

ИННОВАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ПРОГРАММ РАСЧЕТОВ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРОВ РБМК-1000 ГРУППОВЫМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО НА ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРАХ

Иванов И.Е. Бычков С.А., Грушин Н.А., Варфоломеева В.А., Дружинин В.Е.
(АО «ВНИИАЭС», Москва, Россия)

Постановка задачи

Традиционно подходы расчетов НФХ, основанные на малогрупповых квазигетерогенных расчетах, практически исчерпали возможности повышения точности расчетов НФХ. В практике эксплуатационных расчетов начинают активно использоваться методы «прецизионных» расчетов с детальным описанием геометрии и материального состава реакторов в различных состояниях. Для таких расчетов, как правило, используется метод Монте-Карло. Примером является семейство расчетных кодов MSU, адаптированных и верифицированных для проведения расчетов реакторов разного типа и хранилищ ядерного топлива. Основной недостаток универсальных расчетных кодов – высокие требования к вычислительным ресурсам, связанные с использованием дорогостоящих вычислительных кластеров и, как следствие этого, значительные затраты времени для проведения одного расчета (от десятков часов до нескольких суток).

Перспективным направлением развития расчетов НФХ является создание современных расчетных кодов повышенной точности, использующих для описания переноса нейтронов метод Монте-Карло с проведением параллельных вычислений на графических процессорах. Такие коды позволяют сочетать гибкое и детальное описание геометрии и материального состава рассчитываемых систем, снизить в 30 – 100 раз время проведения расчетов без снижения статистической погрешности, существенно повысить эффективность использования имеющегося компьютерного оборудования (при малых материальных затратах) и внедрить в расчетную поддержку эксплуатации АЭС коды нового поколения, позволяющие детально описывать перенос нейтронов в активной зоне реактора.

Описание программы MNT-CUDA

Программа для ЭВМ MNT-CUDA предназначена для проведения инженерных, проектных и эксплуатационных расчетов нейтронно-физических характеристик энергоблоков с реакторами РБМК-1000 с целью расчетного сопровождения их эксплуатации, обоснования безопасности при проведении ремонтных работ и в период вывода реактора из эксплуатации. Программа «MNT-CUDA» позволяет рассчитывать НФХ активных зон РБМК-1000 в рабочих, разогретых и расхолаженных состояниях со стационарным или квазистационарным отравлением (включая разотравленное состояние). Существенной особенностью программы является то, что расчетное сопровождение эксплуатации опирается на детальный по геометрии и материальному составу многогрупповой расчет реактора, выполненный методом Монте-Карло. При этом приемлемое для инженерных задач быстродействие достигается за счет использования параллельных вычислений на графических процессорах с использованием технологии Nvidia CUDA.

История развития

Первый прототип – «MNT-CUDA» (номер свидетельства о регистрации 2014660470 от 03.06.2014) был разработан для анализа погрешностей диффузионного приближения за счет уточнения методик переноса нейтронов (метод Монте-Карло) и

оценки статистических ошибок при расчете больших реакторов. Последняя задача важна при внедрении в практику полномасштабных эксплуатационных расчетов прецизионных кодов типа MCU. Программа «MNTaCUDA» ориентированная на графические процессоры (GPU), позволила проводить полномасштабные расчеты реакторов методом Монте-Карло в сотни раз быстрее, чем по MCU, со значительно большей статистикой (до десятков миллиардов) и пакетом нейтронов в несколько сотен тысяч частиц. Для первой версии программы была разработана оригинальная методика восстановления полей нейтронов на показания внутриреакторных датчиков (ВРД). При ее верификации впервые использовалась большая серия специализированных прецизионных тестов полномасштабных загрузок РБМК-1000, в которых регистрировались двухгрупповые константы всех нод реактора, нейтронные поля и другие функционалы. Такой подход позволил оценить ошибки двухгруппового квазигомогенного приближения и отделить их от методических ошибок, связанных с подготовкой библиотек констант. Было показано, что из-за приближенного описания перетечек между нодами малогрупповое квазигомогенное моделирование не позволяет точно воспроизвести прецизионные тесты.

