических характеристик активных зон реактора ВВЭР-1200 АЭС-2006, реализующей для решения уравнения переноса нейтронов метод Монте-Карло на основе информации, хранящейся в файлах оцененных ядерных данных. Отчет ИЯР РНЦ "Курчатовский институт", инв. № 36-03/18-08, 2008.
3. *Гомин Е.А., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А. и др.* Разработка модуля расчета изменения изотопного состава материалов реактора в процессе его эксплуатации, подключение модуля к программе MCU-PD2006. Отчет ИЯР РНЦ "Курчатовский институт", инв. № 36-03/19-08, 2008.
4. *Алексеев Н.И., Гомин Е.А., Гуревич М. И. и др.* Общее описание подмодулей ФОТОН, ГАММА И НЕГА, предназначенных для моделирования взаимодействия фотонов с веществом и рождения фотонов в нейтронных реакциях. Отчет ИЯР РНЦ "Курчатовский институт", инв. № 36-03/23-08, 2008.
5. *Алексеев Н.И., Андросенко П.А., Гомин Е.А. и др.* Общее описание. Подмодуль БЕТА – моделирование взаимодействий электронов и позитронов с веществом. Подмодуль БЕГ – моделирование электрон-позитрон-фотонных каскадов. Отчет ИЯР РНЦ "Курчатовский институт", инв. № 36-03/35-08, 2008.
6. *MPI: A Message-Passing Interface Standard, Version 2.1, June 23, 2008, <http://www.mpi-forum.org/docs/mpi21-report.pdf>* (дата обращения: 01.06.2009).
7. *Воеводиц В.В., Воеводиц Вл.В.* Параллельные вычисления. СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
8. *Bielajev A.F.* Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport. The University of Michigan, 2000.
9. *Алексеев Н.И., Гомин Е.А., Олейник Д.С. и др.* Разработка полномасштабной трехмерной компьютерной модели реактора ВВЭР-1000. Отчет ИЯР РНЦ "Курчатовский институт", инв. № 36-03/42-08, 2008.
10. *Аттестационный паспорт* программного средства БИПР-7А (версия 1.3). Регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 137 от 21.02.2002.

11. *Зацепин О.В., Кандиев Я.З., Кашаева Е.А. и др.* Адаптация программы ПРИЗМА к моделированию переноса нейтронов в активной зоне реактора ВВЭР. Доклад на 19-м семинаре НЕЙТРОНИКА "Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики", Обнинск, 28-31. 10.2008.
12. *Терешонок В.А. и др.* Результаты экспериментального определения НФХ активной зоны реактора блока № 1 Ростовской АЭС на этапе физического пуска. Отчет ИЯР РНЦ "Курчатовский институт", инв. № 32/1-43-401, 2001.
13. *Алексеев Н.И., Гомин Е.А., Олейник Д.С. и др.* Результаты расчетов полномасштабной трехмерной компьютерной модели реактора ВВЭР-1000. Отчет ИЯР РНЦ "Курчатовский институт", инв. № 36-03/44-08, 2008.
14. *Калугин М.А., Малышкин Г.Н., Олейник Д.С. и др.* Полномасштабная математическая модель переноса нейтронов в активной зоне ре-

актора ВВЭР-1000, основанная на методе Монте-Карло и реализованная на многопроцессорных ЭВМ. Материалы конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР", Подольск, 26-29 мая 2009.

Контактная информация об авторах статьи – Гуревич Михаил Исаевич, г.н.с., тел.: (499)196-94-89, e-mail: gurevich@adis.vver.kiae.ru; Олейник Дмитрий Сергеевич, с.н.с., тел.: (499)196-98-11, e-mail: oleynik@adis.vver.kiae.ru; Шкаровский Денис Александрович, нач. лаб., тел.: (499)196-94-89, e-mail: ds@adis.vver.kiae.ru

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 4,
с. 66–77.

УДК 621.039.514

Импульсный хаос и управление им в ядерных реакторах

Н.С. Постников,

НИИ механики Нижегородского госуниверситета, 603950, Н. Новгород, пр-т Гагарина, 23, к. 6
Поступила в редакцию 15.10.2008 г.

Исследуются новые свойства и механизмы импульсного хаоса в реакторах. Рассматриваются новые способы управления импульсными стохастическими режимами.

Ключевые слова: ядерный реактор, динамический хаос, механизм хаоса, управление хаосом.

Pulsed Chaos and Its Control in Nuclear Reactors. *N.S. Postnikov, Research Institute of Mechanics of Nizhny Novgorod State University, korp. 6, 23, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950.* New properties and mechanisms of the pulsed chaos are investigated. New ways of controlling pulsed stochastic modes are considered.

Key Words: Nuclear Reactor, Dynamic Chaos, Mechanism of Chaos, Chaos Control.

В работах [1...8] выявлены и исследованы новые автоколебательные режимы работы ядерных реакторов – импульсные стохастические режимы. Они реализуются за счет действия внутренних обратных связей и состоят в том, что в реакторе через случайные промежутки времени происходят нейтронные вспышки случайной интенсивности. Начата разработка теории импульсных стохастических режимов [1...4] и предложены некоторые способы управления этими режимами [7, 8].

В настоящей работе исследуются новые свойства, механизмы возникновения им-

пульсного хаоса и предлагаются новые способы управления им в реакторах.

Для описания динамики реактора воспользуемся точечными уравнениями кинетики с линейными обратными связями обшего вида

$$l \frac{dn}{dt} = (1+n)\delta k + \sum_{i=1}^k \lambda_i c_i - \beta n; \quad (1)$$

$$dc_i/dt = -\lambda_i c_i + \beta n, \quad i = 1 \dots k; \quad (2)$$

$$du/dt = \mathbf{P}u + \mathbf{d}n, \quad \delta k = \theta \mathbf{b}^T u + \delta k_r. \quad (3)$$

Здесь $n(t) = (N(t) - N_0)/N_0$ – относительное отклонение плотности нейтронов $N(t)$ от ее стационарного значения N_0 ; l – время

жизни мгновенных нейтронов; δk – реактивность; $c_i(t)/l$ – относительное отклонение от стационарного значения концентрации ядер-излучателей запаздывающих нейтронов i -й группы; k – число групп; λ_i – постоянные распада этих ядер; β_i – относительный выход запаздывающих нейтронов в результате акта деления; $\beta = \sum_{i=1}^k \beta_i$; t – время; $\mathbf{u}(t)$, \mathbf{d} , \mathbf{b} – векторы из R^m ; \mathbf{P} – постоянная гурвицева матрица размерности $[m \times m]$; $\theta > 0$ – коэффициент усиления обратной связи; δk_r – регулирующее воздействие.

В работе [3] показано, что импульсный хаос в системе (1)...(3) реализуется при увеличении коэффициента θ усиления обратной связи, если импульсная функция обратной связи $W(t) = \mathbf{b}^T \exp(\mathbf{P}t) \cdot \mathbf{d}$ является отрицательной и немонотонной.

В ядерных реакторах могут реализоваться два различных механизма импульсного хаоса. Особенность первого состоит в том, что после нейтронных импульсов реактор сначала становится глубоко подкритическим, а затем переменные, определяющие его состояние, приближаются к колебательно-неустойчивому равновесному состоянию реактора. Только после этого происходит очередной нейтронный импульс как результат нарастающих колебаний, происходящих вблизи неустойчивого стационарного состояния. В этом случае тепло выделяется как в моменты нейтронных вспышек, так и во время колебаний вблизи стационарного состояния.

Особенность второго механизма хаоса состоит в том, что между нейтронными импульсами плотность нейтронов колеблется на низком уровне, реактор не приближается к стационарному состоянию, а выделение тепла происходит лишь в моменты нейтронных вспышек.

Проиллюстрируем возможность реализации описанных механизмов на примере простейшей обратной связи, приводящей к хаосу,

$$\delta k = -by + \delta k_r; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dx/dt &= s_0(x - n); & dy/dt &= \alpha y - \omega z - \alpha x; \\ dz/dt &= \omega y + \alpha z - \omega x, \end{aligned} \quad (5)$$

где $(x, y, z) \in R^3$; $s_0 < 0$; $b > 0$; $\alpha < 0$; $\omega > 0$; $0 < -\alpha/\omega < 1$.

В системе (1), (2), (4), (5) зафиксируем параметры

$$\begin{aligned} \delta k_r &= 0; & b &= 0,195; & s_0 &= -0,25; & \alpha &= -1; & l &= \\ & & & & & & & & & 10^{-4} \text{ с}; & k &= 6; & \lambda_1 &= 0,012 \text{ с}^{-1}, & \lambda_2 &= 0,03 \text{ с}^{-1}, & \lambda_3 &= \\ & & & & & & & & & 0,111 \text{ с}^{-1}, & \lambda_4 &= 0,301 \text{ с}^{-1}, & \lambda_5 &= 1,14 \text{ с}^{-1}, & \lambda_6 &= \\ & & & & & & & & & 3,01 \text{ с}^{-1}; & \beta &= 0,0065; & \beta_1/\beta &= 0,033, & \beta_2/\beta &= \\ & & & & & & & & & 0,219, & \beta_3/\beta &= 0,196, & \beta_4/\beta &= 0,395, & \beta_5/\beta &= \\ & & & & & & & & & 0,115, & \beta_6/\beta &= 0,042 \end{aligned} \quad (6)$$

и исследуем ее динамику при изменении только одного параметра ω , характеризующего степень колебательности импульсной функции обратной связи.

На рис. 1 изображена бифуркационная диаграмма, полученная путем численного интегрирования уравнений (1), (2), (4)...(6) при фиксированных и последовательно увеличивающихся с шагом $\Delta\omega = 0,02$ значениях ω от 1 до 12. В каждом сечении $\omega = \text{const}$ по оси ординат нанесены все максимумы переменной x , которые достигнуты ею после нейтронных вспышек в процессе автоколебаний на достаточно большом промежутке времени $t \in [0, 5000 \text{ с}]$.

Нейтронные импульсы происходят в моменты времени, когда реактивность δk превышает значение β и реактор находится в состоянии надкритичности на мгновенных нейтронах. Чем сильнее импульс, тем больше максимум $x(t)$. Максимумы $x(t)$, реализующиеся при $\delta k < \beta$, не учитываются. Периодические колебания происходят при $\omega \in [10,8; 12]$ и в окнах периодичности, наблюдающихся на интервале $\omega \in [1; 3,5]$. При тех ω , при которых максимумы $x(t)$ плотно и нерегулярно заполняют отрезки прямых, реализуется импульсный хаос.

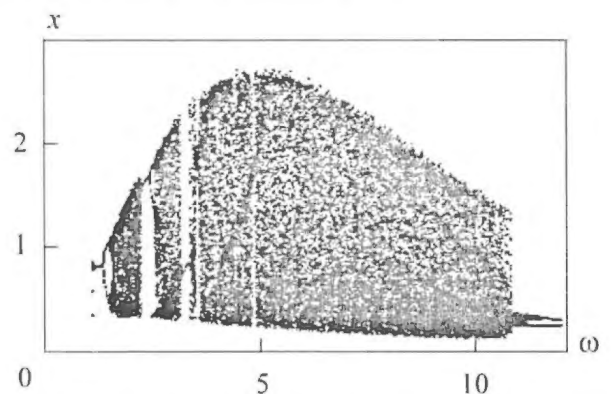


Рис. 1. Множество значений максимумов переменной $x(t)$, реализующихся в процессе автоколебаний в системе (1), (2), (4)...(6) при изменении параметра ω в пределах $1 < \omega < 12$

Максимум x^* , достигаемый переменной x после очередного нейтронного импульса, весьма точно определяется предыдущим максимумом x_0 , достигнутым после предыдущего импульса. Поэтому хаотические колебания в системе (1), (2), (4)...(6) определяются одномерными точечными отображениями $x^*(x_0)$. Они строятся путем нанесения на плоскость (x^*, x_0) последовательных пар максимумов функции $x(t)$. Эти отображения для значений $\omega = 2,1$, $\omega = 3$, $\omega = 3,9$, $\omega = 10$ показаны на рис. 2, а) – г). На рис. 3 показаны хаотические колебания плотности нейтронов (величины $\xi = \ln(1 + n)$) в случае $\omega = 2,1$ и $\omega = 10$.

