

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. Лейпунского»

ФЭИ – 3277

И. Р. Суслов, И. А. Лямцев, Е. А. Земсков

**БАЗОВАЯ ТЕСТОВАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА
ЗАЩИТЫ ЯЭУ С ТЖМТ**

Обнинск – 2017

И. Р. Суслов, И. А. Лямцев, Е. А. Земсков.

Базовая тестовая модель расчёта защиты ЯЭУ с ТЖМТ: Препринт ФЭИ-3277. Обнинск : ГНЦ РФ-ФЭИ, 2017. — 22 с.

Разработана 3D модель полномасштабной защиты реактора с ТЖМТ в двумерной и трехмерной нерегулярной геометрии с детальным описанием насосов и парогенераторов. На основе описанного прототипа создан набор тестовых задач, позволяющий выполнить количественный анализ погрешностей расчёта прохождения излучения через защиту реактора с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем. Приведены полученные по программе MCCG3D (Method of Characteristics in Complicated Geometry, 3D) распределения нейтронных и гамма потоков, профили неравномерности потоков тепловых нейтронов по углу от направления на насос к направлению на парогенератор на внешней поверхности реактора, получена анизотропия потоков частиц с острым пиком в направлении на насос.

Developed full-scale 3D model of the reactor protection with TGMT in two-dimensional and three-dimensional irregular geometry with an explicit description of the pumps and steam generators. Based on the prototype created a set of test problems, allowing to perform quantitative analysis of errors in the calculation of radiation transmission through protection of the reactor with heavy liquid metal coolant. Given received program MCCG3D (Method of Characteristics in Complicated Geometry, 3D) distribution of neutron and gamma fluxes, the profiles of the unevenness in the flow of thermal neutrons in angle from the direction of the pump to the direction of the steam on the outer surface of the reactor, obtained a strong anisotropy flows particles with a sharp peak in the direction of the pump.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов и алгоритмов расчёта защиты ЯЭУ с ТЖМТ, расчёт их верификационных матриц (аттестация программ расчёта защиты) являются комплексной задачей. Она включает в себя взаимодействие общетеоретической части (развитие методов решения уравнения переноса в общей постановке, аппроксимации, ускорения сходимости итераций для детерминистических методов и понижения дисперсии для стохастических методов, верификацию на расчётах абстрактных бенчмарков) и специализированной части, ориентированной на конкретные особенности защиты ЯЭУ с ТЖМТ (диаметры и длины каналов, ослабления ионизирующего излучения, соотношение поглощения и рассеяния и т. д.).

Отдельной задачей является создание верификационной базы для аттестации программ расчёта защиты. При создании верификационной базы целесообразно руководствоваться следующими принципами:

1) Занижение уровней радиационных полей и завышение (излишне консервативная оценка) нежелательно. Означает это, что нет необходимости в использовании «жестких», избыточно сложных математических расчётных моделей, так как они будут предъявлять завышенные требования к расчётным программам. Верификационная база должна строиться на основе приближенных к реальности тестовых задач, хотя и упрощенных, чтобы уменьшить затраты на подготовку исходных данных и анализ, но сохраняющих основные физические и расчётные черты (например, порядок ослабления потоков излучения).

2) Исследование константной погрешности требует привлечения константных систем с большим количеством энергетических групп (например, 299-групповой нейтронной библиотеки БНАБ) и (или) детальной (непрерывной) энергетической зависимостью констант (например, в MCNP [1]). Вычислительные и аналитические затраты на проведение таких расчётов необходимо по возможности сокращать. Видимые на этом направлении пути: ограничить расчётные исследования минимальным набором основных защитных материалов с простыми одномерными геометриями.

3) Для оценки методической погрешности детерминистических программ и методов понижения дисперсии в Монте-Карло необходимо сравнивать получаемые этими программами (методами) решения с прецизионными решениями, полученными с помощью тех же самых нейтронных и гамма констант.

Таким образом, общая структура работ по созданию верификационной базы для аттестации программ расчёта защиты ЯЭУ с ТЖМТ (верификационной матрицы) представляется следующей:

а) Создание тестовых моделей, соответствующих характерным физическим и расчётным свойствам ЯЭУ, как близких к реальности, так и упрощенных.

б) Исследование на этих моделях, прежде всего на упрощенных, коэффициентов чувствительности расчётных функционалов к константным и технологическим погрешностям на основе расчётов как с детальным энергетическим разби-

нием (299 групп, непрерывная зависимость), так и с используемыми в проектных работах системами констант.

в) Исследование зависимости расчётных (методических) погрешностей от параметров аппроксимации аттестуемой программы на 3D тестовых моделях и выбор оптимальных параметров для гарантированного получения заданной точности расчёта с учётом эффектов константных погрешностей.

1. Базовая тестовая модель расчёта защиты ЯЭУ с ТЖМТ

1.1. Прототип модели и принципы построения системы проблемно-ориентированных тестов для ЯЭУ с ТЖМТ

В настоящем разделе представлены методические соображения, использовавшиеся при разработке тестовой модели для проведения тестовых расчётов в обоснование верификационной матрицы программы MCCG3D [2] для расчёта защиты реакторов с ТЖМТ. Вычислительный тест имеет реальный реакторный прототип с полными исходными данными, позволяющими получить достаточно точное решение (все необходимые макро- и микросечения и константы заданы).

Прототип модели и упрощения. Целью составления модели является проведение детальных исследований зависимости результатов от аппроксимационных параметров: количества узлов пространственной и угловой сетки, шага трекинга, анизотропии рассеяния и системы констант. Эти исследования требуют больших вычислительных затрат, и для того, чтобы сделать эти затраты разумными, требуется упрощение модели. По сравнению с реальной моделью эти упрощения должны, с одной стороны, сохранять основные вычислительные характеристики модели, а с другой — уменьшить размерность задачи.

Прототипом тестовой модели является реактор на быстрых нейтронах СВБР-75/100 мощностью 280 МВт (тепл.) [3] с жидкометаллическим теплоносителем свинец-висмут, выполненный конструктивно в виде моноблока и содержащий в одном прочном корпусе активную зону, отражатели, 12 модулей парогенератора, 2 циркуляционных насоса первого контура и внутрикорпусную радиационную защиту. Общий вид прототипа модели представлен на рисунке 1.

Оборудование первого контура (циркуляционные насосы, модули парогенератора) расположены симметрично по периметру внутреннего пространства корпуса моноблока. В качестве внутрикорпусной защиты рассматривается сталь и карбид бора в виде брикетов плотностью $1,7 \text{ г/см}^3$ в разном соотношении на различных участках внутреннего объёма моноблока. Непосредственно за страховочным корпусом моноблока расположен бак СПОТ с водой, выполняющий функцию внешней радиационной защиты и резервного запаса воды для аварийного расхолаживания реакторной установки.

Рассматривается участок радиальной защиты на стыке ГЦН и ПГ. Этот участок симметризован таким образом, что расчётный сектор симметрии равен 30 градусам. Несколько изменены, по сравнению с реальными, размеры и объёмные доли материалов в гомогенизированных областях.

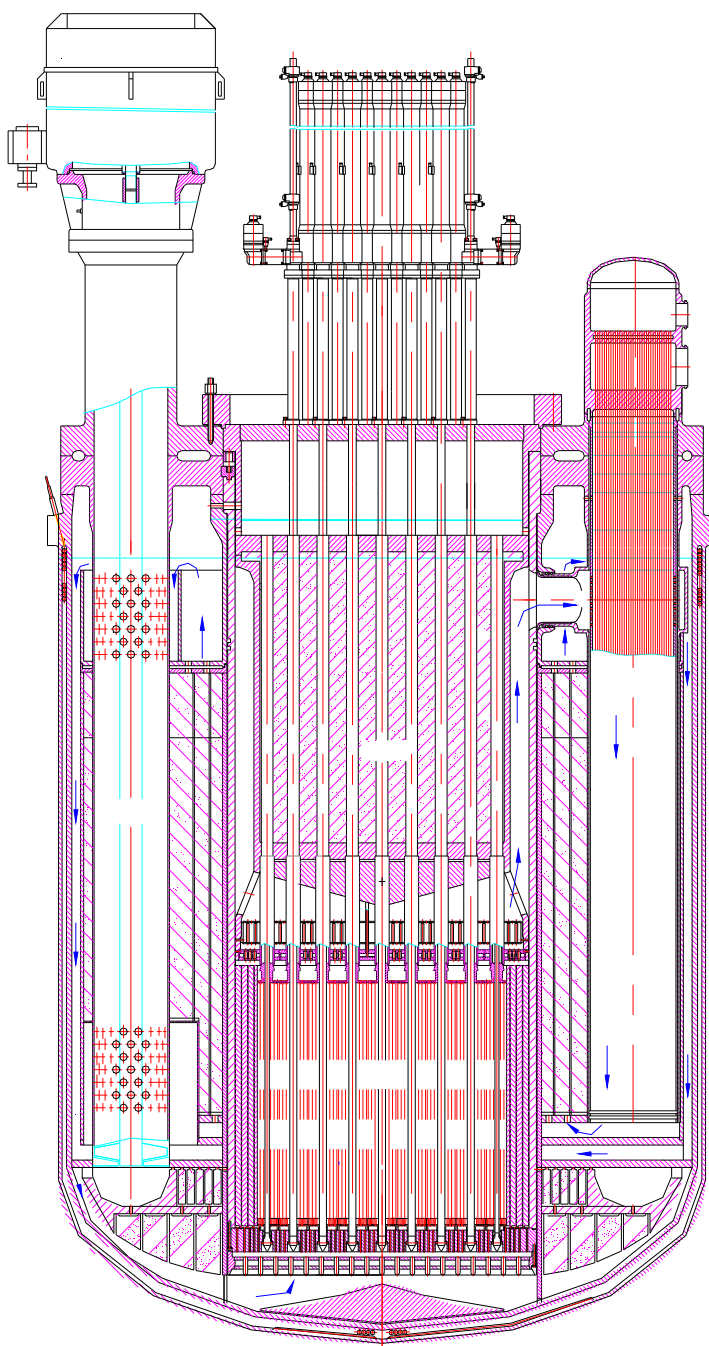


Рис. 1. Общий вид прототипа расчётной модели

На основе описанного выше прототипа создан набор тестовых задач, позволяющий выполнить количественный анализ погрешностей расчёта прохождения излучения через защиту реактора с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем. Задачи построены на основе принципа последовательного упрощения.