Вторая версия программы (номер свидетельства о регистрации 2021614214 от 19.03.2021 г.) включала в себя возможность детального описания переноса нейтронов во фрагментах активной зоны, непосредственно опираясь на многогрупповые константы конструкционных материалов (топливо, оболочки, стержни, вода и т.п.). Были расширены функциональные возможности первой версии кода в контексте круга решаемых задач. Расширен круг регистрируемых функционалов, добавлены методики расчета изменения изотопного состава и т.п. Метод Монте-Карло позволил достаточно просто согласовать детальные (многогрупповые) и квазигомогенные (двухгрупповые) модели переноса нейтронов. Более того, вторая версия программы позволяла проводить полномасштабные детальные расчеты активной зоны, интерпретируя ее как большой фрагмент. Таким образом, занимая промежуточное положение между прецизионными и инженерными квазигомогенными кодами, авторы считают возможным отнести ее к инженерным программам повышенной точности.

Оценки быстродействия

Существенной особенностью программы является ее ориентированность на современные вычислительные платформы и в частности, на использование параллельных вычислений на графических процессорах. При использовании современной видеокарты RTX 3080Ti на персональной ЭВМ программа обеспечивает скорость счета от 0,2 до 2,0 миллиардов историй нейтронов в минуту (в зависимости от числа групп и сложности рассчитываемой системы). Это позволяет решать задачи расчетного сопровождения эксплуатации на АЭС методом Монте-Карло без необходимости в дорогостоящих суперкомпьютерах. Программа также позволяет использовать традиционные многоядерные (центральные) процессоры с помощью технологий OpenMP (на одной ЭВМ) и TCP/IP (для сетевого обмена между нодами), однако в этом случае быстродействие снижается в 10–60 раз при аналогичной стоимости оборудования. Однако даже в этом случае программа проводит расчеты существенно (более чем на порядок) быстрее, чем прецизионные программы, реализующие метод Монте-Карло, такие как MCU, MCNP, Serpent, OpenMC и др.

Статус верификации и аттестации ПК

Первая версия программы, ориентированная на малогрупповой квазигомогенный расчет активных зон РБМК была аттестована в 2018 г. для расчета всех основных НФХ активных зон РБМК-1000 Курской, Ленинградской и Смоленской АЭС. При этом впервые программа нейтронно-физического расчета активной зоны была аттестована с малогрупповой библиотекой макросечений ячеек, аппроксимированной с помощью

нейронных сетей. Также большое внимание при верификации ПК было уделено сравнению с прецизионными тестами в дополнение к сравнению с результатами измерений. Это позволило существенно расширить круг функционалов, на анализе сравнения которых верифицируется программа и обоснованно отнести ее к классу программ повышенной точности (в смысле лучшего воспроизведения физических процессов и, соответственно, лучшего воспроизведения прецизионных тестов).

Версия программы MNT-CUDA 2.0 была аттестована в 2021 г. В ней в дополнение к малогрупповой модели расчета реактора РБМК была аттестована многогрупповая (65 групп) детальная потвзльная модель расчета фрагментов реактора и реактора в целом. Многогрупповые макросечения материалов в ней подготавливались с помощью программы MCU на расчетах ячеек и модельных систем с источником. В таблицах 1–3 приведена часть данных о величинах погрешностей, приведенных в паспорте на программу MNT-CUDA 2.0.

В настоящее время также разработана, верифицирована и подготовлена к проведению аттестации версия программы MNT-CUDA 2.1, отличающаяся обновленной библиотекой топливных констант, которая учитывает регенерированное топливо с повышенным содержанием четных изотопов урана.

Используемы в ПК уникальные методики

Методика восстановления на показания ВРД

Известно, что расчет полей нейтронов с приемлемой точностью в «физически больших» реакторах типа РБМК невозможен без привлечения информации от внутриреакторных датчиков (ВРД). Неопределенность исходных данных приводит к заметному отклонению расчетного распределения энерговыделения от показаний ВРД (10–50%). В режиме восстановления РЭ в рабочем состоянии реактора используются сигналы ВРД, обработка которых проводится по методике программы ПРИЗМА-М штатной системы контроля. По этим данным восстанавливается объемное распределение энерговыделения и проводится коррекция макросечений с целью повышения точности прогнозных расчетов.

Метод восстановления заключается в решении экстремальной задачи на минимум функционала, являющегося суммой квадратичных норм вектора дисбаланса нейтронов в узлах расчетной сетки и вектора невязки между сигналами датчиков и результатами расчета по программе MNT-CUDA, преобразованным к одинаковым физическим величинам – мощностям ТВС или относительным значениям нейтронного потока в местах расположения датчиков.