Точечные отображения, показанные на рис. 2, – это типичные отображения, порождающие хаос в динамических системах. Они являются кусочно-непрерывными и растягивающими всюду за исключением небольших интервалов. Из рис. 2 видно, что отображения $x^*(x_0)$ имеют множество

точек разрыва. Это такие значения максимумов x_0 , после которых функция $\delta k(t)$ касается прямой $\delta k = \beta$. Различным интервалам непрерывности отвечает разное число максимумов реактивности и плотности нейтронов, реализующихся между нейтронными вспышками, и, следовательно, различное время между импульсами.

Из рис. 2 видно, что на интервалах непрерывности отображения $x^*(x_0)$ имеют по одной неустойчивой неподвижной точке. Им отвечают неустойчивые импульсные периодические режимы системы (1), (2), (4)...(6), отличающиеся друг от друга величинами нейтронных импульсов и временем между ними.

На рис. 2, а) – в) видны точки $x_0 = 1,12$, $x_0 = 1,82$, $x_0 = 2,27$, возле которых группируется множество точек разрыва и интервалов непрерывности. После соответствующих этим максимумам x_0 импульсов траектория $(n(t), c(t), x(t), y(t), z(t))$ системы (1),

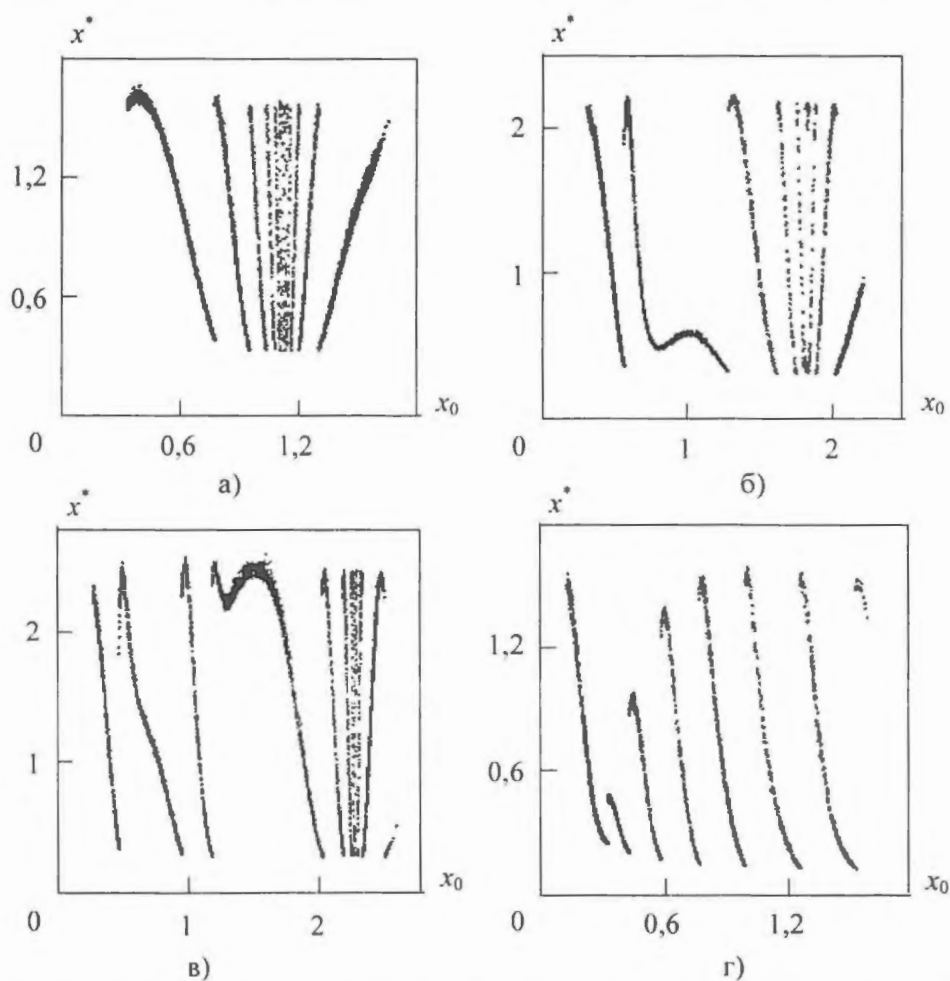


Рис. 2. Одномерные отображения, определяющие хаотические движения в системе (1), (2), (4)...(6): а) $\omega = 2,1$; б) $\omega = 3$; в) $\omega = 3,9$; г) $\omega = 10$

(2), (4)...(6) приближается к колебательно-неустойчивому стационарному состоянию $(0, 0, 0, 0, 0)$, т.е. в системе имеется гомоклиническая траектория – петля сепаратрисы седло-фокусного состояния равновесия $(0, 0, 0, 0, 0)$. Изменение $\xi(t)$, отвечающее этой траектории при $\omega = 2,1$, видно на рис. 3,а) (интервал $t \in [15...30 \text{ с}]$). При $\omega = 3$ и $\omega = 3,9$ зависимость $\xi(t)$ на гомоклинической кривой является немонотонной – до приближения к точке $\xi = 0$ функция $\xi(t)$ имеет в области $\xi < 0$ один максимум при $\omega = 3$ и два максимума при $\omega = 3,9$.

Известно [9], что наличие в динамической системе двоякоасимптотической к состоянию равновесия траектории типа петли сепаратрисы седло-фокуса порождает в этой системе динамический хаос, который называют хаосом Шильникова. При $\omega = 2,1$, $\omega = 3$, $\omega = 3,9$ и близких к ним значениях параметра ω этот хаос реализуется в рассматриваемой модели реактора (1), (2), (4)...(6). Наличие гомоклинической – двоякоасимптотической к точке $(0, 0, 0, 0, 0)$

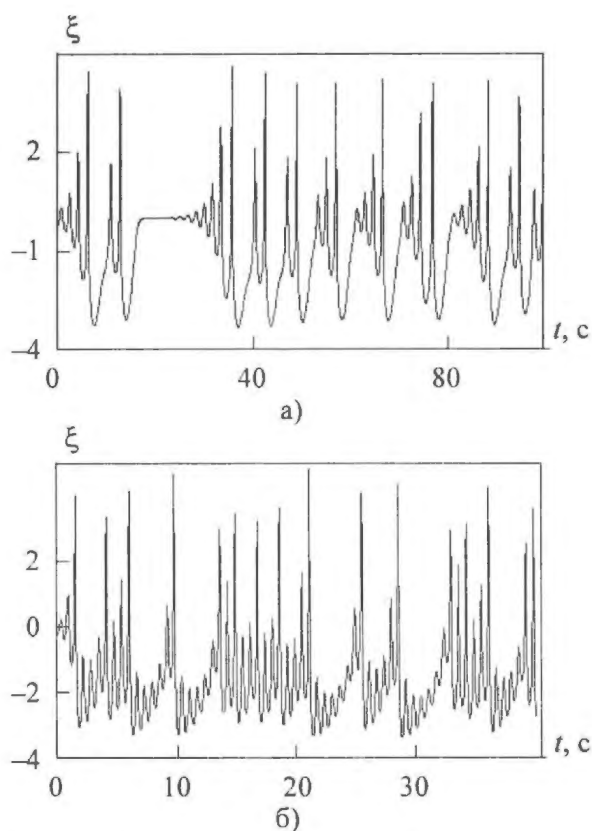


Рис. 3. Хаотические колебания величины $\xi = \ln(1+n)$ в системе (1), (2), (4)...(6): а) $\omega = 2,1$; б) $\omega = 10$

траектории обеспечивает реализацию первого механизма импульсного хаоса, когда после нейтронных вспышек определенной интенсивности очередной импульс происходит лишь после того, как переменные, определяющие состояние реактора, приблизятся к его колебательно-неустойчивому равновесному состоянию.

При $\omega > 5,5$ гомоклинических траекторий нет, и в системе (1), (2), (4)...(6) реализуется второй механизм хаоса, при котором в процессе хаотических колебаний переменные, определяющие состояние реактора, не приближаются к его равновесному состоянию. Характерный вид точечного отображения $x^*(x_0)$ и изменение плотности нейтронов в этом случае показаны на рис. 2,г) и 3,б), которые соответствуют значению $\omega = 10$. Именно этот механизм представляет наибольший интерес с практической точки зрения для его реализации в конкретных реакторах, так как в этом случае импульсный стохастический режим оказывается менее чувствительным к малым изменениям параметров и малым внешним возмущениям.

Отметим, что наряду с характерным для хаоса видом точечных отображений, а также плотным и нерегулярным заполнением последовательными парами максимумов переменной $x(t)$ кривых на плоскости (x^*, x_0) , стохастичность траекторий системы (1), (2), (4)...(6) подтвердил расчет их старших показателей Ляпунова λ_0 . Этот расчет проведен по алгоритму Бенеттина [10], описанному, например, в работе [11]. При $\omega = 2,1$, $\omega = 3$, $\omega = 3,9$, $\omega = 10$ получены положительные значения $\lambda_0 = 0,28$, $\lambda_0 = 0,34$, $\lambda_0 = 0,32$, $\lambda_0 = 0,68$, что является критерием хаоса.

Обычно при фиксированных параметрах в реакторе реализуется только один импульсный стохастический режим. Однако возможны случаи, когда при фиксированных параметрах в реакторе могут быть реализованы два или более импульсных режимов, отличающихся друг от друга величинами нейтронных вспышек и временем между ними. Каждый импульсный режим имеет свою область притяжения, и перевод реактора из одного режима в другой осуще-

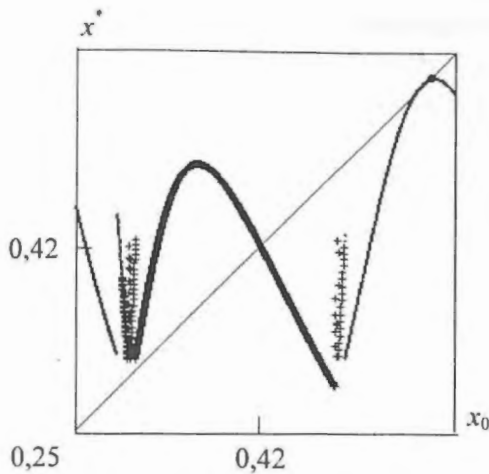


Рис. 4. Одномерное отображение, определяющее динамику системы (1), (2), (4)...(6) при $b = 0,11$ и $\omega = 5$

ствляется не изменением параметров реактора, а изменением его начального состояния с помощью внешних возмущений.

Например, на рис. 4 изображено точечное отображение, определяющее динамику системы (1), (2), (4)...(6) при $b = 0,11$ и $\omega = 5$. Видно, что отображение имеет два устойчивых притягивающих множества — хаотический аттрактор на интервале $x_0 \in [0,29; 0,5]$ и устойчивую неподвижную точку $x_0 = 0,58$. Они определяют импульсный стохастический режим и устойчивый импульсный периодический режим, существующие одновременно в системе (1), (2), (4)...(6) при $b = 0,11$ и $\omega = 5$.

Во всех примерах, рассмотренных ранее в работах [3...8], при расчетах импульсных стохастических режимов выбиралось значение времени жизни мгновенных нейтронов, характерное для реакторов на тепловых нейтронах ($l = 10^{-4}$ с). Однако импульсный хаос может возникать при сколь угодно малых значениях l , т.е. возможна его реализация и в реакторах на быстрых нейтронах. На рис. 5 показаны хаотические колебания плотности нейтронов в системе (1), (2), (4)...(6) при $l = 10^{-8}$ с, $b = 0,18$, $\omega = 5$. Старший показатель Ляпунова для соответствующей траектории равен $\lambda_0 = 0,43$.