При создании набора задач предполагается его использование в последующем при исследовании всех компонент погрешностей расчёта прохождения излучения. Эти будущие исследования должны включать:

- методические погрешности решения уравнения переноса нейтронов и гамма-квантов;
- константные погрешности.

Проведение трёхмерных расчётов защиты и их анализ требует больших вычислительных затрат, ресурсов и труда аналитика. Использование системы абстрактных моделей (двумерных, одномерных) позволяет уменьшить вычислительные затраты, выделить наиболее важные эффекты и представить наглядно полученные результаты.

1.2 Тестовые задачи ВР-3D-1 и ВР-3D-2 (Benchmark Problem 3d-1, 2)

Цель. Целью данных задач является исследование методических погрешностей при расчёте прохождения излучения через защиту по трёхмерным (как детерминистическим, так и Монте-Карло методам) программам и исследование зависимости получаемых результатов от используемых констант взаимодействия нейтронов и гамма-квантов со средой.

Уравнение. Решается неоднородное уравнение переноса нейтронов и гамма-квантов с объёмным пространственным источником нейтронов деления. В случае использования многогруппового приближения с учётом анизотропии рассеяния в P_n -приближении уравнение имеет вид

$$(\Omega, \text{grad})\psi^g(r, \Omega) + \sigma^g\psi^g(r, \Omega) = \sum_{g'} \int d\Omega' \sum_{l=0, n} (2l+1)\sigma_l^{g' \rightarrow g} P_l(\Omega\Omega') \psi_l^g(r, \Omega') + \chi^g Q(r) \quad (1)$$

с вакуумными граничными условиями на внешней границе $\psi(r, \Omega) = 0$ для входящих направлений движения частиц Ω и условиями отражения на внутренних границах области симметрии.

Источник нейтронов деления. Источник нейтронов деления $Q(r)$ и спектр нейтронов деления χ^g предполагаются постоянными в активной зоне. Спектр нейтронов деления нормирован на 1

$$\sum_g \chi^g = 1,$$

интеграл по пространству источника $Q(r)$ определяется из условия равенства тепловой мощности реактора $W = 280 \text{ МВт}$.

При количестве вторичных нейтронов на одно деление

$$\nu = 2,46,$$

константе энерговыделения на одно деление

$$A = 3,285 \times 10^{13} \text{ делений/кДж}$$

и при объёме активной зоны

$$V = \pi \cdot 85^2 \cdot 90 = 2,042821 \times 10^6 \text{ см}^3 \quad (2)$$

общее количество нейтронов деления (интегральная нормировка) получается равным

$$N = W(\text{кВт}) \cdot A \cdot \nu = 2,263 \cdot 10^{19} \text{ нейтронов/с}, \quad (3)$$

а плотность нейтронов деления –

$$n=N/V=1,108\cdot10^{13} \text{ нейтронов}/(\text{см}^3 \text{ с}). \tag{4}$$

Геометрия. В описываемой геометрической расчётной модели используется 13-зонная регулярная структура в аксиальном направлении.

Рассматриваются следующие геометрические модули в плоскости:

- 1. Активная зона реактора
- 2. Зона радиального отражателя
- 3. Зона радиальной защиты
- 4. Зона внешнего корпуса реактора
- 5. Зона внекорпусной воды
- 6. Зона главного циркуляционного насоса (ГЦН)
- 7. Зона шахты ГЦН
- 8. Зона парогенератора (ПГ)

Каждый из модулей описывается цилиндрическим кольцом (т. е. координатами центра, внутренним и внешним радиусами) и номерами (номером), если необходимо, других модулей, область, занимаемую которыми необходимо исключить. Координаты центров (представлены в полярных координатах) и радиусы цилиндрических модулей (суперячеек) показаны в таблице 1. Здесь R_1 и R_2 — внутренние и внешние радиусы модулей. В последней колонке для рассматриваемого модуля даются номера модулей, чья область исключается. Т. е. из цилиндрического кольца модуля зоны радиальной защиты (модуль 3) исключаются области зоны шахты ГЦН (модуль 7) и зоны ПГ (модуль 8), а из зоны шахты ГЦН (модуль 7) исключается зона ГЦН (модуль 6).

Таблица 1. Параметры геометрических зон – модулей в плоскости в тестовой задаче

№ зоны	Модуль	R_c (см)	φ_c (град)	R_1	R_2	Исключая
1	Активная зона реактора	0,0	0,0	0,0	85,0	–
2	Зона радиального отражателя	0,0	0,0	85,0	105,0	–
3	Зона радиальной защиты	0,0	0,0	105,0	200,0	Зона 7, 8
4	Зона внешнего корпуса реактора	0,0	0,0	200,0	220,0	–
5	Зона внекорпусной воды	0,0	0,0	220,0	240,0	–
6	Зона ГЦН	165,0	0,0	0,0	30,0	–
7	Зона шахты ГЦН	160,0	0,0	0,0	40,0	Зона 6
8	Зона ПГ	170,0	30,0	0,0	30,0	–

Общий вид расчётной области (точнее, её области симметрии), изображённый графическим выводом программы MCCG3D, представлен на рисунке 2 с номерами зон.

Макроконстанты. В настоящей тестовой задаче ставится цель как анализа методической погрешности решения уравнения переноса, так и константной по-

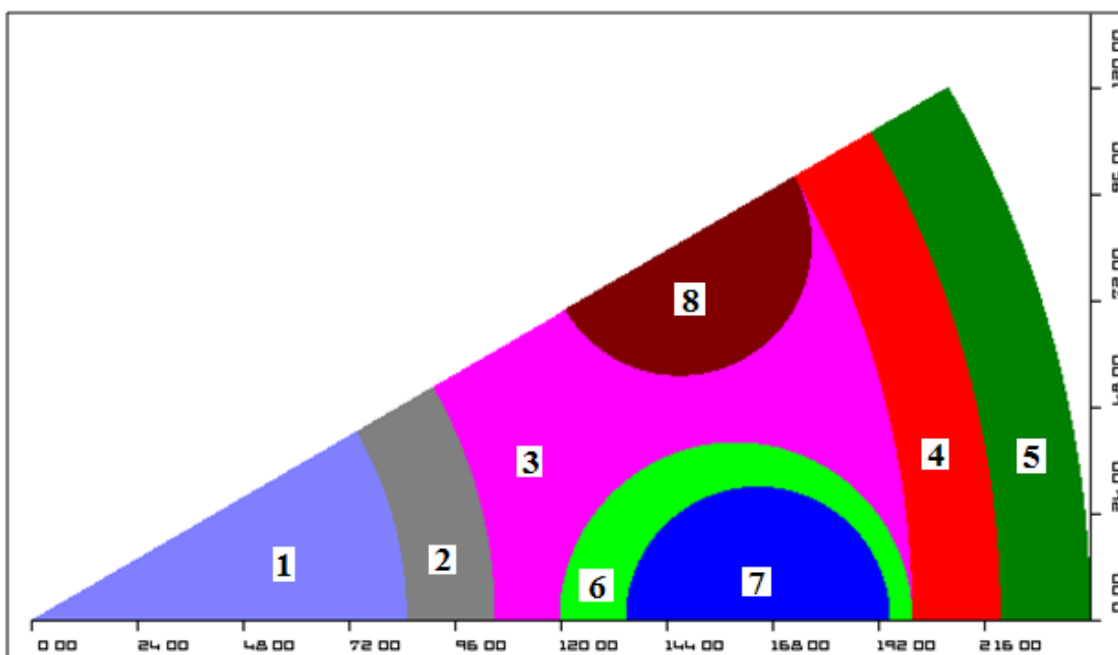


Рис. 2. Поперечное сечение расчётной модели

грешности. Для анализа методической погрешности удобно считать константы строго фиксированными, однозначно воспроизводимыми. Для анализа константной погрешности наоборот требуется как раз изменение констант. Для обеспечения разумных затрат как на обеспечение и контроля воспроизводимости констант, так и на исследования константной составляющей в задаче предлагается использовать двухступенчатую систему подготовки макроконстант.

Для небольшого количества исходных **материалов** константы готовятся по какой-либо из систем подготовки макроконстант. Эти константы могут автономно исследоваться в более простых одномерных задачах, например описывающих однородную защиту. На основе констант для материалов с учётом объёмных долей чисто арифметически готовятся константы для смесей материалов, которые используются в соответствующих геометрических зонах различных моделей.