Таблица 1

Погрешности результатов расчетов НФХ РУ с РБМК-1000 в стационарных состояниях на энергетических уровнях мощности РУ

Характеристика и ее размерность	Систематическая погрешность расчета (там, где есть)/ Среднеквадратичная погрешность	
	Квазигомогенная модель (CNET)	Детальная модель (C65)
Коэффициент размножения нейтронов критического реактора ($K_{эф}$) ¹⁾	–0,17 % 0,11 %	–0,28 % 0,11 %
Эффект реактивности при обезвоживании КМПЦ ²⁾ , $\beta_{эф}$	0,21 $\beta_{эф}$	0,21 $\beta_{эф}$
Эффект реактивности при обезвоживании КО СУЗ ²⁾ , $\beta_{эф}$	0,25 $\beta_{эф}$	0,25 $\beta_{эф}$
Оперативный запас реактивности ²⁾ , $\beta_{эф}$	2,7 % 1,8 %	2,2 % 1,8 %
Эффективность системы БСМ (СУЗ) ^{1),2)} , $\beta_{эф}$	4,4 %	4,4 %
Эффективность АЗ ^{1),2)} , $\beta_{эф}$	10,2 %	10,2 %
Коэффициент реактивности по температуре топлива ²⁾ , $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	0,48 $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C} \cdot 10^{-3}$	0,60 $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C} \cdot 10^{-3}$
Коэффициент реактивности по температуре графита ^{1),2)} , $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	15,5 %	12,8 %
Быстрый мощностной коэффициент реактивности ^{1),2)} , $\beta_{эф}/\text{МВт}$	0,96 $\beta_{эф}/\text{МВт} \cdot 10^{-4}$	0,46 $\beta_{эф}/\text{МВт} \cdot 10^{-4}$
Паровой коэффициент реактивности ^{1),2)} , $\beta_{эф}$	0,24 $\beta_{эф}$	0,24 $\beta_{эф}$
¹⁾ Значение погрешности получено путем сопоставления с результатами измерений		
²⁾ Значение погрешности получено путем сопоставления с результатами прецизионных расчетов		

Таблица 2

**Погрешности результатов расчетов по программе для ЭВМ НФХ РУ с РБМК-1000
на физических уровнях мощности**

Характеристика и ее размерность	Систематическая погрешность расчета (там, где есть)/ Среднеквадратичная погрешность	
	Квазигомогенная модель (CNET)	Детальная модель (С65)
Коэффициент размножения нейтронов критического реактора: ¹⁾		
– холодный		
– разогретый		
– Обезв. КОСУЗ	0,28 %	0,28 %
– Обезв. КМПЦ	0,23 % 0,18 %	0,61 % 0,13 %
Эффект реактивности при обезвоживании/заливе КМПЦ в критическом состоянии ¹⁾ , $\beta_{эф}$	0,33 $\beta_{эф}$ 0,17 $\beta_{эф}$	1,10 $\beta_{эф}$ 0,25 $\beta_{эф}$
Эффект реактивности при обезвоживании КМПЦ в подкритическом состоянии ¹⁾ , $\beta_{эф}$	0,32 $\beta_{эф}$ 0,12 $\beta_{эф}$	0,31 $\beta_{эф}$ 0,15 $\beta_{эф}$
Эффект реактивности при обезвоживании КО СУЗ в критическом и подкритическом состояниях ¹⁾ , $\beta_{эф}$	0,20 $\beta_{эф}$	0,20 $\beta_{эф}$
Изотермический коэффициент реактивности ¹⁾ , $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	0,26 $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C} \cdot 10^{-2}$	0,26 $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C} \cdot 10^{-2}$
Эффективность системы БСМ (СУЗ), подкритичность ¹⁾ , $\beta_{эф}$	6,72 %	7,84 %
Эффективность АЗ ¹⁾ , $\beta_{эф}$	-3,07 % 5,43 %	-6,84 % 4,61 %
Эффективность АЗ+БСМ ^{1),2)} , $\beta_{эф}$	4,47 % 2,74 %	2,00 %
¹⁾ Значение погрешности получено путем сопоставления с результатами измерений		
²⁾ Значение погрешности получено путем сопоставления с результатами прецизионных расчетов		