Как правило, импульсный хаос возбуждается при неустойчивом стационарном состоянии реактора и является прямым следствием этой неустойчивости. Однако он может реализоваться и при устойчивом стац-

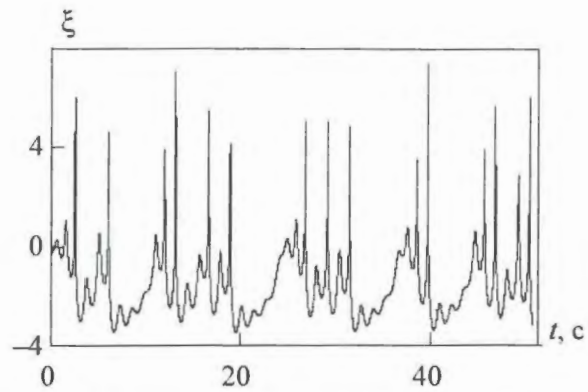


Рис. 5. Хаотические колебания величины $\xi = \ln(1+n)$ в системе (1), (2), (4)...(6) при $b = 0,18$, $l = 10^{-8}$ с, $\omega = 5$

онарном состоянии реактора — вне пределов его области притяжения. В этом случае возбуждение импульсного хаоса производится за счет достаточно сильного внешнего возмущения, переводящего переменные, определяющие состояние реактора, за пределы области притяжения стационарного режима. Такое возбуждение импульсного хаоса может производиться при относительно низких уровнях мощности реактора, характерных для устойчивых стационарных режимов.

Проиллюстрируем сказанное на примере простейшей модели реактора, учитывающей запаздывающие нейтроны, в которой возможен импульсный хаос. Это модель (1), (2), (5) с одной группой запаздывающих нейтронов ($k = 1$) при $\lambda_1 = -s_0$. Уравнение (1) в этом случае приводится к виду $l \frac{dn}{dt} = (1+n)(-ax + b_1y + b_2z) + \beta(x-n)$, (7) где для δk принято более общее, чем (4), выражение. В системе (5), (7) при

$$a = 0,0026; b_1 = -0,88175; b_2 = 0,80088; \\ l = 10^{-4} \text{ с}; \beta = 0,0065; s_0 = -0,25; \\ \alpha = -1; \omega = 2 \quad (8)$$

состояние равновесия $(n, x, y, z) = (0, 0, 0, 0)$ устойчиво, так как характеристическое уравнение, отвечающее точке $(0, 0, 0, 0)$, имеет все корни p_i с отрицательной действительной частью: $p_1 = -65$, $p_2 = -1,7$, $p_{3,4} = -0,2 \pm 10i$. При этом в системе (5), (7), (8) вне области притяжения нулевого состояния равновесия реализуется импульсный стохастический режим. Соответствующие ему хаотические колебания величины $\xi = \ln(1+n)$ показаны на рис. 6,а). На рис. 6,б)

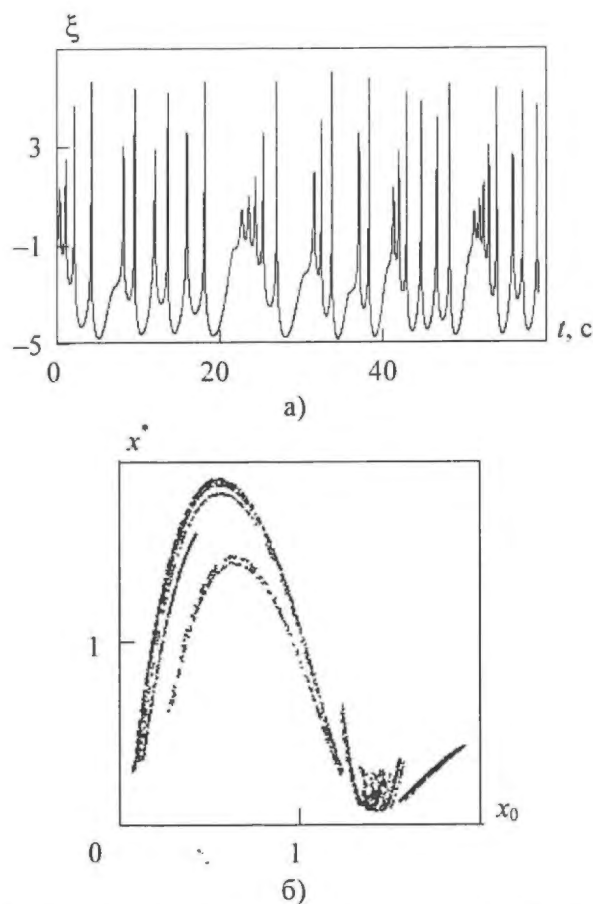


Рис. 6. Импульсный хаос в системе (5), (7), (8): а) – хаотические колебания величины $\xi = \ln(1+n)$; б) – кривые, заполняемые последовательными максимумами функции $x(t)$

изображены кривые, которые в процессе колебаний заполняют последовательные пары максимумов $x(t)$.

Импульсные стохастические режимы должны быть управляемыми, как и любые другие режимы работы ядерных реакторов. Важными задачами управления являются возбуждение импульсных стохастических режимов, целенаправленное изменение их характеристик, стабилизация неустойчивых импульсных периодических режимов с заданными величинами нейтронных импульсов и временем между ними, подавление хаотических режимов и преобразование их в регулярные режимы.

В работах [7, 8] разработаны некоторые способы управления импульсным хаосом, основанные на введении внешнего периодического изменения реактивности или внешних источников нейтронов постоянной или периодически меняющейся мощности, а также способы, при которых введе-

ние реактивности или внешних источников нейтронов производится во время нейтронных вспышек.

Далее рассматриваются два новых способа управления импульсным хаосом в реакторах. Один из них использует запаздывающую обратную связь (метод Пирагаса [12]). Другой способ состоит во введении управления по окончании нейтронных импульсов и служит вариантом метода Пуанкаре линеаризации отображения (метода Отта – Гребоджи – Йорка или метода OGY [13]). Оба метода широко применяются при управлении динамическим хаосом в нелинейных системах. Они позволяют стабилизировать любые неустойчивые периодические орбиты, входящие в состав хаотического аттрактора. Подробное изложение этих методов и областей их использования можно найти в работах [14, 15].

Применение этих методов к управлению импульсным хаосом в реакторах проиллюстрируем на примере системы (1), (2), (4)...(6) при $\omega = 10$. Ее хаотическая динамика определяется одномерным точечным отображением на рис. 2,г). Отображение имеет семь интервалов непрерывности $[0,13; 0,33]$, $[0,33; 0,43]$, $[0,43; 0,58]$, $[0,58; 0,77]$, $[0,77; 1,06]$, $[1,06; 1,25]$, $[1,25; 1,53]$. На каждом из них имеется по одной неустойчивой неподвижной точке отображения. Это точки $x_{01} = 0,29$, $x_{02} = 0,37$, $x_{03} = 0,515$, $x_{04} = 0,68$, $x_{05} = 0,86$, $x_{06} = 1,062$, $x_{07} = 1,31$. Этим семи точкам соответствуют семь неустойчивых импульсных периодических режимов, отличающихся друг от друга величиной импульсов и числом колебаний плотности нейтронов между импульсами. Каждый периодический режим можно стабилизировать с помощью рассматриваемых методов.

Рассмотрим алгоритм управления, при котором управляющее воздействие δk_r изменяется скачком после окончания каждого нейтронного импульса – в дискретные моменты времени t_j , в которые переменная $x(t)$ достигает максимальных значений $x^*(t_j)$, а в остальное время δk_r не меняется. В моменты времени $t = t_j$ устанавливается значение $\delta k_r = \delta k_j$, пропорциональное разности между достигнутым максимумом $x^*(t_j)$ и максимумом x_{0i} , соответствующим стабилизиру-

емой неустойчивой периодической последовательности импульсов:

$$\begin{aligned} \delta k_r(t) &= \delta k_r(t_{j-1}) \text{ при } t \in [t_{j-1}, t_j); \\ \delta k_r(t_j) &= \delta k_j; j = 1, 2, \dots, \infty; \\ t_j: x(t_j) &= x^*(t_j) = \max; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\delta k_j = \eta_i \beta [x^*(t_j) - x_{0i}]; i = 1, 2, \dots, 7. \quad (10)$$

При этом управление (9), (10) включается не сразу, а после того как хаотическая траектория приблизится к стабилизируемой неустойчивой периодической траектории, т.е. в некоторый момент времени будет выполнено условие $|x^*(t_j) - x_{0i}| < \varepsilon$. Здесь ε — достаточно малое число, по крайней мере такое, что $x^*(t_j)$ и x_{0i} оказываются на одном интервале непрерывности отображения $x^*(x_0)$. Отметим, что приближение хаотической траектории сколь угодно близко к любой точке хаотического аттрактора является его неотъемлемым свойством. Все неподвижные точки x_{0i} , $i = 1, 2, \dots, 7$ отображения $x^*(x_0)$ и соответствующие им неустойчивые импульсные периодические режимы стабилизируются под действием уп-

равления (9), (10) при $\varepsilon = 0,02$ и правильном выборе коэффициентов усиления η_i : $\eta_1 \in [2; 4,2]$, $\eta_2 \in [12; 18]$, $\eta_3 \in [11; 15]$, $\eta_4 \in [10; 12]$, $\eta_5 \in [9; 12]$, $\eta_6 \in [8,4; 11]$, $\eta_7 \in [7,2; 8]$.

Рис. 7,а) – г) иллюстрируют окончание процесса подавления импульсного хаоса, показанного на рис. 3,б), и стабилизации импульсных периодических режимов, в которых нейтронные импульсы повторяются без колебаний плотности нейтронов между импульсами, после двух, четырех и шести колебаний плотности нейтронов между импульсами. Стабилизированные периодические режимы отвечают точкам $x_{01} = 0,29$, $x_{03} = 0,515$, $x_{05} = 0,86$, $x_{07} = 1,31$. Значения η_i взяты равными $\eta_1 = 3$; $\eta_3 = 12$; $\eta_5 = 10$; $\eta_7 = 7,6$. Стабилизация периодических траекторий подтверждена расчетом их старших показателей Ляпунова λ_0 . Во всех случаях получено значение $\lambda_0 = 0$, отвечающее устойчивым периодическим траекториям.

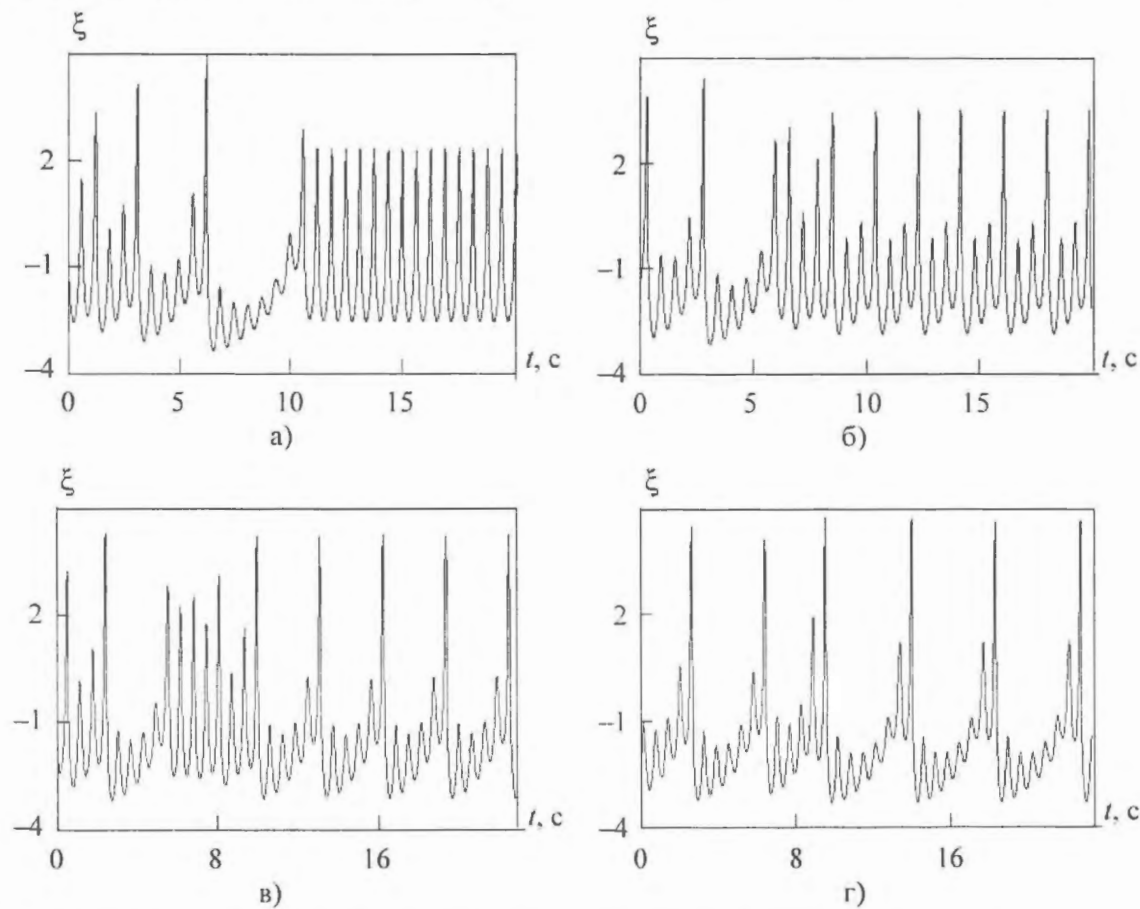


Рис. 7. Стабилизация неустойчивых импульсных периодических режимов системы (1), (2), (4)...(6) при $\omega = 10$ с помощью метода OGY: а) – периодический режим без максимумов функции $\xi(t)$ между импульсами; б) – то же, с двумя максимумами; в) – то же, с четырьмя максимумами; г) – то же, с шестью максимумами

Рассмотрим алгоритм управления с помощью запаздывающей обратной связи, при которой вводимая в каждый момент времени реактивность пропорциональна разности между значением переменной $x(t)$ в текущий момент времени и значением той же переменной некоторое время назад (время запаздывания τ):

$$\delta k_r(t) = -\gamma_i \beta [x(t) - x(t - \tau_i)]; i = 1, 2, \dots, 7. \quad (11)$$

Время запаздывания в соответствии с методом Пирагаса выбирается равным периоду стабилизируемого периодического режима ($\tau = \tau_i$), а управление (11), как и в методе OGY, включается только после того, как хаотическая траектория с течением времени попадет в достаточно малую окрестность стабилизируемой неустойчивой периодической траектории.