В тестовой задаче используются пять **материалов**, обозначаемых следующими идентификаторами:

Src — источник нейтронов деления, активная зона;

PbBi — эвтектика свинец-висмут;

W — вода;

B₄C — карбид бора;

St — сталь.

В таблице 2 приведены ядерные концентрации материалов, использованных в тестовой задаче. Предполагается, что данные таблицы 2 используются при создании базовой библиотеки макросечений, с помощью какой-либо программы генерации макроконстант.

На основе пяти материалов в соответствии с объёмными долями, приведенными в таблице 3, формируются макроконстанты четырнадцати **смесей материалов**, обозначаемых следующими идентификаторами:

- Src** – источник нейтронов деления, активная зона
- TopR1** – нижняя часть верхнего торцевого отражателя
- TopR2** – верхняя часть верхнего торцевого отражателя
- PbBi** – эвтектика свинец-висмут
- Shld** – защитная композиция
- TopC** – конструкционная композиция в верхней части реактора
- BotR** – нижний торцевой отражатель
- St** – сталь.
- W** – вода
- Pump** – насос
- SG1** – парогенератор (содержание воды – 50%)
- SG2** – парогенератор (содержание воды – 0%)
- Void** – пустота (смесь газов)
- RadR** – радиальный отражатель

Таблица 2. Ядерные концентрации материалов базовой библиотеки

№ п/п	Иденти-фикатор	Материал	Плотность, г/см ³	Ядерные концентрации ×10 ⁻²⁴	
1	Src	Активная зона	N/A	U5	0,00190
				U8	0,00850
				Pb	0,00400
				Bi	0,00500
				Fe	0,00800
2	PbBi	Эвтектика свинец – висмут	10,3	Pb	0,01317
				Bi	0,01628
3	W	Вода	1	H	0,0668
				O	0,0334
4	B ₄ C	Карбид бора (B ₄ C)	1,7	B	0,0742
				C	0,01855
5	St	Сталь марки 1X18H9T (нержавеющая)	7,85	Fe	0,06014
				Cr	0,0182
				Ni	0,00805

Таблица 3. Объёмные доли материалов в смесях материалов

Смесь	Src	PbBi	W	B ₄ C	St	Смесь	Src	PbBi	W	B ₄ C	St
1. Src	1,0	–	–	–	–	8. St	–	0,	–	–	1,0
2. TopR1	–	0,30	–	–,	0,70	9. W	–	–	1,0	–	–
3. TopR2	–	0,30	–	0,20	0,50	10. Pump	–	0,50	–	–	0,50
4. PbBi	–	1,0	–	–	–	11. SG1	–	0,30	0,25	–	0,20
5. Shld	–	0,10	–	0,70	0,20	12. SG2	–	0,30	0,	–	0,20
6. TopC	–	0,50	–	–	0,50	13. Void	–	0,001	–	–	–
7. BotR	–	0,30	–	–	0,70	14. RadR	–	0,10	–	–	0,90

В таблице 4 представлено высотное распределение **смесей материалов** в аксиальных геометрических зонах для каждого из восьми цилиндрических модулей. Во второй (Δz) и третьей (Z_i) колонках дана толщина и суммарная высота от низа модели, в остальных колонках — идентификаторы смесей материалов в соответствующем аксиальном слое.

В ряде программ (TWODANT) [4] макроконстанты в геометрических зонах (константы смесей) для расчёта могут быть подготовлены непосредственно в самих программах, однако для удобства в таблице 5 представлены ядерные концентрации для смесей (геометрических зон). В расчётах по программе MCCG3D данные таблицы 5 не использовались.

Таблица 4. Высотное распределение смесей материалов в модулях

	Δz	Z_i	1	2	3	4	5	6	7	8
			Реактор	Рад. отраж.	Рад. защита	Корпус	Вода	ГЦН	Камера ГЦН	ПГ
1	20	20	W	W	W	W	W	W	W	W
2	7	27	St	St	St	St	W	St	St	St
3	20	47	PbBi	PbBi	PbBi	St	W	PbBi	PbBi	PbBi
4	40	87	BotR	BotR	Shld	St	W	Shld	Shld	Shld
5	20	107	BotR	RadR	Shld	St	W	PbBi	Shld	PbBi
6	60	167	Src	RadR	Shld	St	W	Pump	PbBi	SG1
7	30	197	Src	RadR	Shld	St	W	Pump	Shld	SG1
8	20	217	TopR1	RadR	Shld	St	W	Pump	Shld	SG1
8	20	237	TopR2	RadR	Shld	St	W	Pump	Shld	SG1
9	15	252	PbBi	PbBi	Shld	St	W	Pump	Shld	SG1
10	150	402	Shld	PbBi	Shld	St	W	Pump	Shld	SG1
11	100	502	Shld	PbBi	PbBi	St	W	Pump	PbBi	SG1
12	30	532	TopC	RadR	Void	St	W	Void	Void	SG1
13	3	535	Void	Void	Void	Void	Void	Void	Void	Void

Таблица 5. Ядерные концентрации смесей

	H	B	C	O	Cr	Fe	Ni	Pb	Bi	U5	U8
1	—	—	—	—	—	,00800	—	,00400	,00500	,00070	,00008
2	—	—	—	—	,01274	,04210	,00564	,00395	,00488	—	—
3	—	,01484	,00371	—	,00910	,03007	,00402	,00395	,00488	—	—
4	—	—	—	—	—	—	—	,01317	,01628	—	—
5	—	,05194	,01299	—	,00364	,01203	,00161	,00132	,00163	—	—
6	—	—	—	—	,00910	,03007	,00402	,00659	,00814	—	—
7	—	—	—	—	,01274	,04210	,00564	,00395	,00488	—	—

	H	B	C	O	Cr	Fe	Ni	Pb	Bi	U5	U8
8	—	—	—	—	,01820	,06014	,00805	—	—	—	—
9	,06680	—	—	,03340	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	,00910	,03007	,00402	,00659	,00814	—	—
11	,01670	—	—	,00835	,01274	,04210	,00564	,00395	,00488	—	—
12	—	—	—	—	,01274	,04210	,00564	,00395	,00488	—	—
13	—	—	—	—	—	—	—	,00001	,00001	—	—
14					,01638	,05413	,00765	,00132	,00163	—	—

1.3 Тестовые задачи BP-2D-1 и BP-2D-2 (Benchmark Problem 2D-1, 2)

Цель, для которой предполагается использование задач в двумерной нерегулярной геометрии — методические исследования в обоснование выбора пространственной сетки как по радиальному направлению, так и по азимутальному, выбор шага пространственной сетки на границах зон, выбор других параметров, а именно: приближения по углу, по анизотропии рассеяния, влияние на расчётные функционалы константных и методологических погрешностей. В отличие от 3D расчётов 2D модель требует значительно меньшего времени (при одинаковых пространственном, угловом, энергетическом приближении) и позволяет в зависимости от целей либо получать результаты быстрее, либо проводить их более глубоко, с более высокой точностью.

Геометрия тестовых задач BP-2D-1 и BP-2D-2 соответствует горизонтальной плоскости, проходящей через центр реактора. Задача BP-2D-1 соответствует исходной компоновке, а задача BP-2D-2 — возмущенной, в которой смесь материалов SG1 (парогенератор с соотношением пар—вода 50-50 %) заменена смесью материалов SG2 (100 % пара). Распределение смесей представлено в таблице 6. Все остальные данные берутся из таблиц 1–3 и рисунка 2.

Таблица 6. Распределение смесей по геометрическим зонам в двумерных тестовых задачах 2D-1 и 2D-2

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Реактор	Рад. отраж.	Рад. защита	Корпус	Вода	ГЦН	Камера ГЦН	ПГ
2D-1	Src	RadR	Shld	St	W	Pump	PbBi	SG1
2D-2	Src	RadR	Shld	St	W	Pump	PbBi	SG2

Тестовая задача BSS-1/1D-rad. Целью данной задачи является методические исследования в обоснование выбора шага по радиальной компоненте пространственной переменной, аппроксимации по углу, анизотропии рассеяния, анализ зависимости от констант. Тестовая задача **1D-rad** соответствует направлению

от центра трехмерной расчётной модели по радиусу. Геометрия — цилиндр. Толщины слоев и макрокостанты смесей материалов в слоях, приведенные в таблице 7 соответствуют толщинам и смесям материалов в соответствующих слоях 3D расчётной модели. Отметим, что в данной модели вся зона между радиальным отражателем и корпусом однородно заполнена каким-либо одним материалом (смесью материалов, в базовом случае смесью Shld) вместе с зонами насоса и парогенератора.

Таблица 7. Геометрические данные для модели 1D-rad

Зона	Толщина (см)	Материал
1	85,0	Src
2	20,0	RadR
3	95,0	Shld
4	20,0	St
5	20,0	W

1.4 Проверка физической разумности тестовой модели

Для проверки отсутствия грубых расчётных ошибок и физического соответствия представленной модели был выполнен ряд расчётов по инженерным методикам. На рисунке 3 приведены пространственное распределение полного нейтронного потока **Fsum** ($\text{н}/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$), потока быстрых нейтронов **Ffast** с энергией больше 0,1 МэВ, мощности нейтронной (**Dn**) и гамма (**Dg**) дозы (мкбэр/с) для направления «вверх» в цилиндрической геометрии по константам CASK по программе ANISN.