Таблица 3

**Погрешности результатов полей РУ с РБМК-1000 в стационарных состояниях на
энергетических уровнях мощности и на физических уровнях мощности РУ**

Характеристика и ее размерность	Среднеквадратичная погрешность На ЭУМ / на ФУМ	
	Квазигомогенная модель расчета, библиотека CNET	Детальная модель расчета, библиотека С65
Двумерное поканальное распределение энерговыведения ¹⁾ , МВт	6,0 % 6,0 %	6,2 % 6,2 %
Коэффициент радиальной неравномерности энерговыведения ¹⁾	4,5 % 4,5 %	3,4 % 4,5 %
Коэффициент высотной неравномерности энерговыведения в топливном канале ¹⁾	5,1 % 4,7 %	7,0 % 5,8 %
Относительное высотное распределение плотности потока тепловых нейтронов в топливных каналах ¹⁾	6,7 % 6,0 %	7,6 % 8,1 %

Характеристика и ее размерность	Среднеквадратичная погрешность На ЭУМ / на ФУМ	
	Квазигомогенная модель расчета, библиотека CNET	Детальная модель расчета, библиотека C65
Трехмерное распределение энерговыведения в активной зоне ^{1), 2)} МВт	9,0 % 6,3 %	9,8 % 12,2 %
¹⁾ Значение погрешности получено путем сопоставления с результатами измерений		
²⁾ Значение погрешности получено путем сопоставления с результатами прецизионных расчетов		

При решении задачи расчета малых поправок к сечениям в методе Монте-Карло (поправки к сечениям генерации не превышают 1%) возникает проблема набора необходимой статистики расчета поправок. Была разработана методика параллельных совмещенных итераций, позволяющая находить поправки к сечениям генерации суммарно по поколениям. Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 1.

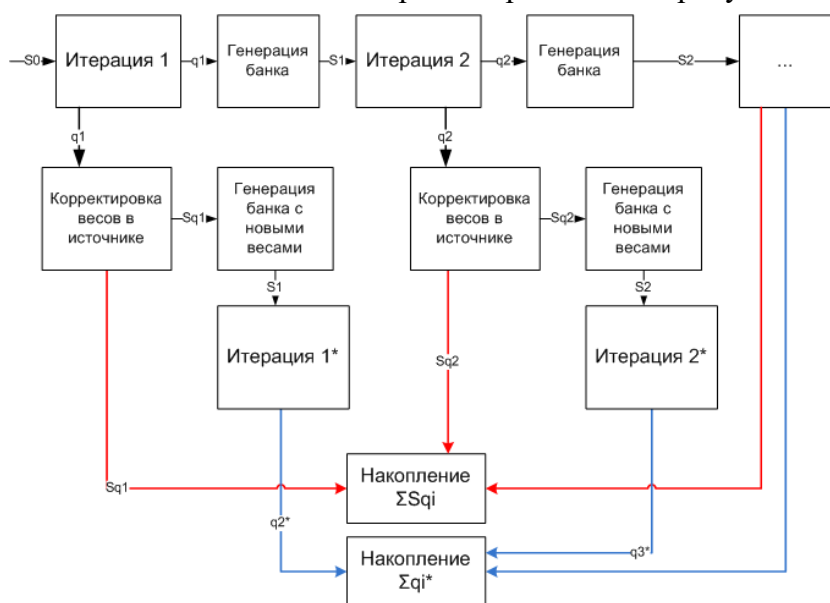


Рис. 1. Блок-схема алгоритма корректировки параметров прецизионной расчетной модели

Альтернативным подходом, реализованным и используемым в ПК MNT-CUDA является корректировка энерговыводок, обеспечивающая соответствующие изменения размножающих свойств расчетных нод. В этом случае поправки к энерговыводкам рассчитываются в итерациях, на которых величины поправок к размножающим свойствам нод пересчитывается в возмущения к энерговыводкам на основе априорно заданной зависимости размножающих свойств ячейки от энерговыводки.