Пять неустойчивых импульсных периодических режимов системы (1), (2), (4)...(6) ($b = 0,195$), соответствующих неподвижным точкам x_{0i} , $i = 1, 2, \dots, 5$ отображения на рис. 2,г), стабилизируются под действием управления (11) при $\tau_1 = 0,63$ с, $\tau_2 = 1,27$ с, $\tau_3 = 1,89$ с, $\tau_4 = 2,51$ с, $\tau_5 = 3,13$ с и значениях коэффициентов усиления $\gamma_1 \in [6; 8]$, $\gamma_2 \in [3; 8]$, $\gamma_3 \in [2,5; 3,5]$, $\gamma_4 \in [1,8; 2,6]$, $\gamma_5 \in [1,3; 1,8]$.

Рис. 8,а) и б) иллюстрируют процесс стабилизации импульсных периодических режимов, в которых нейтронные импульсы повторяются после одного и трех колебаний плотности нейтронов между импульсами. Стабилизированные периодические режимы отвечают точкам $x_{02} = 0,37$, $x_{04} = 0,68$. Значения γ , взяты равными $\gamma_2 = 5$, $\gamma_4 = 2$.

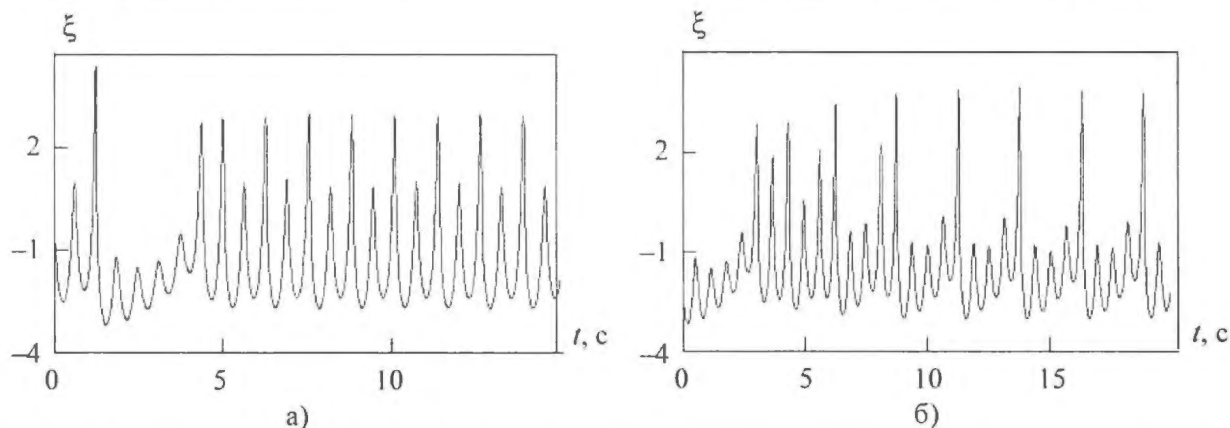


Рис. 8. Стабилизация неустойчивых импульсных периодических режимов системы (1), (2), (4)...(6) при $\omega = 10$ с помощью метода запаздывающей обратной связи: а) – периодический режим с одним максимумом функции $\xi(t)$ между импульсами; б) – то же, с тремя максимумами

Заключение

Выявленные в простейшей модели реактора свойства и механизмы возникновения импульсного хаоса могут реализоваться и в более сложных моделях, например, в использованных в работах [5, 6] для описания динамики кипящих реакторов и реакторов с газообразным топливом. Для управления импульсными стохастическими режимами в этих типах реакторов могут быть применены способы, рассмотренные в настоящей статье.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Нижегородской области (проект 08-08-97048-р_поволжье_а).

Список литературы

1. *Постников Н.С.* Стохастические автоколебания в реакторе с линейной обратной связью // Атомная энергия, 1992, т. 72, вып. 3, с. 232–237.
2. *Постников Н.С.* Простейшая модель реактора со стохастическим поведением // Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 1, с. 10–18.
3. *Постников Н.С.* Условия существования хаотических колебаний в ядерных реакторах // Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 6, с. 432–438.
4. *Постников Н.С.* Турбулентность нейтронного поля (пространственно-временной хаос) в ядерных реакторах // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2001, вып. 4, с. 10–17.
5. *Постников Н.С.* Возможность, допустимость и целесообразность реализации импульсных стохастических режимов в реакторах с газообразным ядерным топливом // Атомная энергия, 2003, т. 95, вып. 5, с. 330–338.

6. *Постников Н.С.* Импульсные стохастические режимы работы кипящих реакторов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2003, вып. 4, с. 3–10.
7. *Постников Н.С.* Управление импульсными стохастическими режимами в ядерных реакторах // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2004, вып. 3, с. 14–24.
8. *Постников Н.С.* Способы управления импульсными стохастическими режимами работы ядерных реакторов // Атомная энергия, 2006, т. 101, вып. 2, с. 103–112.
9. *Шильников Л.П.* К вопросу о структуре расширенной окрестности грубого состояния равновесия типа седло-фокус // Математический сборник, 1970, т. 81(123), № 1, с. 92–103.
10. *Benettin G., Galgani L., Steleyn J.M.* Kolmogorov entropy and numerical experiments // Phys. Rew. A, 1976, v. 14, № 6, pp. 2338–2345.
11. *Неймарк Ю.И., Ланда П.С.* Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987.
12. *Pyragas K.* Continuous control of chaos by self-controlling feedback // Phys. Lett. A., 1992, v. 170, pp. 421–428.
13. *Ott E., Grebogi C., Yorke J.* Controlling chaos // Phys. Rew. Lett., 1990, v. 64(11), pp. 1196–1199.
14. *Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.* Управление хаосом. Методы и приложения. Часть I. Методы // Автоматика и Телемеханика, 2003, № 5, с. 3–45.
15. *Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.* Управление хаосом. Методы и приложения. Часть II. Приложения // Автоматика и Телемеханика, 2004, № 4, с. 3–34.

Контактная информация об авторе статьи – Постников Николай Серафимович; с. н. с., тел.: (831)465-67-93(раб.), (831)436-46-72 (дом.), e-mail: postnikov@mech.uim.ru, дом. адрес: 603006, г. Нижний Новгород, ул. Ковалихинская, д. 28-а, кв. 9.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 4,
с. 77–85.

УДК 621.039.564

Физическое разнообразие при формировании сигналов аварийной защиты по нейтронно-физическим параметрам для АЭС с ВВЭР

В.Ф. Шикалов, А.В. Журбенко, А.С. Кузиль, Л.В. Козлова,
РНЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Курчатова, 1
Поступила в редакцию 22.05.2009 г.

Рассмотрены возможности и условия использования принципа физического разнообразия для сигналов по нейтронно-физическим параметрам применительно к АЭС с ВВЭР. Исследована возможность использования сигналов, формируемых от традиционных автоматизированных систем контроля нейтронного потока (АКНП), в сопоставлении с вновь разработанными средствами на базе сигналов системы внутриреакторного контроля (СВРК). На основе анализа эксплуатационных данных современных систем АКНП и СВРК реакторов типа ВВЭР показаны преимущества сигналов СВРК при работе на энергетических уровнях мощности. Определены концепции построения систем контроля нейтронно-физических параметров активных зон ВВЭР с применением принципа физического разнообразия.

Ключевые слова: контроль нейтронного потока внутриреакторный, контроль нейтронного потока вне реакторный, принцип физического разнообразия.

Physics Diversity at Neutron-Physics Parameters Alarm Signals Generating for VVER Plants.
V.F. Shikalov, A.V. Zhurbenko, A.S. Kuzhil', L.V. Kozlova, RRC "Kurchatov Institute", 1, Kurchatov Sq., Moscow, 123182. The availability and conditions of applying the principle of physics diversity of neutron-physics parameter signals in relation to VVER plants are discussed. The possibility of using the signals from regular neutron flux monitoring systems (out of core), and the signals from new in-core instrumentation system has been investigated. The advantages of in-core signals of at power operation have been proven using the analysis of operation data from modern VVER out of core and in-core systems. The design concepts of neutron-physics parameter monitoring systems have been defined for VVER cores using the principle of physics diversity.

Key Words: In-Core Neutron Flux Monitoring, Out of Core Neutron Flux Monitoring, Principle of Physics Diversity.

Введение

Российский термин – физическое разнообразие (диверситет) соответствует английскому термину *diversity* (разнородность, разнообразие), применяемому в иностранных проектах.

Согласно П.4.11 рекомендаций МАГАТЭ [1]: “Более высокая безотказность достигается при помощи избыточности или разнообразия. Например, возможно контролировать мощность реактора многократными каналами или разнообразными средствами, такими как измерения нейтронного потока или температуры теплоносителя или давления. Использование разнообразности предусматривает защиту против некоторых отказов по общей причине”. Эффективность применения такого принципа очевидна и тем выше, чем больше разделены между собой способы получения информации.

В РНЦ “Курчатовский институт” проводятся исследования принципов физического разнообразия применительно к задаче контроля ядерной безопасности и построения систем защиты по нейтронно-физическим параметрам.

Основное состояние активной зоны – это работа на энергетическом уровне мощности. Средняя плановая продолжительность такого состояния составляет более 90 % времени. Исходя из экономических соображений, именно на этот режим прежде всего следует распространять принципы избыточного контроля с применением физического разнообразия.

Отдельного рассмотрения и обоснования заслуживает вопрос вероятности ложного срабатывания. При использовании физически независимых комплектов формирования сигналов аварийной защиты вероятность ложного срабатывания увеличивается, что в свою очередь требует наличия внутри каждого комплекта отказоустойчивых, высоконадежных подсистем.

1. Предмет контроля

Физическое явление, которое должно контролироваться при работе ядерного реактора, – это интенсивность процесса деления как функции времени. Процесс деления

сопровождается выделением энергии в виде осколков деления и различных видов излучений, в том числе нейтронного. При этом именно полное число нейтронов в активной зоне реактора характеризует интенсивность процесса деления и используется в теоретических основах при построении систем контроля и защиты.

Основными контролируруемыми нейтронно-физическими параметрами, на которые устанавливаются нормы и ограничения, служат плотность нейтронного потока, скорость ее нарастания и реактивность. При этом речь идет о параметрах, характеризующих активную зону в целом, а любые средства измерения (детектирования) имеют локальный характер.

Если показать, что относительное изменение локального значения параметра или совокупности локальных значений соответствует средним по активной зоне, то задача применения принципа физического разнообразия сводится к поиску детекторов, отличающихся между собой по физической природе получения информации о полном числе нейтронов в активной зоне или средней плотности потока нейтронов (ППН). При наличии такой возможности эффект физического разнообразия может быть усилен за счет применения разнородных аппаратурных, программных и конструкторских решений.