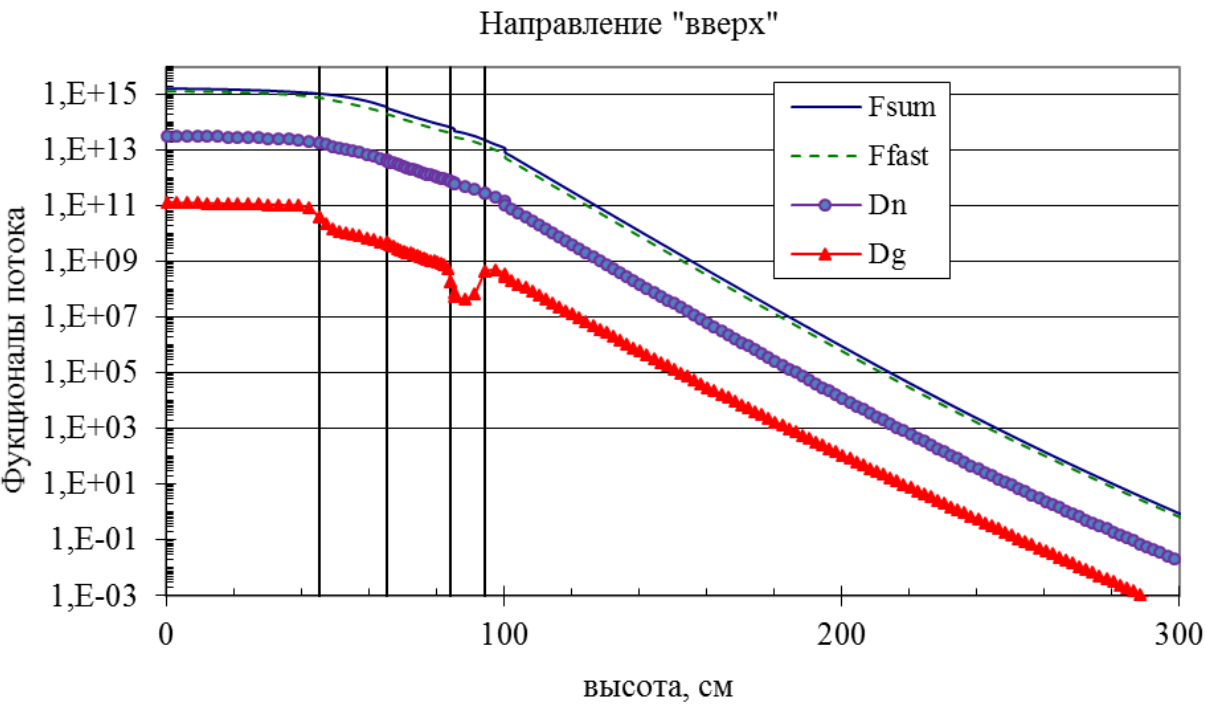


Рис. 3. Инженерные функционалы по высоте от центра активной зоны, расчёт тестовой модели по инженерной методике (по ANISN в цилиндрической геометрии с константами CASK)

На основе выполненных расчётов можно сделать заключение, что разработанная модель отражает основные характеристики защиты ЯЭУ с ТЖМТ и может использоваться в верификационной базе для анализа погрешностей расчёта защиты.

2 Результаты тестовых расчётов модели защиты ЯЭУ с ТЖМТ

В настоящем разделе представлены следующие результаты:

- Показана согласованность результатов расчётов по программам MCCG3D и ONEDANT;
- Представлено сравнение ослабления излучения при прохождении однородных тестовых композиций;
- Представлены результаты расчёта распределения потока тепловых нейтронов на поверхности корпуса в двумерной модели, показывающие наличие существенных пространственных эффектов на корпусе реактора.
- Представлены результаты расчёта трехмерной задачи по программе MCCG3D.

2.1 Проверка согласования результатов программ MCCG3D и ONEDANT в одномерной цилиндрической геометрии

В таблице 8 представлены результаты расчётов по двумерной опции программы MCCG3D и программе TWODANT (ONEDANT) тестовой задачи BP-1D-rad. В таблице 8 представлены групповые потоки 1, 8, 14, 19, 22 (нейтронных) и 40-й (гамма) групп на внутренних границах (точнее, в центре первой ячейки) радиальных зон. В ONEDANT использовалась пространственная сетка порядка 2,5 см в $S_{16}P_1$ приближении. Для MCCG3D использовались две нерегулярные сетки в плоскости, M1 с общим количеством ячеек в плоскости 331 с размером ячейки по радиусу примерно 5 см и сетка M2 с общим количеством ячеек в плоскости 1167 с вдвое более мелким шагом по радиусу и по углу, чем сетка M1. Сетка M1 в дальнейшем использовалась для расчётов 3D модели. Геометрические границы зон в нерегулярных сетках MCCG3D соответствовали геометрии, изображенной на рисунке 2, однако вместо реальных смесей материалов в зонах насоса и ПГ задавался материал радиальной защиты.

В целом с учётом различия пространственных сеток согласие результатов можно считать удовлетворительным. Несколько худшие, чем в регулярной цилиндрической геометрии, аппроксимационные свойства являются неизбежной платой за явное моделирование нерегулярной геометрии. При переходе от сетки M1 к более мелкой сетке M2 результаты существенно сближаются, однако и результаты с сеткой M1 выглядят в целом приемлемыми. Полученные результаты позволяют считать приемлемой выбранную пространственную аппроксимацию в плоскости в программе MCCG3D.

Вместе с тем существующие расхождения в районе корпуса представляют интерес для дальнейшего исследования с использованием более подробных пространственных и угловых сеток.

Таблица 8. Групповые потоки на внутренних границах зон

Зона	Программа	Группа					
		1	8	14	19	22	40
Реактор	ONEDANT	5,22E+10	2,03E+13	3,85E+14	4,04E+7	1,00E+4	8,63E+9
	MCCG3D M1	5,23E+10	2,04E+13	3,71E+14	3,88E+7	0,97E+4	8,52E+9
	MCCG3D M2	5,23E+10	2,04E+13	3,86E+14	4,04E+7	1,00E+4	8,64E+9
Радиальный отражатель	ONEDANT	1,77E+10	7,36E+12	2,29E+14	1,29E+12	2,71E+10	2,00E+9
	MCCG3D M1	1,36E+1	5,79E+12	1,77E+14	0,74E+12	1,34E+10	1,60E+9
	MCCG3D M2	1,76E+10	7,27E+12	2,27E+14	1,06E+12	2,14E+10	1,96E+9
Радиальная защита	ONEDANT	3,12E+8	1,15E+11	3,54E+13	2,72E+10	3,86E+7	1,12E+8
	MCCG3D M1	2,61E+8	0,91E+11	2,78E+13	0,79E+10	1,02E+7	0,84E+8
	MCCG3D M2	3,26E+8	1,20E+11	3,67E+13	2,58E+10	3,62E+7	1,15E+8
Корпус	ONEDANT	1,32E+3	5,89E+4	2,15E+7	1,18E+5	2,37E+3	2,44E+2
	MCCG3D M1	0,65E+3	4,40E+4	1,97E+7	0,84E+5	1,81E+3	2,12E+2
	MCCG3D M2	0,96E+3	6,48E+4	2,25E+7	0,60E+5	1,18E+3	2,47E+2
Вода	ONEDANT	2,37E+2	0,94E+3	2,01E+6	4,63E+5	7,89E+6	1,41E+4
	MCCG3D M1	1,67E+2	0,56E+3	1,25E+6	3,11E+5	4,17E+6	0,99E+4
	MCCG3D M2	2,51E+2	1,06E+3	1,98E+6	4,23E+5	5,62E+6	1,10E+4

2.2 Сравнительные характеристики ослабления излучения в одномерной цилиндрической геометрии

В двумерной и трехмерной моделях защиты, описанных выше, зона радиальной защиты содержит несколько областей с различающимися свойствами ослабления излучения. Наряду с основной защитной композицией — смесью материалов Shld, в ней содержатся: зона камеры насоса с материалом PbBi (в 2D модели), зона насоса со смесью материалов Pump и, наконец, в зоне парогенератора может быть либо смесь материалов SG1, либо смесь материалов SG2. Ослабление излучения такой гетерогенной композицией должно быть некой средней величиной ослаблений, получаемых при заполнении зоны радиальной защиты гомогенно каждым из соответствующих материалов. Поэтому перед изучением гетерогенной композиции есть смысл посмотреть на качественное поведение полей излучения в соответствующих одномерных цилиндрических моделях.

В таблице 9 приведены групповые потоки для групп 1, 8, 14, 19, 22 (нейтронных) и 40 (гамма), полученные при заполнении каждой из смесей материалов, встречающейся в зоне радиальной защиты всего пространства этой зоны, а на рисунках 4–6 показан полный нейтронный поток, поток быстрых нейтронов (1-13 группы) и тепловой поток нейтронов. Приведенные результаты показывают, что хотя отношение групповых нейтронных потоков в 1D цилиндрических моделях с материалами PbBi, Pump, SG1, SG2 к нейтронному потоку с защитной композиции Shld сильно зависит от номера группы, однако в целом (кроме самих верхних групп) материалы Shld и SG1 поглощают нейтроны гораздо сильнее, чем материалы Pump и PbBi, что должно вызвать значительный всплеск нейтронных

потоков, в частности тепловых нейтронов, в направлении на насос в двумерной и трехмерной задачах.