Методика аппроксимации сечений (CNET)

Малогрупповая многопараметрическая библиотека констант «CNET» подготовлена путем обобщения прецизионных расчетов, выполненных по коду MCURBMK, используя нейросетевые технологии. Эта библиотека позволяет учитывать зависимость малогрупповых констант от расширенного набора параметров ноды (характеристик самой ноды и ее окружения, а так же «исторической» плотности теплоносителя). Для формирования малогрупповой библиотеки констант «CNET» использовалась база данных прецизионных расчетов, включающая в себя несколько сотен расчетов полномасштабных загрузок РБМК (реальных и модельных состояний).

Для интерполяции констант используется активационная нейронная сеть прямого распространения. Сеть имеет 4 слоя (входной слой, 2 скрытых слоя и выходной слой).

Для каждого типа ячеек используется своя нейронная сеть. Отдельные нейросети используются для интерполяции констант для энергетического уровня мощности (рабочие константы) и для физического уровня мощности (холодные и изотермически разогретые константы). Конфигурация использованной нейронной сети приведена в таблице 4.

Таблица 4

	Число нейронов в слое			
	Входной слой	Скрытый слой	Выходной слой	Выходной слой
Нейросеть для нод топлива	60	8	7	1
Нейросеть для нод НТК контура СУЗ	45	6	7	1
Нейросеть для нод НТК КМПЦ	57	6	7	1
Нейросеть для бокового отражателя	21	6	7	1
Нейросеть для торцевого отражателя	4	6	5	1

Язык описания геометрии и метод интерфейсных функций

В программе MNT-CUDA был разработан язык описания геометрии, реализованный в виде системы объектов и операций, надстроенных на языке программирования общего назначения C#. В нем геометрия задается в виде системы связанных фрагментов. Геометрия фрагментов описывается ор-графом связей геометрических зон поверхностями. При этом разные фрагменты могут иметь разную степень детализации, как по геометрии, так и по числу энергетических групп. Внешние связи фрагментов замыкаются посредством универсального языка интерфейсных функций, позволяющего пользователю описать произвольные граничные условия сшивки. Эти интерфейсные функции преобразуются в специализированный байткод и, затем, при моделировании переноса, эффективно выполняются конечным автоматом на графическом или обычном процессоре.

Пример представления геометрии фрагмента графом приведен на рисунке 2.

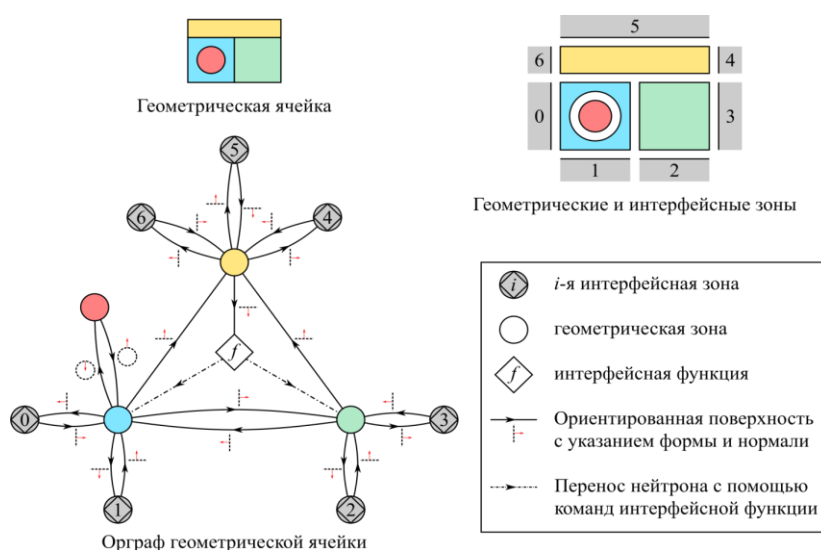


Рис. 2. Пример представления геометрии фрагмента ор-графом

Разработка новой универсальной версии ПК

В настоящее время в рамках НИОКР ведется работа над качественно новым универсальным программным комплексом на основе ПК MNT-CUDA. Новый имеет универсальную гибкую архитектуру и позволяет решать широкий класс инженерных задач для реакторов различного типа.