2. Основные принципы и особенности физически разнообразного контроля нейтронно-физических параметров

Исходя из постановки задачи, она легко решается использованием детекторов нейтронов с различными физическими принципами получения сигнала, например, нейтронных счетчиков на основе B^{10} и He^3 или ионизационных камер (ИК) на основе B^{10} или U^{235} . В этом случае в качестве постулируемого исходного события отказа по общей причине будет, в частности, случайное заполнение свободного пространства между активной зоной и детекторами борной кислотой. Такой пример имеется в практике. Более высокий уровень устойчивости к отказу по общей причине достигается при использовании сигналов детекторов прин-

ципиально различного размещения, например, внутрореакторных (СВРК) и вне реакторных (АКНП) детекторов.

На практике задача осложняется очень широким динамическим диапазоном изменения ППН. Для реакторов типа ВВЭР этот диапазон составляет более 10-ти порядков. Необходимо отметить, что в пределах этого диапазона можно выделить зоны контроля, сильно отличающиеся по признакам, важным для безопасного проведения работ. Физическая суть отличия может быть условно определена как “холодное” и “горячее” состояния.

С точки зрения контроля нейтронно-физических характеристик, их принято называть пусковым и рабочим диапазонами. Определим, что же с точки зрения ядерной безопасности важно контролировать в каждом из этих диапазонов. По правилам НП 082-07 отличий в требованиях практически нет, а по физической сути отличия принципиальные.

В первом случае основные работы проходят в подкритическом состоянии активной зоны при интенсивных действиях персонала по вмешательству в процесс. В другом случае работает преимущественно автоматика. В первом случае физические процессы описываются уравнениями кинетики, во втором – динамики с учетом влияния многочисленных обратных связей и реакций среды на вносимые возмущения. Имеются сильные отличия по продолжительности пускового состояния и работы на мощности.

3. Сопоставление показаний АКНП и СВРК

Традиционно для всех проектов АЭС с реакторами типа ВВЭР для всех состояний и режимов контроль ППН осуществляется высоконадежной системой АКНП (разработчик и производитель ЗАО “СНИИП-СИСТЕМАТОМ” [2], ЗАО “Северодонецкое НПО “ИМПУЛЬС” [3]), построенной с использованием принципов отказоустойчивости. Детекторы нейтронного потока этой системы располагаются в специальных каналах, находящихся за корпусом реактора. При работе на энергетических уровнях

мощности контроль величин и распределений ППН и энерговыделения ВВЭР осуществляется СВРК.

Современные перспективные разработки таких систем позволяют получать все виды сигналов, аналогичных по физическому смыслу и техническим характеристикам сигналам АКНП. Подробное описание алгоритмов и результаты их экспериментальной проверки на действующей АЭС с ВВЭР приведены в работе [4]. Однако, попытки привести измеряемые сигналы к единому для обеих систем нейтронно-физическому параметру, например, реактивности или средней ППН, дают наблюдаемые расхождения. Исследование одних и тех же переходных процессов по сигналам СВРК и АКНП показало их взаимное соответствие и выявило ряд особенностей.

При проведении сопоставлений использованы следующие сигналы:

- АКНП: $I_{ик}(t) = \sum_{i=1}^6 I_{ик_i}(t)$ – средний сигнал 6-ти ИК рабочего диапазона;

- СУЗ: положение органов регулирования;

- СВРК: $I_{дпз}(t) = \sum_{i=1}^N I_i(t) / N$ – средний ток по всем ДПЗ, где N – общее число ДПЗ;

$I_j(t) = \sum_{i=1}^{p_j} I_i(t) / p_j$ – средний ток ДПЗ по слоям, где j – номер слоя ($j = 1 \dots 7$ по числу ДПЗ в сборке); p_j – число ДПЗ в слое j ;

$I_k(t) = \sum_{i=1}^{m_k} I_i(t) / m_k$ – средний ток ДПЗ по орбитам, где k – номер орбиты ($k = 1 \dots 7$); m_k – число ДПЗ в орбите k .

Исходные данные получены из файлов архивных записей случайных и типовых переходных процессов на АЭС с ВВЭР-1000. Из простого сопоставления усредненных показаний выявляется наличие систематических расхождений более 20 %.

Возникает естественный вопрос, какой сигнал наиболее достоверно отображает основную контролируемый параметр – полное число нейтронов в реакторах. Измерение эффективности аварийной защиты в ВВЭР-1000 осуществляется с помощью боковых ИК, расположенных в бетонной защите.

Расчетные оценки ППН на радиусе размещения ИК показывают, что он формируется не более чем двумя рядами внешних кассет [5]. Дальнейшим анализом проверено логичное предположение, что совокупность внутрореакторных детекторов ППН дает более достоверное отображение по отношению к полному числу нейтронов в активной зоне.

Сигналы внутрореакторных детекторов систематизированы и объединены по двум геометрическим признакам:

- высотному расположению (по слоям);
- радиальному расположению (по орбитам).

Принцип распределения сборок по орбитам поясняется рис. 1 (3-я стр. цветной вкладки). Для удобства дальнейшего представления анализируемых данных орбиты выделены различными цветами.

Сигналы внутрореакторных детекторов скорректированы согласно алгоритмам коррекции инерционности [4]. Именно эти алгоритмы применяются в современных СВРК и обеспечивают необходимое быстрое действие. Доказательство аддитивности преобразований сигналов одиночных детекторов и их совокупностей, связанных с коррекцией инерционности, непосредственно вытекает из методики коррекции и приведено в литературе [4].

Результаты обработки конкретных массивов информации, представленные на рис. 2 (3-я стр. цветной вкладки) и 3, показывают наличие увеличивающегося расхожде-

ния средних по орбитам показаний по мере удаления орбит от края зоны. Наиболее существенные численные значения расхождений по контролируемому параметру – относительному изменению ППН приведены в таблице. Группа детекторов, расположенная на внешней орбите, имеет минимальное отличие по средним показаниям от внутрореакторных ИК.

Еще сильнее эти различия проявляются при использовании показаний отдельных групп детекторов для оценки параметра реактивности. Для этих оценок на том же переходном процессе выделены интервалы времени, показанные на рис. 4 (4-я стр. цветной вкладки) и 5. Результаты оценки реактивности приведены на рис. 6 (4-я стр. цветной вкладки), а численные значения для выбранных участков – в таблице.

Из полученных результатов следует, что усредненные данные по ИК штатной системы АКНП хорошо согласуются с аналогичными данными для ДПЗ внешних орбит активной зоны и существенно, более чем на 20 %, отличаются от данных по ДПЗ, усредненных по всей активной зоне. Аналогичные данные получены для как ВВЭР-1000, так и ВВЭР-440.

Заключение

В результате проведенных исследований с учетом требований физического разнообразия показаны возможности форми-

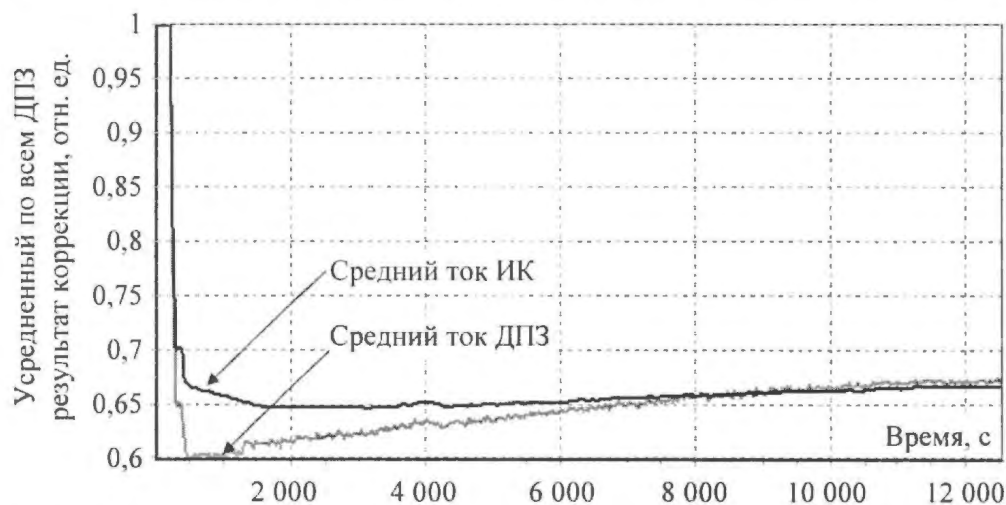


Рис. 3. Усредненные сигналы всех ДПЗ и всех ИК рабочего диапазона. Расхождение нормированных значений достигает $\approx 14\%$



Рис. 5. Перемещение органов регулирования, 10-я группа (типовой график для ВВЭР-1000)

рования сигналов по нейтронно-физическим параметрам ВВЭР при работе на энергетическом уровне мощности.

Выявлены общие для АЭС с ВВЭР особенности отображения важных для безопасности нейтронно-физических параметров активных зон средствами внутри- и вне-реакторного контроля.

Для АЭС, применяющих современные СВРК с повышенным быстродействием, установлено, что несоответствие между данными, которые получены в СВРК и АКНП, может составлять более 10 % по параметру изменения средней ППН. Еще сильнее это различие проявляется при определении реактивности. Показано, что данные СВРК имеют более высокий уровень достоверности.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для использования при построении систем контроля нейтронно-физи-

ческих параметров активных зон АЭС с ВВЭР. Особую важность эти результаты имеют при построении систем с учетом принципов физического разнообразия.

Список литературы

1. *Средства* и управляющие системы, важные для безопасности атомных энергетических станций. Руководство по безопасности № NS-G-1.3, МАГАТЭ, Вена, 2000.
2. *Гусаров А.М.* Современное построение аппаратуры контроля нейтронного потока ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ», 18.05.2007, Системы ядерной и радиационной безопасности, презентационный диск ЗАО «СНИИП-СИСТЕМАТОМ».
3. *Елисеев В.В., Ларгин В.А., Пивоваров Г.Ю., Яценко В.И.* Работы Северодонецкого НПО «Импульс» по автоматизации АЭС с ВВЭР, г. Северодонецк (Украина). Презентационный проспект НПО «Импульс», 2005.

Таблица сопоставления показаний АКНП и СВРК

№ орбиты	Отличие среднего по орбите скорректированного тока ДПЗ от среднего тока ИК, %	Отличие среднего по орбите скорректированного тока ДПЗ от среднего скорректированного тока ДПЗ, %	Отличие реактивности по среднему по орбите скорректированному току ДПЗ от реактивности по среднему току ИК, $\beta_{эф}$	Отличие реактивности по среднему по орбите скорректированному току ДПЗ от реактивности по среднему скорректированному току ДПЗ, $\beta_{эф}$
1	-20,9	-0,0	-0,023	-0,012
2	-23,5	-13,0	-0,025	-0,013
3	-22	-11,2	-0,025	-0,013
4	-14,5	-2,7	-0,015	-0,003
5	-2,7	10,7	0	0,011
6	1,2	15,1	0,003	0,015
7	2,4	16,6	0,004	0,015

4. Бурьян В.И., Козлова Л.В., Кужиль А.С., Шикалов В.Ф. Математическая модель родиевых ДПЗ и алгоритмы коррекции их инерционности // Ядерные измерительно-информационные технологии, 2005, № 1(13), с. 3–9.

5. Алексеев П.Н., Зарицкий С.М., Егоров А.Л. Оценка вкладов периферийных кассет активной зоны реактора ВВЭР-1000/320 энергоблока 3 Калининской АЭС в плотность потока тепловых нейтронов в каналах ионизационных камер. Отчет ИЯР РНЦ “Курчатовский институт”, инв. № 36-03/24-08, 2008.

Контактная информация об авторах статьи – Шикалов Владимир Федорович, нач. лаб., тел.: (499)196-72-54, e-mail: shika@atomar.net.ru; Журбенко Александр Вячеславович, зам. директора, тел.: (499)196-71-80, e-mail: jur@vver.kiae.ru;

Кужиль Александр Семенович, нач. отдела, тел.: (499)196-91-87, e-mail: kuzil@atomar.net.ru;

Козлова Людмила Валентиновна, вед. инж., тел.: (499)196-72-54.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 4,
с. 85–90.