Таблица 9. Групповые потоки на границах зон

Коор- дината	Смесь мате- риалов	Энергетическая группа					
		1	8	14	19	22	40
106,25	PbBi	3,10E+8	1,35E+11	1,40E+14	8,85E+12	8,18E+11	2,48E+5
	Shld	3,12E+8	1,15E+11	3,54E+13	2,72E+10	3,86E+7	1,17E+8
	Pump	3,07E+8	1,21E+11	1,03E+14	6,43E+12	1,89E+12	4,78E+8
	SG1	1,12E+9	1,12E+11	3,94E+13	7,74E+12	6,41E+12	1,45E+9
	SG2	3,34E+8	1,32E+11	1,04E+14	6,31E+12	1,90E+11	3,07E+8
201,25	PbBi	7,55E+1	7,11E+5	8,42E+12	1,27E+12	1,12E+11	3,09E+8
	Shld	1,32E+3	5,89E+4	2,15E+7	1,18E+5	2,37E+3	2,42E+2
	Pump	2,11E+1	7,12E+3	7,20E+11	7,37E+10	2,31E+9	1,76E+7
	SG1	1,99E+4	2,39E+5	1,31E+7	3,96E+6	6,34E+6	3,19E+3
	SG2	8,19E+4	6,27E+7	9,53E+12	9,15E+11	2,90E+10	2,27E+8
221,25	PbBi	1,84E+0	5,60E+3	2,68E+11	8,40E+11	1,41E+12	2,59E+9
	Shld	2,51E+2	9,42E+3	2,01E+6	4,63E+3	7,89E+6	1,41E+4
	Pump	5,22E-1	6,08E+1	3,76E+10	9,93E+9	1,75E+11	3,10E+8
	SG1	4,53E+2	2,90E+3	9,11E+5	2,40E+5	4,39E+6	8,32E+3
	SG2	2,04E+3	3,85E+5	5,02E+11	1,32E+11	2,34E+12	2,69E+9

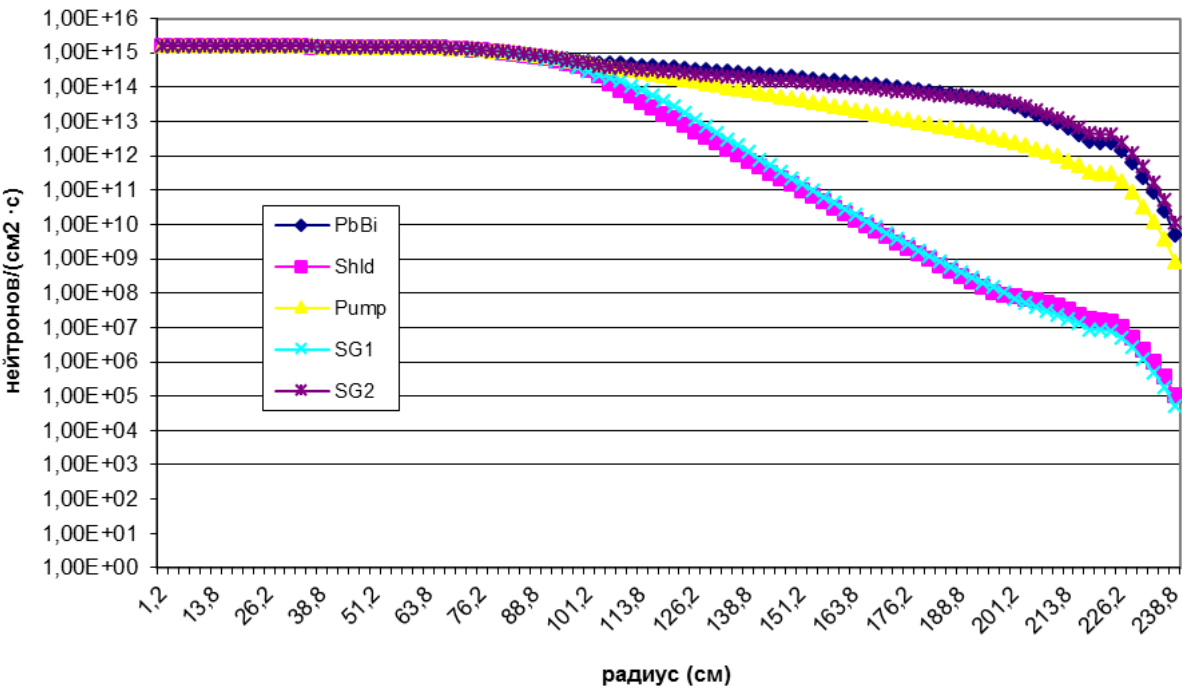


Рис. 4. Полный поток нейтронов в 1D-rad задаче

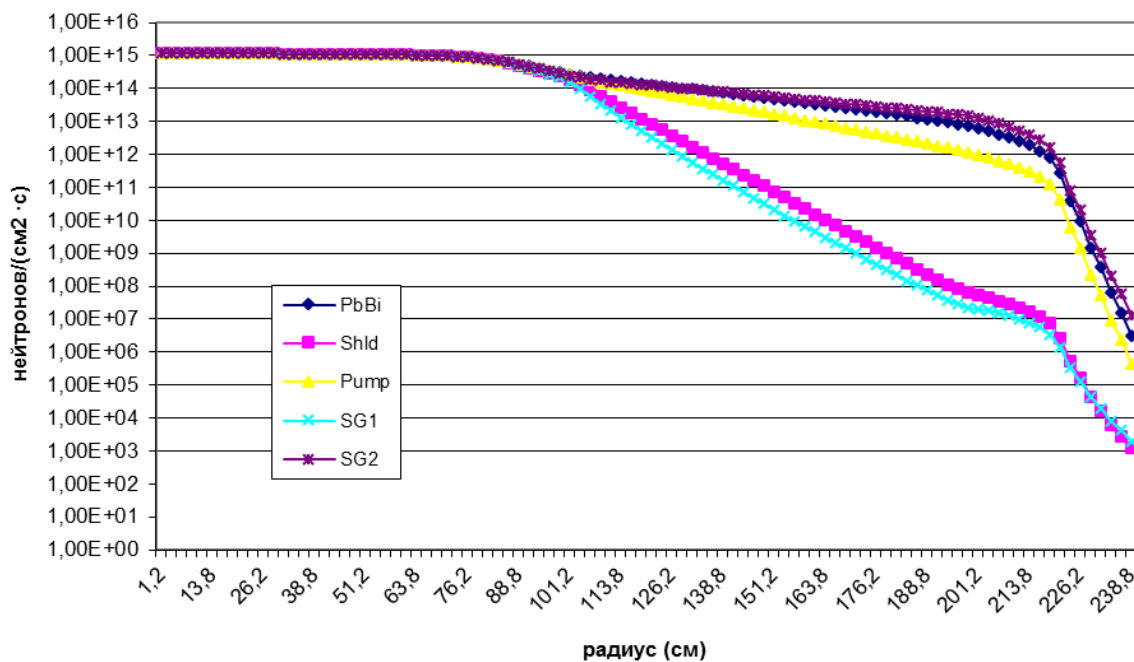


Рис. 5. Поток быстрых нейтронов в задаче 1D-rad

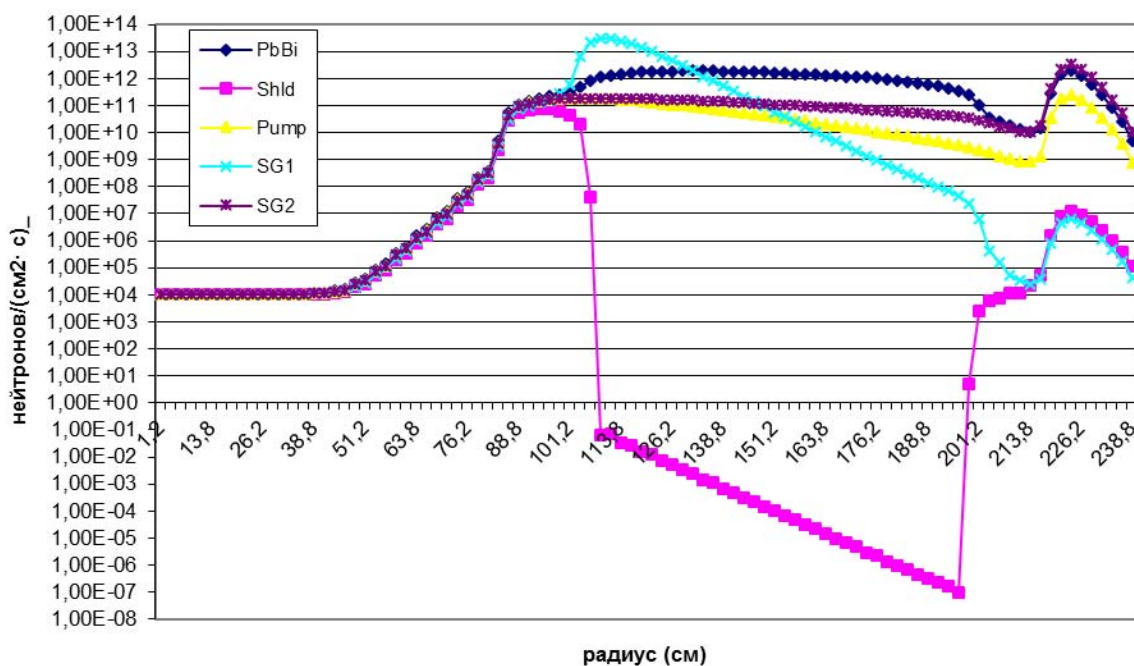


Рис. 6. Поток тепловых нейтронов в задаче 1D-rad

2.3 Результаты расчётов двумерных тестовых задач BP-2D-1 и BP-2D-2

В настоящем разделе основным предметом анализа является азимутальная неравномерность полей излучения на внешней поверхности корпуса, обусловленная разным ослаблением при прохождении излучения через смеси материалов Shld, Pump, PbBi, SG1, SG2, моделирующих соответственно защиту, насос, теплоноситель в камере насоса, парогенератор с водой и парогенератор без воды. Геометрия задачи представлена на рисунке 7. Направление на насос соответствует на этом рисунке нижней границе (0 градусов), а направлению на парогенератор — верхней границе сектора симметрии (30 градусов).