Походы к разработке архитектуры современного универсального инженерного ПК

При разработке ПК была проведена работа по определению требований к современному ПК, на основе которых формировались детальные требования к используемым языкам, технологиям и программным средствам. Можно выделить следующие общие требования к ПК:

- модульность – ПК должен состоять из множества разделенных по назначению модулей. Модули должны иметь понятный интерфейс программиста (API) для взаимодействия с другими модулями и быть заменяемыми;
- отчуждаемость ПК и/или его частей – весь ПК или его часть (в виде набора связанных модулей) должно быть возможно передать в другие организации как для эксплуатации, так и для модернизации под свои специфические нужды. Это требование напрямую связано с качеством разработки интерфейсов модулей и описания этих интерфейсов;
- простота модернизации – должна быть предусмотрена возможность как расширения возможностей программы путем разработки дополнительных модулей (при таком расширении важно, что базовые модули не должны затрагиваться), так и возможность расширения базовых возможностей ПК (подключение других библиотек констант, геометрических моделей, расчета на других программно-аппаратных платформах и т.д.). Потребность в модернизации ПК и расширении его области применения не должны приводить к необходимости разрабатывать все с начала. Следует учесть, что данное требование нельзя рассматривать как абсолютное, и отношение к нему должно быть взвешенным. Так, например, глупо от программы для расчета пуска ракеты требовать, чтобы ее можно было адаптировать к расчету пуска подводной торпеды. Возможности модернизации должны быть заложены на этапе проектирования архитектуры, но лишь в рамках экспертно оцененного перечня потенциальных задач и областей применения ПК;
- защищенность от угроз не поставки импортного ПО – использование языков программирования, компиляторов, сред разработки, операционных систем, сторонних библиотек должно осуществляться с учетом оценки риска полной потери возможности приобретать лицензии на иностранное программное обеспечение. Текущая ситуация в мире показывает, что зависимость вновь разрабатываемого ПК от использования закрытого коммерческого ПО недопустимо или допустимо в самых крайних случаях. Фактически, это требование означает, что, там, где это представляется возможным, следует использовать ПО с открытым исходным кодом, ПО, являющееся совместной международной разработкой (а не собственностью конкретных организаций, принадлежащих не дружественным странам) и, само собой, ПО не требующее приобретения лицензии правообладателя;
- использование наработанного опыта – ПК разрабатывается, опираясь на опыт созданной ранее программы для ЭВМ «MNT-CUDA». На ее разработку затрачено порядка 8 лет и, безусловно, при разработке нового ПК следует использовать имеющийся опыт и проверенную временем кодовую базу. Использование существующей кодовой базы может создать существенные ограничения на использование тех или иных технических решений, так как перенос старой кодовой базы тянет за собой частичный или полный перенос использованных технологий. Настоящий

пункт может входить в серьезное противоречие с перечисленными выше требованиями. Поэтому важно соблюсти компромисс между оптимальными современными подходами и созданными ранее и проверенными временем подходами, позволяющий получить наилучшее качество результата в сроки, предусмотренные НИОКР.

Концептуальная блок-схема ПК приведена на рисунке 3.



Рис. 3. Концептуальная блок-схема ПК.

Конкретная реализация расчетов на ЭВМ очень сложна: необходимо правильно задать последовательность и правила использования аппаратных и программных средств конкретной ЭВМ с конкретной ОС. Она опирается на такие сущности как арифметико-логические устройства (АЛУ), регистры, ячейки памяти и т.п. Высокоуровневые языки абстрагируют реальную структуру ЭВМ и позволяют представлять решаемую задачу в терминах более абстрактных объектов: переменная, процедура, структура, класс, метод класса и т.п. При разработке нового ПК представляется целесообразным представить, что ЭВМ имеет некоторый программно-аппаратный модуль, предназначенный для моделирования переноса нейтронов – нейронный движок. Нейронный движок реализует процедуру, принимающую входные данные для расчета реактора (нейтронные сечения, геометрию, распределение источников и параметры расчета) и возвращающую результат расчета (результаты регистрации, коэффициент размножения и т.д.). При этом входные данные передаются в процедуру, а результаты возвращаются из процедуры в низкоуровневом представлении линейных массивов данных, чтобы эффективно обращаться к ним во время расчетов. Нейронный движок абстрагирует аппаратную реализацию расчета реактора (решение уравнения переноса) по методу Монте-Карло и особенности платформы (в частности, ОС). В ПК разработано несколько нейронных движков. Например, *mnt-cuda.cpu.dll* производит расчет на многоядерном центральном процессоре под управлением ОС Windows с использованием технологии распараллеливания OpenMP и языка C++, *mnt-cuda.gpu.dll* производит расчет на многоядерном графическом ускорителе, поддерживающем технологию NVIDIA CUDA.