УДК 621.039.5

Радиационная безопасность космической ядерной энергодвигательной установки увеличенного ресурса и возможности модернизации реактора ИРГИТ

*В.А. Павшук, А.С. Каминский, В.С. Кузнецов, Э.Г. Гордеев,
В.Ч. Пальванов, Т.А. Турбина, А.Н. Хмылев,*
РНЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Курчатова, 1,
Г.В. Колюхов,
ФГУП “Центр Келдыша”, 125438, Москва, ул. Онежская, 8
Поступила в редакцию 22.07.2009 г.

Рассмотрены возможности увеличения до ~ 10 лет ресурса космической ядерной энергодвигательной установки (КЯЭДУ) на основе модернизированного реактора ИРГИТ тепловой мощностью 300 кВт, для которого проведены расчеты выгорания, длительности кампании и статических эффектов реактивности при штатной эксплуатации и аварийных ситуациях. Оценено влияние технологических отклонений параметров тепловыделяющей сборки (ТВС) и замедлителя на нейтронно-физические характеристики реактора. Приведены основные принципы построения радиационной защиты и критерии ее оптимизации.

Ключевые слова: КЯЭДУ, ЯРД, ИРГИТ, выгорание, длительность кампании, радиационная безопасность, эффекты реактивности, технологические отклонения.

Radiation Safety of Space Nuclear Thermal Propulsion and Power Increased Lifetime Installation and Possibility of Reactor IRGIT Modernization. *V.A. Pavshook, A.S. Kaminsky, V.S. Kuznetsov, E.G. Gordeev, V.Ch. Pal'vanov, T.A. Turbina, A.N. Khmylev, RRC “Kurchatov Institute”, 1, Kurchatov Sq., Moscow, 123182, G.V. Konyukhov, FSUE “Keldysh Centre”, 8, Onezhskaya St., Moscow, 125438.* Possibilities of increasing the lifetime of the space nuclear thermal propulsion and power installation based on the modernized reactor IRGIT (thermal power 300 kW) up to ~10 years are considered; calculations of burnup, its lifetime and static effects of reactivity at normal operation and emergency situations are carried out. Influence of technological deviations of parameters of the fuel assembly and the moderator on neutron-physical characteristics of the reactor is estimated. The main principles of radiation shield and its optimization criteria are given.

Key Words: SNTPP, NTP, IRGIT, Burnup, Lifetime, Radiation Safety, Reactivity Effects, Technological Deviations.

Несмотря на значительный перерыв в активном развитии космической ядерной энергетики и несбывшиеся до сей поры

ожидания участников этих работ в их возрождении, существуют причины для того, чтобы обратить внимание на некоторые ас-

пекты столь многогранной когда-то деятельности.

Это связано с пересмотром ряда технических требований к основным характеристикам и параметрам космических реакторных установок, произошедшим за последние годы. Применительно к схемным решениям построения КЯЭДУ на основе технологии ядерного ракетного двигателя (ЯРД) одним из таких требований является увеличение ресурса работы реактора на энергетическом режиме до 10...15 лет.

Другим обстоятельством служит последовательное общее ужесточение требований к радиационной безопасности реакторных систем, в том числе космических, связанное с рядом инцидентов (авария на АЭС "Три-Майл Айленд", авария со спутником "Космос-954", Чернобыльская катастрофа) и нашедшее отражение в многочисленных документах международных организаций, например в [1].

Очевидно, что предпосылкой радиационной безопасности является обеспечение ядерной безопасности и допустимого уровня излучения на всех этапах жизненного цикла установки. Общие принципы обеспечения ядерной и радиационной безопасности КЯЭДУ с машинным преобразованием энергии при штатной эксплуатации и в аварийных ситуациях и подходы к их реализации на современном этапе обсуждались нами в [2]. Для такого типа реакторов большие положительные эффекты реактивности могут возникать в аварийных ситуациях, связанных с нештатным заполнением активной зоны водородосодержащим веществом.

Ниже делается попытка рассмотреть некоторые возможности обеспечения радиационной безопасности конкретного типа реактора КЯЭДУ (с учетом продления его кампании до 10 лет при тепловой мощности 300 кВт) и оценить границы изменения основных физических параметров системы, важных для безопасности.

В качестве базового схемного решения рассматривается КЯЭДУ на основе реактора ИРГИТ – стендового прототипа реактора ЯРД [3, 4], который прошел этап наземных натурных испытаний. Определяющие прин-

ципы, заложенные в конструкцию этого реактора и подтвердившие свою моральную долговечность, заключаются в следующем:

- гетерогенность и модульность конструкции активной зоны,
- использование керамического высокотемпературного топлива.

Экспериментальная отработка реактора может проводиться поэлементно, в том числе до требуемого уровня надежности, и реактор в сборе подвергается лишь контрольным испытаниям или испытаниям по укороченной программе с целью определения взаимного влияния отдельных узлов реактора друг на друга. Кроме того, удастся разделить активную зону реактора на систему параллельных каналов, в которых течение рабочего тела локализовано в пределах каждого канала и практически не влияет на течение рабочего тела в сопредельных каналах. Это открывает дополнительные возможности для компенсации неравномерностей полей энерговыделения реактора с помощью индивидуально гидравлического профилирования отдельных каналов.

Карбидные композиции урана и тугоплавких металлов обеспечивают высокую объемную плотность делящегося вещества и высокую температуру нагрева рабочего тела.

Конструктивно активная зона реактора ИРГИТ состоит из 37-ми ТВС и замедлителя. Корпус ТВС выполнен из сплава АМг-6. Основу ТВС реактора ИРГИТ составляют нагревные секции (НС) из стержневых спиральновитых пластинчатых твэлов. Такой профиль с размером поперечного сечения по окружности ~ 2 мм по результатам многопараметрического анализа оказался оптимальным для реактора ИРГИТ. Конструкция активного блока из стержневых твэлов малого размера позволяет осуществить требуемое распределение урана по объему активной зоны. Одна ТВС содержит 6 НС, каждая высотой 10 см, причем НС может содержать различное количество U-235, чтобы профилировать энерговыделение в ТВС по высоте.

Керамические материалы (карбидные и карбонитридные композиции) стали глав-

ными материалами всех узлов ТВС – твэлов, теплоизоляции, силовых и сопловых элементов конструкции. Варьирование состава, структуры и физического состояния выбранной керамики дало широкий спектр свойств, обеспечивающий потребности практически всех высокотемпературных элементов ЯРД. В качестве замедлителя выбран гидрид циркония, боковой и нижний торцевой отражатели выполнены из бериллия.

Органы СУЗ реактора ИРГИТ представляют собой 12 поворотных регулирующих барабанов (РБ) в боковом отражателе, общей эффективности которых достаточно для управления мощностью и обеспечения ядерной безопасности реактора в штатном режиме.

На рис. 1 приведено поперечное сечение расчетной схемы реактора. По расчетным оценкам длительность кампании реактора ИРГИТ в энергетическом режиме на уровне мощности ~ 300 кВт составляет 1,5...2 года.

При проектировании и отработке реактора ИРГИТ вопросам безопасности уделялось большое внимание, однако некоторые сценарии аварийных ситуаций, которые впоследствии приобрели существенное для безопасности значение, не рассматривались. Это касается, в частности, аварийных ситуаций, связанных с попаданием реактора в водородосодержащие и рассеивающие среды (вода, мокрый песок и т.п.). Расчетные оценки, выполненные в дальнейшем, показали, что штатная СУЗ не обеспечивает компенсацию значительных положитель-

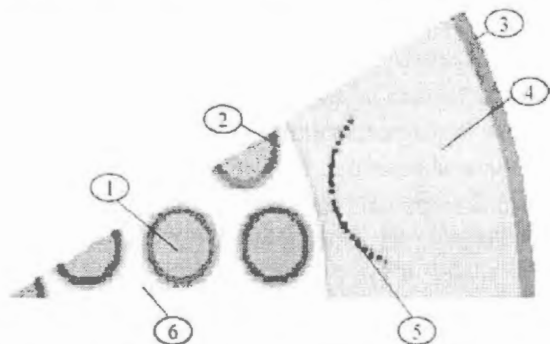


Рис. 1. Схема поперечного сечения реактора ИРГИТ: 1 – топливо (UC, ZrC, NbC), 2 – корпус ТВС (АМг-6), 3 – корпус (сталь), 4 – боковой отражатель (бериллий), 5 – ПЭЛ РБ (карбид бора), 6 – замедлитель (гидрид циркония)

ных эффектов реактивности (~ 11 % $\Delta K/K$), возникающих в подобных случаях [5].

Существует принципиальная возможность провести модернизацию активной зоны реактора ИРГИТ, чтобы обеспечить новые требования (реактор ИРГИТ-М). Технические решения в этом случае определяются необходимостью увеличения длительности кампании до 10 лет при тепловой мощности 300 кВт и обеспечения ядерной безопасности в упомянутых выше аварийных ситуациях и сводятся к повышению плотности урана в твэле в ~ 1,5 раза и постановке дополнительных поглотителей в активную зону. На рис. 2 приведено поперечное сечение расчетной схемы модернизированного реактора.

Для реактора с таким топливом проведены расчеты выгорания и длительности кампании, получены оценки статических эффектов реактивности при попадании реактора в воду и заполнении его водой, оценены возможности компенсации этих эффектов. Исследовано влияние технологических отклонений материалов активной зоны на нейтронно-физические характеристики реактора. Перечислены основные принципы построения радиационной защиты КЯЭДУ.

Расчетные исследования выполнялись с помощью программы MCU-RFFI [6], адекватно описывающей сложную структуру реактора. Для расчета выгорания использовалась программа WIMSD-5B [7] с 172-групповой библиотекой констант. Прог-

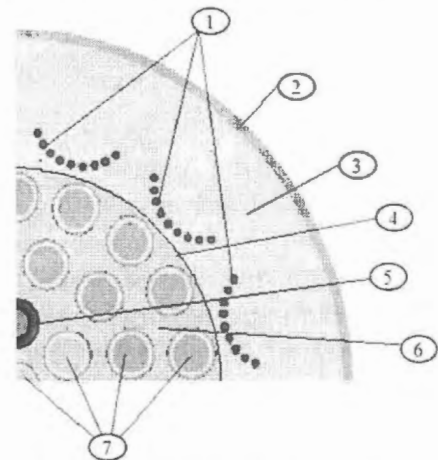


Рис. 2. Схема поперечного сечения реактора ИРГИТ-М: 1 – ПЭЛ РБ, 2 – корпус, 3 – отражатель, 4 – обечайка, 5 – СЯБ, 6 – замедлитель, 7 – ТВС 1...4-го рядов

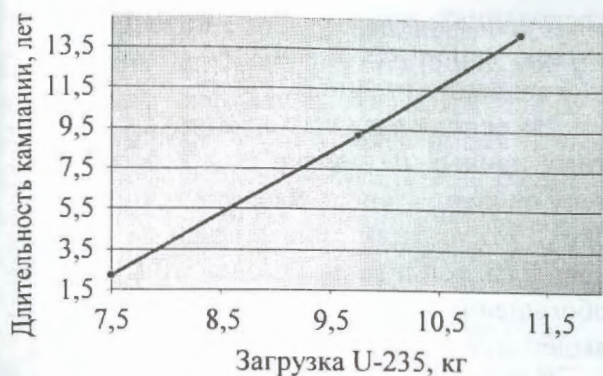


Рис. 3. Зависимость длительности кампании от величины загрузки урана-235

раммы апробированы на тестовых и benchmark задачах. Рис. 3 иллюстрирует зависимость длительности кампании от величины загрузки урана-235.

Расчетные оценки основных статических реактивных эффектов по программе MCU-RFFI удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами, полученными при испытаниях реактора ИРГИТ, что иллюстрируется нижеприведенной таблицей, где сведены основные экспериментальные и расчетные параметры.

Полученная величина эффекта реактивности реактора ИРГИТ при его попадании в воду (11,4 % $\Delta K/K$) близка к значению (~ 11 % $\Delta K/K$) в работе [5].

Для обеспечения ядерной безопасности реактора ИРГИТ-М при аварийных ситуациях, связанных с попаданием реактора в замедляющую (водородосодержащую) и рассеивающую (песок) среду, штатной СУЗ реактора ИРГИТ недостаточно. Эффективность 12-ти РБ в штатном режиме реактора ИРГИТ-М составляет 11,2 % $\Delta K/K$, а при попадании реактора в рассмотренные выше аварийные ситуации уменьшается до 6,2 % $\Delta K/K$.