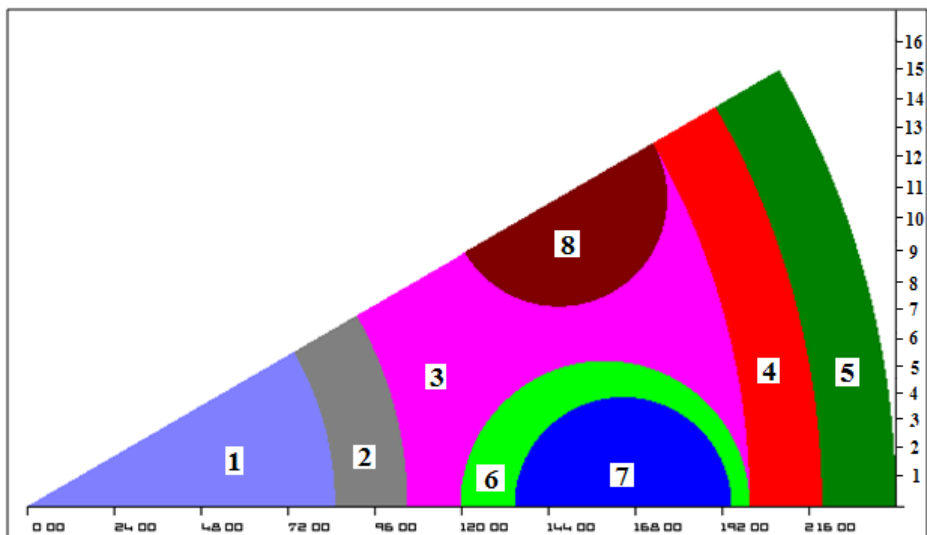


Рис. 7. Геометрия двумерной расчётной модели

Расчёты тестовых задач BP-2D-1 и BP-2D-2 по программе MCCG3D с использованием опции двумерной геометрии проводились с теми же параметрами, что и при сравнении MCCG3D и ONEDANT в разделе 2.1. Использовалась пространственная сетка M2, соответствующая примерно шагу в радиальном направлении около 2,5 см и угловая сетка с 4 азимутальными углами на сектор симметрии 30 градусов (то есть всего 48 азимутальных углов в плоскости) и 16 полярными углами.

На рисунках 8, 9 представлены полные потоки нейтронов **Ftot**, потоки быстрых нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ **Ffast**, потоки тепловых нейтронов **Therm** и полные потоки гамма-квантов **Fg**. На рисунке 8 (ПГ с водой) во всех случаях для интегральных по энергии потоков частиц наблюдается повышение в направлении на насос. В случае осушения ПГ (рис. 9) наряду с общим повышением уровней потоков частиц меняется и форма кривых, появляются два пика с провалом между ними.

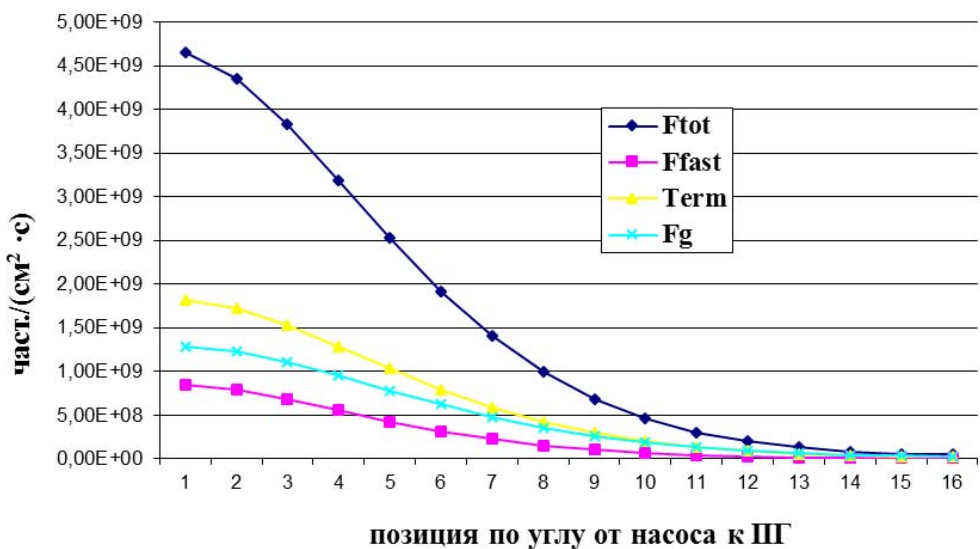


Рис. 8. Потоки частиц на поверхности корпуса в задаче 2D-1 (ПГ с водой)

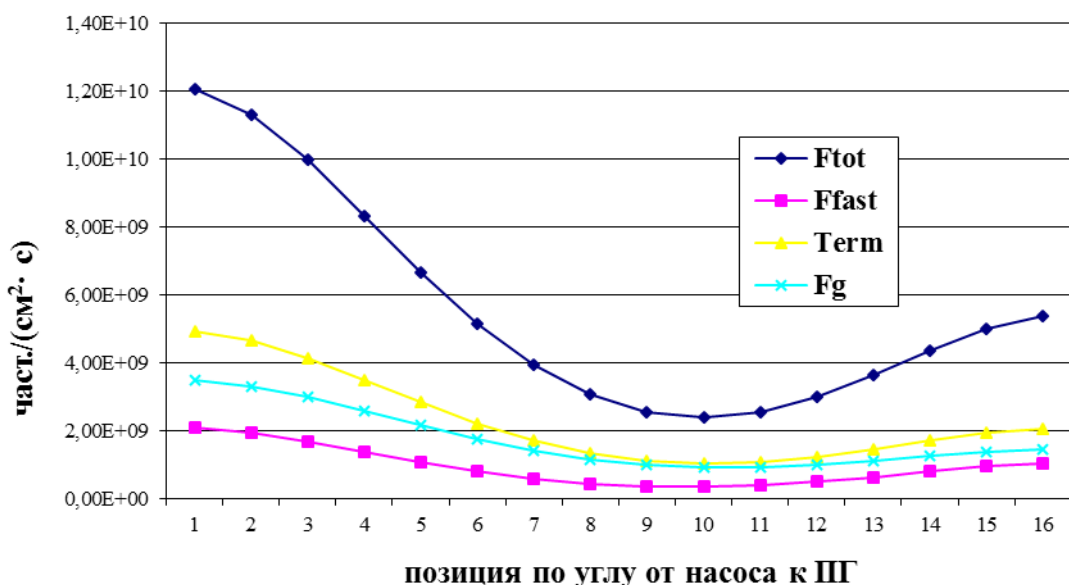


Рис. 9. Потоки частиц на поверхности корпуса в задаче 2D-2 (ПГ без воды)