Ядро ПК переводит высокоуровневое абстрактное представление входных данных в низкоуровневое, вызывает расчетную процедуру нейронного движка для проведения расчетов и переводит низкоуровневое представление результатов расчетов в высокоуровневое для дальнейшей обработки. Ядро ПК абстрагирует понятие расчета реактора, его входных данных (геометрии, нейтронных сечений, источников) и результатов, а также предоставляет базовые методы подготовки входных данных и обработки результатов. При этом ядро ПК работает как чистая функция, т.е. результаты расчета определяются только входными данными и работой внутренних генераторов случайных чисел.

ПК работает в приближении констант материалов. В сборке MicroLibrary введены понятия изотопного состава и материала, включающего изотопный состав и температуру. В сборке Burnup введены понятие изотопа и понятия, связанные с взаимным превращением изотопов, для решения задач на выгорание и других задач по отслеживанию изменений изотопного состава.

В сборке Монитор введено понятие состояния расчета, и реализован интерпретатор языка команд командного интерфейса ПК, изменяющих это состояние. Состояние расчета содержит не только входные данные и результаты расчета, но и может содержать произвольную дополнительную информацию, которая будет доступна последующим командам. Команды командного интерфейса ПК записываются во входном файле Монитора, который является входным файлом ПК. Командный и программный интерфейсы ПК будут подробнее описаны ниже.

Проблемно-ориентированные модули абстрагируют отдельные категории объектов расчета, такие, как РБМК, ВВЭР и др., и их характеристики, расширяя программный и командный интерфейсы ПК. В процессе подготовки входных данных для расчетов проблемно-ориентированные модули могут использовать модули первичной подготовки констант, которые реализуют интерфейс для подключения специализированных библиотек констант, подготовленных с использованием программы MCU или аналогов, а также библиотек общего назначения (например, CONSYST).

Скрипты позволяют пользователю расширять программный и командный интерфейсы ПК, вводя новые абстракции с помощью языка C#. При этом компиляция скриптов не требует установки внешних средств разработки приложений на C# и производится с помощью специальной команды Монитора.

Концептуальная блок-схема существующих и планируемых проблемно-ориентированных модулей ПК представлена на рисунке 4.

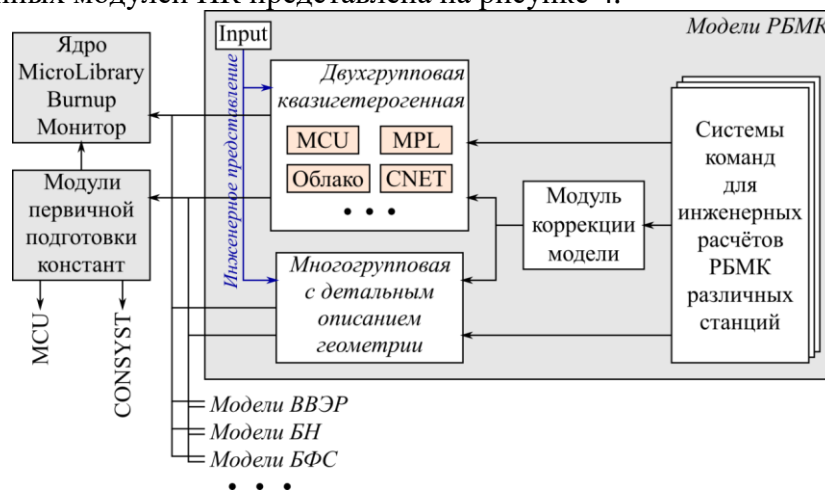


Рис. 4. Концептуальная блок-схема дерева проблемно-ориентированных модулей ПК

Апробация нового ПК на БФС и уран-водных системах

В рамках первичной верификации разрабатываемого нового ПК была проведена его апробация на расчетах уран-водных и быстрых систем. Апробация на расчетах уран-водных систем проводилась на бесконечных шестигранных решетках, содержащих зону воды, топлива и оболочки. При этом были рассмотрены 54 варианта с вариацией шага решетки, плотности воды, обогащения топлива, и с различным составом топлива (наличие Pu, Gd, В, Хе). Некоторые результаты апробации приведены на рисунке 5.

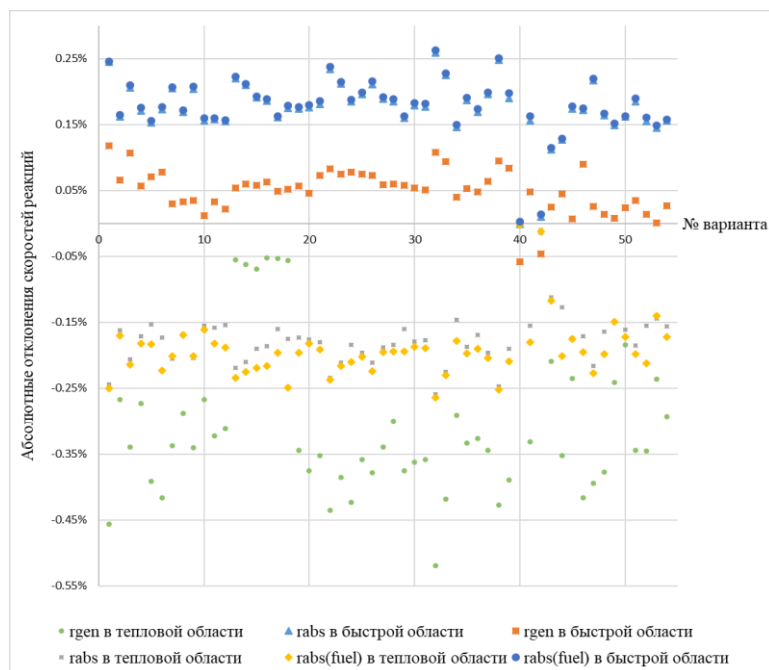


Рис. 5. Абсолютные отклонения скоростей реакций для рассчитанных вариантов водо-водяных ячеек от соответствующих значений, полученных по MCU-6

Апробация ПК для расчета быстрых систем осуществлялась на серии экспериментов на БФС, в которых моделировались бесконечные решетки. Пример рассчитываемой ячейки периодичности приведен на рисунке 6. Некоторые результаты расчетов приведены в таблице 5.

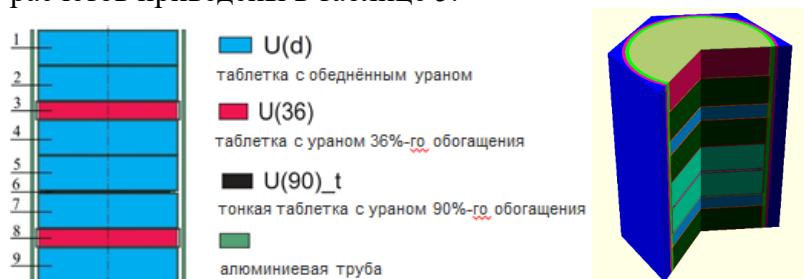


Рис. 6. Представление фрагмента БФС 35-2 в бенчмарке и результат его визуализации средствами MNT-CUDA с помощью OpenSCAD

Таблица 5

Абсолютные отклонения коэффициентов размножения, полученных по программам MCU-6, MNT-CUDA, MCNP, KENO от соответствующих значений бенчмарка

Ячейка	K_{∞} (бенчмарк)	ΔK_{∞} (MCU)	ΔK_{∞} (MNT-CUDA)	ΔK_{∞} (MCNP)	ΔK_{∞} (KENO)
БФС-31-4	1,0188	-0,44%	-0,48%	0,18%	-1,14%
БФС-31-5	0,9732	0,21%	0,15%	0,95%	-0,33%
БФС-33-1-1	0,9656	-0,01%	0,06%	0,27%	-0,97%
БФС-33-1-3	0,9602	0,43%	0,39%	0,65%	-0,66%
БФС-33-2-1	0,9967	0,30%	0,40%	0,58%	-0,72%
БФС-35-1	0,9730	0,34%	0,25%	1,48%	0,28%
БФС-35-2	1,0044	-0,08%	-0,15%	1,15%	-0,05%
БФС-35-3	0,9959	-0,02%	-0,08%	1,09%	-0,01%
БФС-38-1	0,9669	0,20%	0,19%	1,60%	0,30%
БФС-38-2	1,0276	-0,56%	-0,66%	0,91%	-0,41%
БФС-42	1,0153	-0,08%	-0,18%	0,78%	-0,29%