Поэтому в составе реактора ИРГИТ-М необходимо предусмотреть дополнительную систему ядерной безопасности (СЯБ). Модель СЯБ, принятая в расчетах, пред-

ставляет собой два кольцевых стержня из карбида бора, размещаемых на месте двух оппозитных ТВС во втором ряду. Предполагается, что после вывода на орбиту стержни СЯБ удаляются из реактора.

Совместная эффективность РБ и СЯБ при попадании реактора в водородосодержащую среду равна 17,3 % $\Delta K/K$ и достаточна для компенсации возникающего положительного эффекта реактивности в аварийных ситуациях (без залива, соответственно, 28,8 % $\Delta K/K$).

Существуют дополнительные возможности повышения ядерной безопасности реактора за счет размещения в активной зоне различного рода поглотителей (в том числе резонансных).

Так, например, ранее рассматривалась возможность применения газообразного поглотителя для управления мощностью реактора [8]. Выбор поглотителя для газовой системы (ГС) определяется в первую очередь сечением поглощения тепловых нейтронов, а также хорошими эксплуатационными свойствами. Этим критериям в наибольшей степени удовлетворяет He-3.

Для рассматриваемого реактора принципиально возможно использовать ГС в качестве:

- дополнительной аварийной защиты,
- дополнительной системы регулирования (ГСР) на двигательном режиме,
- элемента активной или полуактивной диагностической системы (ГСД).

Предварительные расчетные оценки для ансамбля из 36 тонких стальных трубок при заполнении их He-3 под давлением 100 атм дают значения эффективности около 4,5 % $\Delta K/K$, что обеспечивает возможность парирования значительных воздействий на реактивность реактора в аварийных ситуациях. Для реактора на режиме ЯРД, в котором реализуется высокая энергонапряженность активной зоны, исключительно важное значение приобретает организация при-

Т а б л и ц а сравнения экспериментальных и расчетных параметров реактора ИРГИТ

Параметр	Эксперимент	Расчет
Запас реактивности, % $\Delta K/K$	3,5	3,6
Эффективность органов регулирования, % $\Delta K/K$	12	12,3
Положение органов регулирования в критическом состоянии, °C	100	100

мерно одинаковых тепловых нагрузок на все ТВС. При этом, во-первых, упрощается регулировка по расходам через ТВС и уменьшается вероятность разрушения твэлов, работающих в наиболее напряженных условиях, а, во-вторых, выравнивание тепловыделения снимает большую мощность при одном и том же объеме активной зоны.

Поле энерговыделения в активной зоне при отвернутых и привернутых РБ заметно (до 20 %) отличается. В критическом состоянии реактора (с 3-мя отвернутыми барабанами аварийной защиты и остальными привернутыми в промежуточное состояние) энерговыделение в ТВС последнего ряда может отличаться до 10 % за счет различного положения РБ.

Применение ГСР может способствовать уменьшению неравномерности поля энерговыделения. Согласно экспериментальным данным [8] компенсация запаса реактивности с помощью трубок с Cd (имитация ГСР) по сравнению с поворотом РБ уменьшает радиальный коэффициент неравномерности K_r с 1,070 до 1,025. Расчетные оценки также подтверждают такую тенденцию.

Периодическое зондирование активной зоны малыми эталонными возмущениями реактивности по ступенчатому, псевдослучайному или иному закону (путем подачи небольшого давления в трубки ГСД) может обеспечивать, наряду с другими методами, контроль за состоянием активной зоны на энергетическом режиме в течение всей кампании.

На ранних этапах проектирования ЯРД с твердофазной активной зоной (схема "А") ГСР рассматривалась в качестве основной, однако затем приняты во внимание опасения, связанные с возможностью быстрой утечки газового поглотителя из активной зоны и, как следствие, получением некомпенсируемого положительного эффекта реактивности. В обеспечение разработки ГСР выполнены постановочные расчетные и экспериментальные исследования, отраженные, в частности, в [8], но дальнейшие конструкторские проработки не проводились. В результате на практике нашла применение барабанная система регулирования. Тем не менее, хотя возможности применения ГС нуждаются в дальнейших ис-

следованиях, она вполне может рассматриваться, например, в качестве дополнительной аварийной защиты.

На основе анализа характерных паспортных данных на партии твэлов и замедлителя оценена степень влияния технологических отклонений плотности материалов ядерного топлива и замедлителя, а также обогащения урана по урану-235 на энерговыделение в ТВС и реактивность реактора.

Расчеты выполнены с помощью программы КАСКАД-С в (R, θ) -геометрии [9], причем для более корректной аппроксимации исходная геометрия задавалась в формате программы MCU-RFFI. Затем с помощью программы CONDAT [10] производилось преобразование входных данных в формат программы КАСКАД-С.

Рассмотрены два варианта: первый, когда все твэлы каждой ТВС берутся из одной и той же партии, номер которой определяется случайным образом, и второй, когда все твэлы каждой ТВС выбираются из разных партий с помощью генератора случайных чисел.

Из результатов расчетов следует, что максимальное отклонение энерговыделения в ТВС от среднего по всем ТВС в первом варианте сборки — ~ 3 %, во втором — ~ 0,2 %, причем в активной зоне присутствуют явно выраженные области (паттерны) с положительными или отрицательными отклонениями энерговыделения.

Набор ТВС твэлами по любому варианту сборки не приводит к существенному изменению реактивности реактора ($< 0,01$ % $\Delta K/K$). К заметному изменению реактивности могут привести лишь сборка ТВС по партиям твэлов с максимальными или минимальными значениями плотности урана-235 (~ 0,34 % $\Delta K/K$) или изменение плотности гидрида циркония от максимального к минимальному значению (~ 0,22 % $\Delta K/K$).

Радиационная защита космического аппарата с ядерным реактором предназначена для снижения реакторных излучений до уровней, обеспечивающих надежное функционирование всех элементов летательного аппарата и, в случае пилотируемого полета, радиационную безопасность экипажа в течение всей экспедиции.

Критическими элементами космического аппарата, наиболее чувствительными к реакторному излучению, являются электронные системы. В настоящее время принимаются допустимыми следующие радиационные нагрузки на электронные компоненты, применяемые в космической технике:

- флюенс нейтронов ($E \geq 0,1$ Мэв) на обращенной к ЯЭУ стенке приборного отсека – 10^{12} 1/см²;
- поглощенная доза гамма-излучения – $5 \cdot 10^4 \dots 10^6$ рад (для различных компонентов).

Также одним из важных критериев, влияющих на конструкцию радиационной защиты, служит допустимый уровень энерговыделения в баках с жидким водородом от поглощения реакторных излучений. Этот уровень определяется как системой охлаждения баков, препятствующей закипанию водорода, так и степенью снижения энерговыделения в водороде радиационной защитой.

При выборе конструкции радиационной защиты (как правило, с учетом минимизации веса) главными факторами являются:

- тепловая мощность реактора и время работы на энергетическом и двигательном режимах;
- расстояние от реактора до критических точек;
- геометрические параметры реактора;
- энерговыделение в материалах защиты.

Определяющим по радиационным нагрузкам на оборудование и экипаж является работа реактора на энергетическом режиме. Однако, двигательный режим может потребовать дополнительной защиты или соответствующей системы охлаждения водородных баков для предотвращения закипания жидкого водорода.

Материалы радиационной защиты должны обладать высокой эффективностью по ослаблению потоков нейтронов и гамма-квантов и при большой тепловой мощности реактора – высокой термической стойкостью. При этом они должны быть совместимы с конструкционными материалами. К настоящему времени наиболее исследованы

и разработаны блоки защиты из слоев гидроксида циркония с добавкой бора и гидроксида лития. Другим перспективным вариантом блока защиты могут быть слои гидроксида лития с чередованием со слоями урана-238 или вольфрама.

Геометрически блок радиационной защиты имеет вид усеченного конуса с прилегающим к реактору меньшим основанием. Все основные системы космического аппарата располагаются внутри тени конуса, формируемого блоком защиты. Раствор конуса зависит от площади защищаемой поверхности и расстояния до нее от реактора. При компактном расположении оборудования (включая водородные баки) это расстояние может быть 5...10 м при растворе конуса до 30°. Но возможны варианты, при которых реактор с защитой отодвигается на специальной ферме (система отодвижения) на расстояние до 100 м от защищаемой плоскости, в этом случае раствор конуса может быть 10...15°. Как отмечено в [11], в ряде случаев в результате оптимизации геометрии теневой зоны не исключен вариант построения нескольких теневых углов, ориентированных на различные защищаемые объекты.

Таким образом, характеристики блока радиационной защиты в значительной мере индивидуальны для каждой поставленной задачи, схемы компоновки космической установки и условий ее эксплуатации. Пример характерной радиационной защиты КЯЭДУ [12] с энерговыработкой ~ 700 МВт·сут приведен на рис. 4.

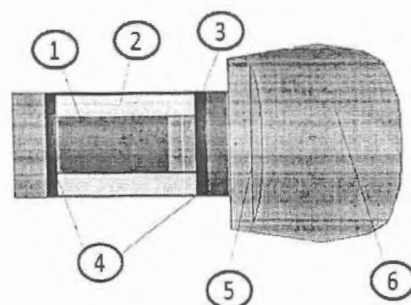


Рис. 4. Блок радиационной защиты: 1 – активная зона, 2 – боковой отражатель, 3 – торцевой отражатель, 4 – коллектор, 5 – обедненный уран, 6 – гидрид лития

Заключение

Результаты проведенного исследования позволяют утверждать, что реактор ИРГИТ-М может обеспечить требуемые физические характеристики, ядерную и радиационную безопасность космической энергодвигательной установки тепловой мощностью 300 кВт на энергетическом режиме и длительностью кампании не менее 10 лет. К достоинствам такого решения относятся его масштабируемость и экономичность в реализации.

Список литературы

1. *Обзор* международных документов и национальных процедур, которые могут иметь отношение к использованию ядерных источников энергии в космическом пространстве в мирных целях. Доклад Рабочей группы по использованию ядерных источников энергии в космическом пространстве. Комитет по использованию космического пространства в мирных целях. Генеральная Ассамблея ООН. А/АС.105/781, 12 марта 2002 г.
2. *Павшук В.А., Каминский А.С., Кузнецов В.С., Гордеев Э.Г., Колюхов Г.В.* К вопросу обеспечения безопасности реактора в составе ядерной энергодвигательной установки // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2008, вып. 3, с. 3–9.
3. *Демянко Ю.Г., Колюхов Г.В., Коротеев А.С., Кузьмин Е.П., Павельев А.А.* Ядерные ракетные двигатели. М.: ООО "Норма-Информ", 2001.
4. *Машиностроение.* Энциклопедия. Машиностроение ядерной техники. Т. IV-25. Кн. 2. Глава 6.2. Под общ. ред. Е.О. А д а м о в а. М.: Машиностроение, 2005.
5. *Дегтярева Л.А., Ионкин В.И., Коновалов В.А., Матков А.Г. и др.* / Proc. of 3-rd Int. Conf. "Nuclear Power Engineering in space. Nuclear Rocket Engines", Part 1, Podolsk, 1993.
6. *Гомин Е.А., Гуревич М.И., Майоров Л.В., Марин С.В.* Описание применения и инструкция пользователя программой MCU-RFFI расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик. Препринт ИАЭ № 5837, 1994.
7. *WIMSD.* A Neutronics CODE for Standart Lattice Physics Analysis. PROGRAM-NAME: WIMS D-5B (98/11) PACKAGE-ID:NEA 1507/03, 1998.

8. *Акопов Р.Б., Гордеев Э.Г., Мамаев Ю.В. и др.* Экспериментальные исследования газовой системы регулирования ЯРД на стенде "Стрела". Отчет НИИТП, инв. № 22110, 1969.
9. *Волощенко А.М., Швецов А.В.* КАСКАД-С-2,5 – программа для решения уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения методом дискретных ординат в двумерной геометрии. Отчет ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, инв. № 7-26-2004, 2004.
10. *Gurevich M.I., Russkov A.A., Voloschenko A.M.* ConDat 1.0 – Code for Converting by the Tracing Algorithm the Combinatorial Geometry Presentation to the Bit-Mapped One, Users Guide. Preprint of Keldysh Inst. of Appl. Math., Russian Ac. of Sci., № 12 (2007).
11. *Еремин А.Г., Зарицкий Г.А., Коробков Л.С., Пышко А.П., Плотников А.Ю.* Радиационный фактор в формировании конструктивного облика космического аппарата с ядерной энергетической установкой. Труды межд. конф. "Ядерная энергетика в космосе-2005", Москва-Подольск, 1-3 марта 2005 г.
12. *Колганов В.Д., Ромадова Е.Л.* Предложение по концепции ядерной энергодвигательной установки ЯЭДУ-Б40/500 с газотурбинным преобразованием энергии. Отчет НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, № 110-От-5900, 2001.

Контактная информация об авторах статьи – Павшук Владимир Александрович, дир. отделения, тел.: (499)196-95-95, e-mail: var_ki@mail.ru;

Каминский Альберт Сергеевич, нач. отдела, тел.: (499)196-94-43, e-mail: lri@bk.ru;

Кузнецов Виктор Сергеевич, нач. лаб., тел.: (499)196-94-43, e-mail: lri@bk.ru;

Гордеев Эдуард Георгиевич, нач. лаб., тел.: (499)196-70-56, e-mail: gordeev@base1.dhnp.kiae.ru;

Пальванов Валерий Чарыевич, с. н. с., тел.: (499)196-98-53;

Турбина Тамара Александровна, с. н. с., тел.: (499)196-70-56;

Хмылев Анатолий Николаевич, в. н. с., тел.: (499)196-94-43, e-mail: xan38@bk.ru;

Колюхов Георгий Владимирович, г. н. с., тел.: (495)456-96-97.

Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 4,
с. 90–96.

СОДЕРЖАНИЕ

Асмолов В.Г., Загрязкин В.Н., Цуриков Д.Ф., Вишневецкий В.Ю., Дьяков Е.К., Котов А.Ю., Репников В.М. Основные результаты исследования взаимодействия расплава корнума и стали в корпусе реактора типа ВВЭР-1000 при тяжелой аварии в проекте МАСКА	3
Токаренко В.Ф., Алексеев П.Н., Глембоцкий А.В., Беляков И.М., Варгин А.М., Воронова О.А., Данилов Ю.Ф., Деулин А.А., Евдокимов В.В., Кульнев Д.В., Лобанов П.С., Самигулин М.С., Семенов Г.П., Шагалиев Р.М., Шемякина Т.В., Данилов В.А., Ракитин И.Д. Технология разработки распределенных вычислительных систем на базе супер-ЭВМ для решения комплексных задач ядерной энергетики	26
В.Ф. Токаренко, Беляков И.М., Варгин А.М., Воронова О.А., Данилов Ю.Ф., Деулин А.А., Евдокимов В.В., Кульнев Д.В., Лобанов П.С., Самигулин М.С., Семенов Г.П., Шагалиев Р.М., Шемякина Т.В. Распределенная библиотека ППО и ее интеллектуальная среда.....	55
Гуревич М.И., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А. Адаптация программы MCU-PD к параллельным вычислениям на многопроцессорных компьютерах	66
Постников Н.С. Импульсный хаос и управление им в ядерных реакторах	77
Шикалов В.Ф., Журбенко А.В., Кузиль А.С., Козлова Л.В. Физическое разнообразие при формировании сигналов аварийной защиты по нейтронно-физическим параметрам для АЭС с ВВЭР	85
Павшук В.А., Каминский А.С., Кузнецов В.С., Гордеев Э.Г., Пальванов В.Ч., Турбина Т.А., Хмылев А.Н., Колюхов Г.В. Радиационная безопасность космической ядерной энергодвигательной установки увеличенного ресурса и возможности модернизации реактора ИРГИТ.....	90

CONTENTS

Asmollov V.G., Zagryazkin V.N., Tsurikov D.F., Vishnevsky V.Yu., D'yakov Ye.K., Kotov A.Yu., Repnikov V.M. The Basic Study Results on the Interaction between Corium Melt and Steel in the VVER-1000 Reactor Vessel during a Severe Accident Obtained under the OECD "MASCA" Project.....	3
Tokarenko V.F., Alekseev P.N., Glembot-sky A.V., Gurevich M.I., Krayushkin A.V., Lebedev V.I., Belyakov I.M., Vargin A.M., Voronova O.A., Danilov Yu.F., Deulin A.A., Evdokimov V.V., Kul'neev D.V., Lobanov P.S., Samigulin M.S., Semenov G.P., Shagaliev R.M., Shemyakina T.V., Danilov V.A., Rakitin I.D. Technology of Development of the Distributed Computing Systems on the Basis of the Super Computer for the Decision of Complex Tasks of Nuclear Power	26
V.F. Tokarenko, Belyakov I.M., Vargin A.M., Voronova O.A., Danilov Yu.F., Deulin A.A., Evdokimov V.V., Kul'neev D.V., Lobanov P.S., Samigulin M.S., Semenov G.P., Shagaliev R.M., Shemyakina T.V. The Distributed Library of the Applied Software and Its Intellectual Environment.....	55
Gurevich M.I., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. Adaptation of MCU-PD code to parallel computing on multiprocessor computer.....	66
Postnikov N.S. Pulsed Chaos and Its Control in Nuclear Reactors	77
Shikalov V.F., Zhurbenko A.V., Kuzhil' A.S., Kozlova L.V. Physics Diversity at Neutron-Physics Parameters Alarm Signals Generating for VVER Plants	85
Pavshook V.A., Kaminsky A.S., Kuznetsov V.S., Gordeev E.G., Pal'vanov V.Ch., Turbina T.A., Khmylev A.N. Radiation Safety of Space Nuclear Thermal Propulsion and Power Increased Lifetime Installation and Possibility of Reactor IRGIT Modernization	90

Правила оформления статей

При подготовке статьи в сборник автор должен руководствоваться стандартом "Оригиналы авторские и текстовые издательские" (ОСТ 29.115 – 88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования:

1. Экземпляр статьи должен быть первым, отпечатан на одной стороне листа формата А4 **шрифтом № 12 через 2 интервала**. Статья должна быть составлена в следующем порядке: индекс УДК; заглавие; инициалы и фамилии авторов; место работы каждого автора с почтовым адресом; аннотация (не более 10 строк); ключевые слова – все вышеперечисленное на русском и английском языках; текст; список литературы; таблицы; рисунки; подрисуночные подписи (на отдельном листе).

2. Статья должна также предоставляться обязательно в виде электронной версии **обычным шрифтом № 12 Times New Roman, междустрочный интервал – одинарный**, в редакторе Word 97 или более поздних версий. Текст не форматируется, в качестве имени файла используется ФИО первого автора статьи. **Кавычки в тексте ставятся при английской раскладке клавиатуры ("..")**.

3. Содержание статьи должно быть кратким и четким. Исключаются общие рассуждения, известные положения. Не допускается дублирование материала в тексте, таблицах, подрисуночных надписях. Необходимо соблюдать единообразие в написании терминов, наименований физических величин и единиц измерения, условных обозначений, сокращений, символов. Наименования и обозначения единиц физических величин необходимо приводить в системе СИ.

Необходимо обращать внимание на **написание прописных и строчных букв: русские и греческие буквы (α, β, γ, φ и т.д.) набираются прямо, а латинские (x, y, z, w и т.д.) – курсивом**. Те же требования в обозначениях нужно соблюдать при написании индексов и степеней в формулах. **Обозначения матриц и векторов набираются полужирным шрифтом прямо**. Формулы, включенные в текст, следует набирать без увеличения интервала между строками, например b/d , $\exp(x/e)$.

4. Таблицы нумеруются, **каждая таблица должна иметь заголовок**. Сокращения в графах таблицы не допускаются. В тексте необходимы ссылки на все таблицы. **Каждая таблица печатается на отдельном листе, а в электронном виде представляется в отдельном файле**.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть размечены и сразу расшифрованы. Формулы нумеруются арабскими цифрами, номер ставится с правой стороны листа в круглых скобках. **Нумеровать следует только те формулы и уравнения, на которые есть ссылка в последующем изложении**. Формулы выполняются в редакторах Equation 3.0 или MathType при невозможности набора на клавиатуре ($x_n^2, y_m'', \sqrt{x}, \int_0^1 x, \frac{1}{y}$ и т.д.).

Подстрочные и надстрочные индексы вводятся с клавиатуры ($x_3, \text{км}^2$ и т.д.), греческие буквы вставляются через Меню *Вставка* → *символ*.

6. В тексте статьи рисунок обязательно представляется на отдельном листе формата не более А4. На рисунках допускается минимальное число обозначений – краткие цифровые (по порядку номеров слева направо или по часовой стрелке) или буквенные обозначения. Все пояснения выносятся в подрисуночные подписи. На обороте каждого рисунка указываются фамилии авторов, название статьи, номер рисунка, обозначения верха и низа. **Внутренние надписи на рисунках набираются шрифтом № 11**. Внизу каждого рисунка должны быть

приведены его номер и **подрисуночная подпись шрифтом № 11**. При наличии нескольких различных графиков на одном рисунке каждый из них обозначается русскими буквами а), б), в) и т.д. и расшифровывается.

В компьютерном виде рисунки представляются в отдельных файлах, выполненные в графических редакторах *Paint, PhotoShop, CorelDraw* в черно-белом цвете (фотографии в растровом формате *tif, dpi-300*). Рисунки в Word не вставлять кроме случаев, когда рисунок изначально выполнен в Word.

7. Ссылки на литературу в тексте даются по порядку арабскими цифрами в квадратных скобках. **Список литературы составляется в той же последовательности, в которой приводятся ссылки на литературу**. Фамилии и инициалы авторов набираются полужирным курсивом.

8. Список литературы следует оформлять в соответствии с Государственным стандартом "Библиографическая ссылка" (ГОСТ Р 7.0.5–2008), в частности, необходимо указать :

а) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов (не менее трех первых), название статьи, название журнала (без кавычек), год, том, выпуск, номер, страницы;

б) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, место издания, издательство (без кавычек), год издания;

в) для авторефератов диссертаций – фамилию и инициалы автора, название автореферата диссертации, на соискание какой ученой степени написана диссертация, место и год защиты;

г) для препринтов – фамилии и инициалы авторов, название препринта, наименование издающей организации, шифр и номер, место и год издания;

д) для патентов – фамилии и инициалы авторов, название патента, страну, номер и класс патента, дату и год заявления и опубликования патента;

е) для отчетов – фамилии и инициалы авторов, название отчета, инвентарный №, наименование организации, год выпуска;

ж) для электронных источников – **полный электронный адрес (включая дату обращения к источнику)**, позволяющий обратиться к публикации.

9. **В конце текста указывается контактная информация о всех авторах статьи: фамилия, имя и отчество (полностью), должность, телефон, e-mail и по желанию автора – домашний почтовый адрес.**

Уточненная информация для читателей

научно-технического сборника

“Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов”!

Редколлегия сборника “ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов” информирует авторов и читателей сборника об организации подписки на “ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов”. Подписные индексы ОАО Агентство “Роспечать”: 66675 со II полугодия 2007 г. в каталоге “Издания органов научно-технической информации” и 32067 с 2010 г. в каталоге “Газеты. Журналы”.

Напоминаем, что “ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов” по-прежнему издается в трех выпусках: Физика и методы расчета ядерных реакторов, Динамика и безопасность ядерных энергетических установок и Импульсные реакторы и простые критические сборки.

Призываем заинтересованных специалистов поддержать активной подпиской сборник “ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов”.

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

С е р и я: Физика ядерных реакторов

Выпуск 4

Ответственный за выпуск **С.М. Зарицкий**
(тел./факс: (499)196-71-98, e-mail: zaritsky@adis.vver.kiae.ru)

Редактор **В.В. Пчелин**
(тел./факс: (499)196-99-44, e-mail: pchelin@adis.vver.kiae.ru)

Подписано в печать 27.10.09. Формат 70×108/16
Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 14,0. Тираж 200. Индекс 3646. 7 статей. Заказ 106

Отпечатано в Российском научном центре “Курчатовский институт”
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

Индекс 3646

ISSN 0205—4671. Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Физика ядерных реакторов, 2009, вып. 4, 1—100