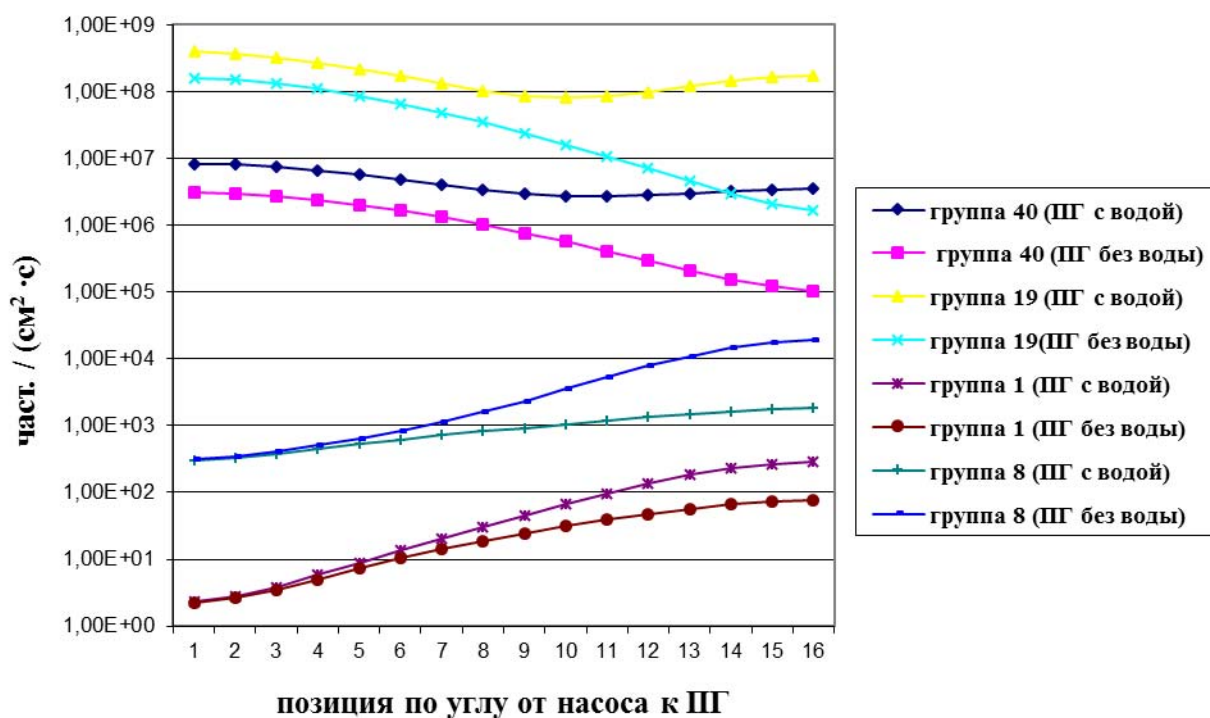


Рис. 10. Групповые потоки частиц на поверхности корпуса

На рисунке 10 представлено поведение групповых потоков частиц в двумерных моделях с водой и без воды.

В отличие от интегральных по энергии величин групповые потоки частиц имеют более сложное поведение. В наиболее быстрых группах пик приходится на направление ПГ, увеличивающийся при осушении ПГ. Однако вклад самых верхних групп в поток с энергией выше 0,1 МэВ невелик и поэтому не сказывается на их распределении.

3 Результаты трёхмерных расчётов

Расчёты трёхмерных тестовых задач ВР-1 и ВР-2 по программе MCCG3D проводились с использованием в плоскости нерегулярной пространственной сетки M1, соответствующей примерно шагу в радиальном направлении около 5 см и регулярного разбиения в направлении оси Z с шагом порядка 5 см. Общее число пространственных ячеек в расчёте – $331 \times 120 = 39720$. Угловая сетка использовалась та же, что и в двумерных расчётах: с 4 азимутальными углами на сектор симметрии 30 градусов (то есть всего 48 азимутальных углов в плоскости) и 16 полярными углами. Шаг трекинга — 1 см.

На рисунках 11–15 представлены основные характеристики радиационных полей в 3D задачах и влияние на них осушения парогенератора. На рисунке 11 представлены полные потоки нейтронов **Ftot**, потоки быстрых нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ **Ffast**, полные потоки гамма-квантов **Fg** и аналогичные величины для ПГ без воды **FtotNoW**, **FfastNoW**, **FgNoW** вдоль центральной оси реактора. Осушение ПГ приводит к повышению соответствующих потоков в 1,5-2 раза.

На рисунке 12 представлена азимутальная зависимость потока тепловых нейтронов **Therm** и соответствующего потока нейтронов для ПГ без воды **ThermNoW** на поверхности корпуса в горизонтальной плоскости, проходящей через центр активной зоны. В целом распределение тепловых нейтронов хорошо согласуется с соответствующим распределением в двумерных задачах. Подтверждается наличие сильной азимутальной зависимости с пиком в направлении на насос в базовом состоянии и двумя пиками в состоянии ПГ без воды.

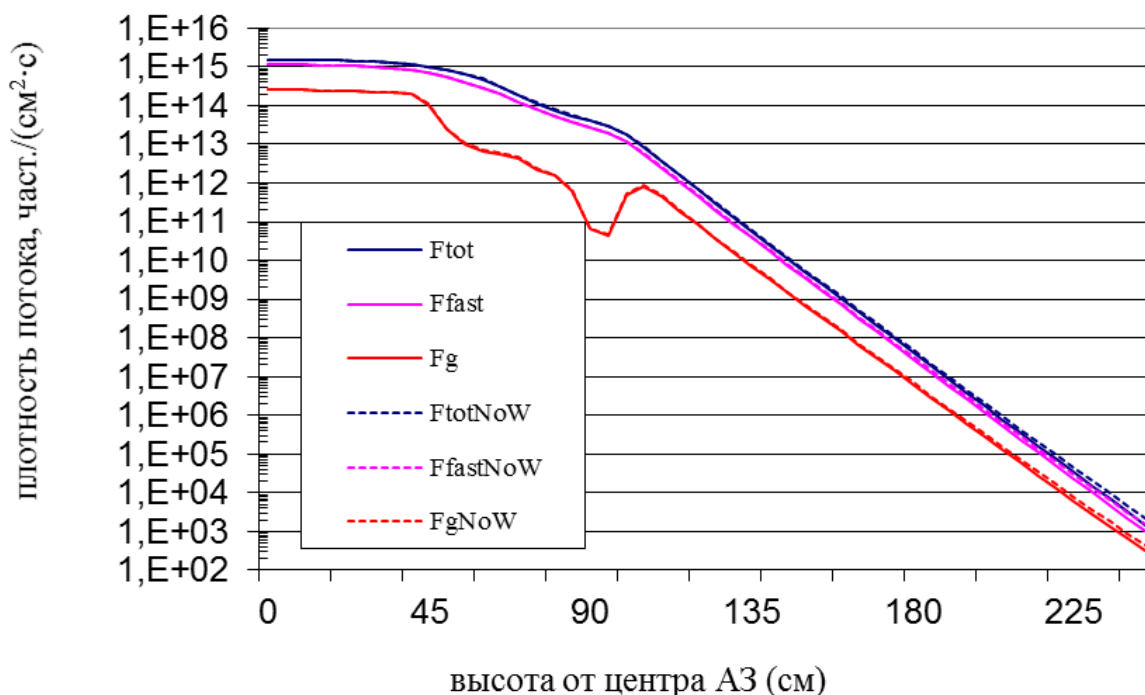


Рис. 11. Плотность потока частиц вдоль центральной оси реактора

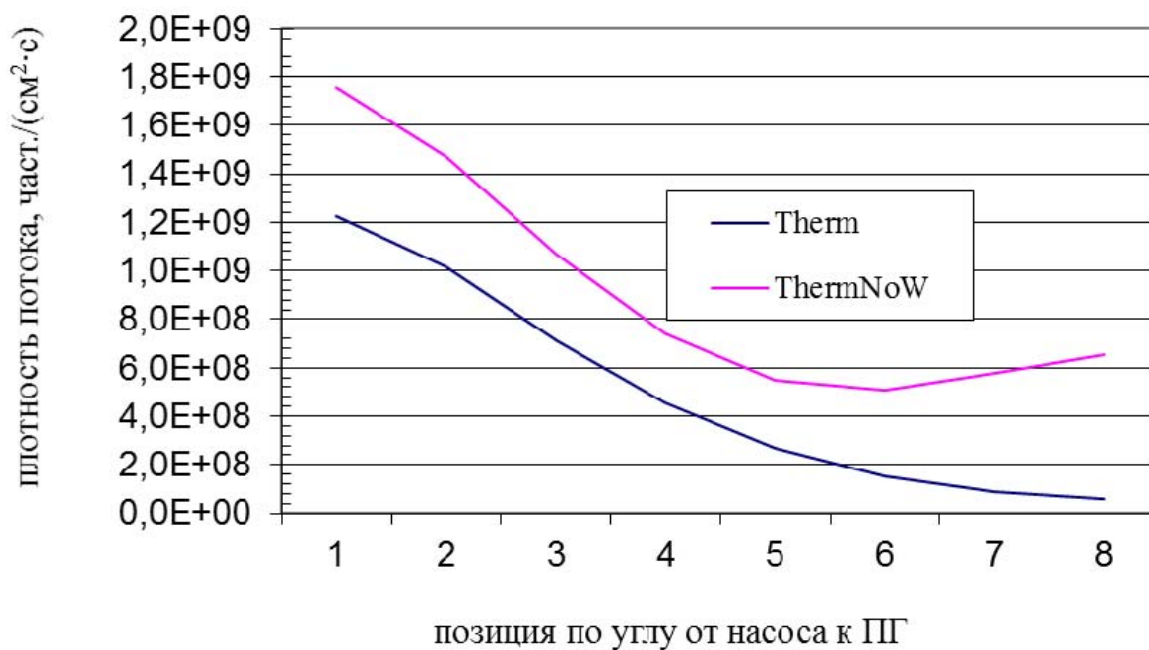


Рис. 12. Плотность потока частиц вдоль центральной оси реактора

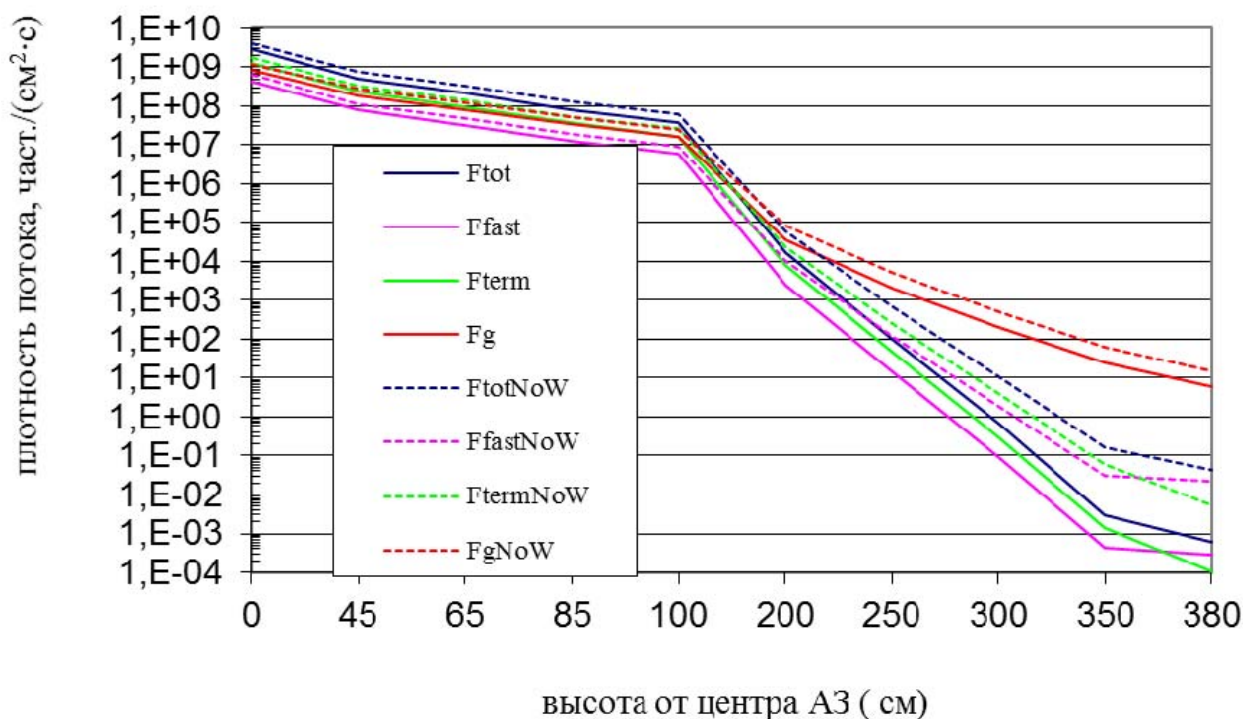


Рис. 13. Плотность потока частиц за насосом

На рисунках 13 и 14 представлены аксиальные распределения потоков по высоте вверх на поверхности корпуса соответственно за насосом и за парогенератором. Чётко прослеживается повышение потоков при осушении ПГ, более резко выраженное в положении «за ПГ» (рис. 14) — до 3-4 порядков, и для позиции «за насосом» — 1-2 порядка.

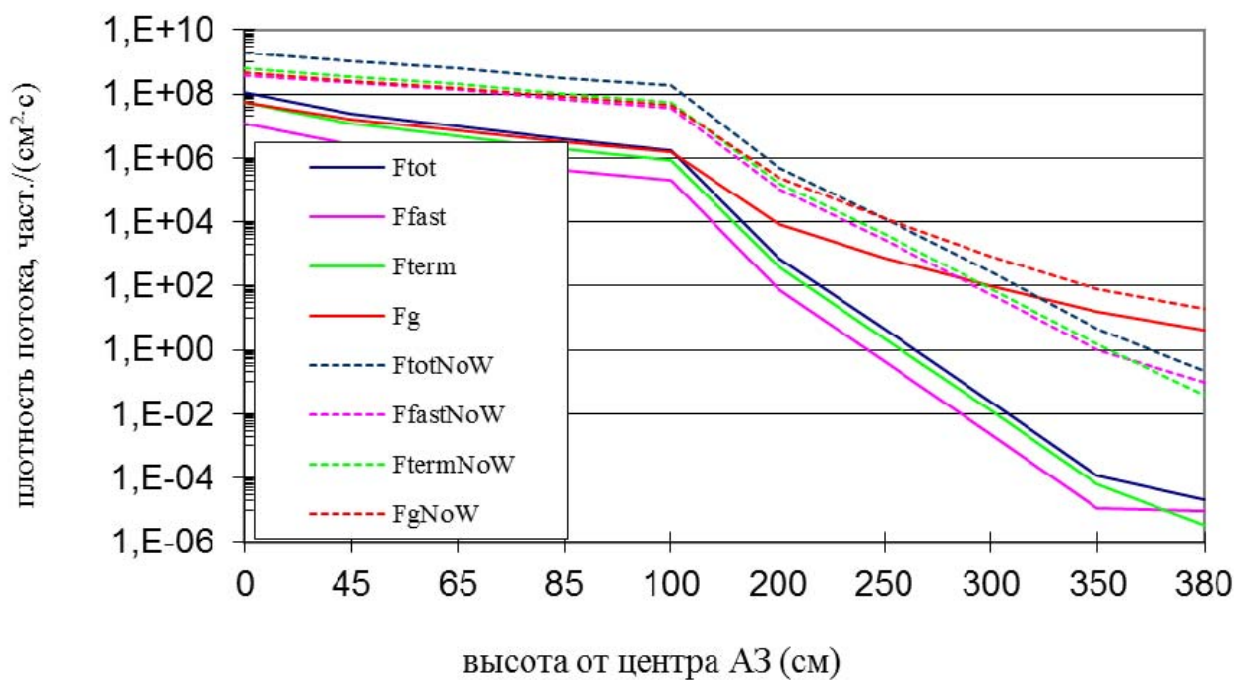


Рис. 14. Плотность потока частиц за парогенератором

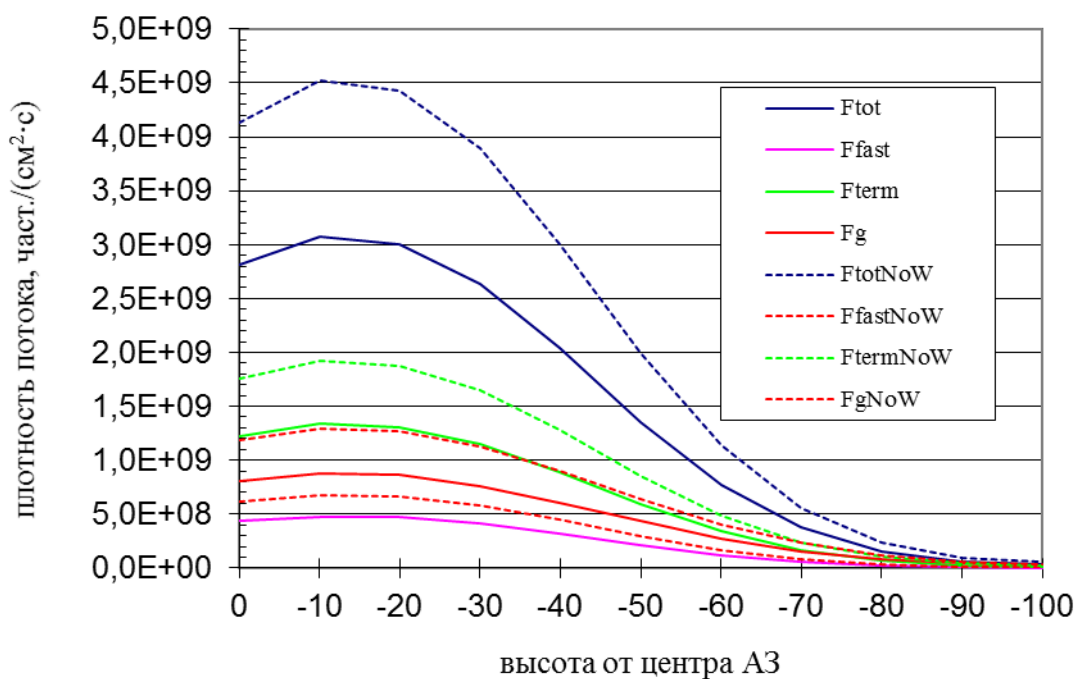


Рис. 15. Плотность потока частиц на корпусе по направлению вниз

На рисунке 15 представлено аксиальное распределение потоков вниз от центра АЗ. Отметим, что сдвиг максимума на 10-15 см вниз связан с расположением камеры насоса, выступающей в роли нейтронотода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана модель полномасштабной защиты реактора с ТЖМТ в трехмерной нерегулярной геометрии с детальным описанием насосов и парогенераторов. Приведены полученные по программе MCCG3D распределения нейтронных и гамма потоков частиц для парогенераторов с водой и без воды, профили неравномерности потоков тепловых нейтронов по углу от направления на насос к направлению на парогенератор на внешней поверхности реактора. Получена анизотропия потоков частиц с острым пиком в направлении на насос.

Список литературы

1. Briesmeister J.F. MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version4B, LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, March, 1997.
2. Suslov I.R. MCCG3D – 3D Discrete Ordinates Transport Code for Unstructured Grid/ State of Art and Future Development / Сборник трудов семинара «Нейтроника-96». — Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1996. — С. 162.
3. АЭС на основе реакторных модулей с СВБР-75/100 / Зродников А.В., Читайкин В.И., Тошинский Г.И. и др. // Атомная энергия. — 1991. — Том 91, вып. 6. — С. 415.
4. RSICC COMPUTER CODE COLLECTION. TWODANT-SYS. One- and Two-Dimensional, Multigroup, Discrete-Ordinates Transport Code System. ORNL / CC-547. November 1992.

Подписано к печати 16.01.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,8. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 35 экз. Заказ № 1.

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского».