

## СТАТУС КОДА RTS&T-2014

**И.И. Дегтярёв, Ф.Н. Новоскольцев, О.А. Ляшенко,**

**Е.В. Гулина, Л.В. Морозова**

**ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»**

**142281, Московская обл., г. Протвино, пл. Науки, 1**



Приводится обзор возможностей и алгоритмов современной версии комплекса RTS&T [1], разработанного для прецизионного статистического моделирования переноса многокомпонентного ( $\gamma$ ,  $e^\pm$ ,  $\mu$ ,  $N$ ,  $p^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $K_L^0$ ,  $\Sigma^{\pm 0}$ , антинуклоны, ионы и т.д. – всего 112 типов частиц и резонансов) излучения в пространственных системах произвольной степени сложности в широком диапазоне энергий в присутствии электромагнитных полей, а также расчета трансмутации изотопов. В ходе моделирования переноса учитываются все значимые процессы взаимодействия излучения с веществом. В области энергий нуклонов ниже верхних границ существующих оценок моделирование траекторий и дискретных взаимодействий основывается на прямом использовании информации файлов оцененных ядерных данных, представленных в формате ENDF-6, и не содержит дополнительных систематических ошибок, вносимых переработкой оригинальных оцененных данных в групповой или специализированный усеченный формат. В области энергий, превышающих верхнюю границу оценок, а также для тех типов частиц, для которых оцененные данные отсутствуют, моделирование дискретных актов ядерных взаимодействий осуществляется на основе современных моделей  $h(A)A$ -взаимодействий (адронных генераторов), построенных на основе как инклюзивного [2], так и эксклюзивного (FRITIOF, DPMJET-III, LAQGSM, PSM, CEM) подходов с использованием рекомендованных МАГАТЭ наборов входных параметров моделей, содержащихся в базе данных RIPL I-III. В коде реализованы аналоговый и неаналоговый методы построения траекторий частиц. Используются стандартные методы уменьшения дисперсии функционалов поля излучения, а также специализированные методы моделирования процессов, сопровождающихся большой множественностью вторичных частиц. При моделировании критических систем используется линейная комбинация двух и трех основных оценок  $k_{eff}$ .

**Ключевые слова:** перенос излучения в веществе, модели адрон-ядерных взаимодействий, библиотеки оцененных ядерных данных.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие и модернизация ускорительного комплекса и экспериментальной базы ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» предполагает реализацию ряда масштабных проектов установок, предназначенных для проведения фундаментальных и прикладных исследований. В частности, достигнутое на ускорительном комплексе У-70 устойчивое ускорение пучка ионов углерода до энергии 35 ГэВ/нуклон и результаты работ по созданию медицинского углеродного пучка промежуточных энергий (450 МэВ/нуклон)

© **И.И. Дегтярёв, Ф.Н. Новоскольцев, О.А. Ляшенко, Е.В. Гулина, Л.В. Морозова, 2016**

позволяют осуществлять фундаментальные исследования в области релятивистской ядерной физики и прикладные – в радиобиологии и ядерной медицине. Создано совместно с РФЯЦ-ВНИИЭФ новое научное направление в исследовании быстропротекающих процессов и материалов в экстремальных условиях – протонная радиография, проводятся работы в области иного метода исследований процессов данных типов – нейтронно-резонансной спектроскопии. Реализация предложенного в ГНЦ ИФВЭ проекта ОМЕГА предполагает создание многоцелевой ускорительной установки с высокоинтенсивными протонными пучками в диапазоне энергий 0.1 – 70.0 ГэВ для проведения практически всего спектра фундаментальных и прикладных экспериментов в области адронной физики низких, промежуточных и высоких энергий. Физический расчет этих установок и планирование экспериментальных исследований на них требуют развития и внедрения в практику прецизионных методов моделирования переноса многокомпонентного излучения и сопутствующих ядерных взаимодействий, а также их полномасштабной верификации на основе современных экспериментальных данных.

В мировой практике физического расчета установок данного класса и планирования экспериментов в качестве прецизионных широко распространение получили разработанные в LANL (Лос-Аламос, США) программные комплексы MCNP (в области реакторных энергий) и MCNPX (в диапазоне промежуточных и высоких энергий) с системой препроцессинга данных NJOY, обеспечивающей подготовку констант в специализированном формате ACE, а также программный комплекс GEANT (ЦЕРН, Швейцария). Для расчета изменения нуклидного состава широко используется комплекс FISPACT-EASY (Culham Centre for Fusion Energy, Великобритания). Совместное использование пакетов MCNP/MCNPX/GEANT и FISPACT-EASY обеспечивает решение большинства задач в областях ядерной, радиационной физики и физики высоких энергий. Следует отметить, что пакет MCNP требует предварительной переработки оригинальных файлов оцененных ядерных данных, представленных в исходном формате ENDF-6, в специализированный формат ACE и не обеспечивает «чистоты» использования информации, содержащейся в исходных файлах, что вносит дополнительную систематическую погрешность в результат и не позволяет осуществлять оценку полной ошибки рассчитываемых функционалов.

Помимо этого перечисленные пакеты являются оригинальными зарубежными разработками и представляют собой предметы интеллектуальной собственности соответствующих организаций-разработчиков, что требует дополнительных финансовых затрат на их приобретение, существенно ограничивает валидационно-верификационные исследования программ, их модификацию и адаптацию под конкретные задачи. В настоящее время на распространение данных программных комплексов наложены экспортные ограничения Министерства энергетики США, а доступ к этим программам (платный в общем случае) предоставляется по выполнению ряда жестких требований, что практически исключает их использование в отечественной практике. В течение последних двух десятилетий в ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывался оригинальный программный комплекс RTS&T, реализующий метод статистического моделирования связанного переноса излучения в гетерогенных пространственно-неоднородных средах в широком диапазоне энергий. В работе описываются современное состояние транспортной части кода, методология моделирования переноса и дискретных взаимодействий частиц, возможности системы описания геометрии.

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ С ВЕЩЕСТВОМ**

**Взаимодействия фотонов.** В базовой модели комплекса RTS&T учитываются следующие процессы дискретного взаимодействия фотонов: фотоэффект на K, LI, LII, LIII атомных оболочках (с моделированием выхода релаксационного характеристического излучения и его переноса на основе файлов оцененных фотоатомных данных, NSUB = 6), когерентное и

некогерентное рассеяние, рождение пар и фотоядерные взаимодействия в энергетических диапазонах гигантского дипольного резонанса и квазидейтронного эффекта, каналы рождения изобар (в диапазоне промежуточных энергий и возбуждения струн) при высоких энергиях. В качестве константного обеспечения переноса используется библиотека оцененных данных EPDL97 (или фотоатомная подбиблиотека ENDF/B VII.1, NSUB = 3), содержащая интегральные сечения парциальных каналов взаимодействия и форм-факторы когерентного и некогерентного рассеяния в энергетическом диапазоне от 10 эВ до 100 ГэВ. В версии RTS&T-2014 для прецизионного моделирования связанного переноса электронов и фотонов в диапазоне энергий до 1 ГэВ добавлена возможность использования алгоритмов PENELOPE [3].

**Электромагнитные взаимодействия заряженных частиц.** При моделировании ионизационных процессов заряженных частиц используются две альтернативные модели: модель непрерывного замедления с рождением  $\delta$ -электронов с выборкой флуктуаций энерговыведения из ограниченного распределения Ландау-Вавилова; модель непрерывного замедления без рождения  $\delta$ -электронов с моделированием флуктуаций полного распределения Ландау-Вавилова. Многократное кулоновское рассеяние заряженных частиц моделируется на основе теорий Мольера или Гоудсмита-Саундерсона. При построении траекторий заряженных частиц производится коррекция длины пути в процессе многократного кулоновского рассеяния, учитывается канал прямого рождения пар заряженными частицами при высоких энергиях. Расчет ионизационных потерь энергии тяжелых заряженных частиц производится по методу Циглера-Бирзака-Литтмарка (J.F. Ziegler, J.P. Biersack, U. Littmark) с учетом эффекта плотности по методу Штернхеймера. В прецизионных расчетах используются данные для ионизационных потерь энергии электронов, позитронов, протонов и альфа-частиц в композитных материалах, рекомендованные ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements).

**Дискретное излучение  $e^{\pm}$ .** Энергия фотонов выбирается из дифференциального распределения Бергера-Зельцера [4] для частиц с кинетической энергией менее 10 ГэВ и сечения Бете-Гайтлера [5] – в диапазоне более высоких энергий. Углы эмиссии фотонов выбираются из упрощенной формы дваждыдифференциального сечения процесса с учетом эффекта Ландау-Померанчука-Мигдала.

**Взаимодействия адронов высоких энергий.** В качестве базисной для моделирования неупругих  $h(A)$ - $A$ -взаимодействий при энергиях  $E \geq 5$  ГэВ в комплексе RTS&T-2014 используется модифицированный по методу [6] код FRITIOF 7.02 [7], реализующий ЛУНД-модель струнной динамики для адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий. Генератор был дополнен статистической испарительной моделью равновесной эмиссии в конкуренции с моделью бинарного деления. В качестве альтернативных моделей в RTS&T-2014 предусматривается использование PSM (Parton String Model) [8], LAQGS (Los-Alamos Quark-Gluon String Model) [9], DPMJET-III (Dual Parton Model) [10] и JAM (Jet AA Microscopic Transport Code) [11].

**Взаимодействия адронов промежуточных энергий.** В текущей версии комплекса RTS&T используется трехстадийная микроскопическая модель  $h(\gamma)$ -инициированных реакций, включающая в себя прямую стадию реакции, стадии предравновесной эмиссии и равновесного распада возбужденной ядерной системы в виде конкуренции процессов испарения и бинарного деления. Для моделирования каскадной стадии реакции в качестве основной используется модификация ОИЯИ-версии модели внутриядерного каскада, объединенной с изобарной моделью Линденбаума-Штернхеймера, используемой для расчета рождения пионов в одно- и двухпионных каналах в NN-взаимодействиях, а также однопионного рождения – в  $\pi N$ -взаимодействиях. В настоящей версии кода дополнительно производится учет мультипионных (до пяти частиц) каналов рождения частиц. Предравновесная стадия реакции моделируется на основе экситонной модели.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Исходная экситонная конфигурация формируется в процессе развития внутриядерного каскада или постулируется изначально. Стадия равновесной эмиссии (испарение либо бинарное деление) моделируется на основе статистической теории Вайскопфа-Ивинга и теорий деления Бора-Уилера или Фонга. Входные параметры моделей послекаскадно-го развала ядра заимствуются из баз рекомендованных данных RIPL I-III. В качестве альтернативных моделей неупругих адрон-ядерных взаимодействий в RTS&T-2014 предусматривается возможность использования пакетов CEM03.03 (Cascade-Exciton Model), JQMD (JAERI Quantum Molecular Dynamics), INCL4.6+abla07 (Liege Intranuclear Cascade model+GSI de-excitation code) и CASCADE04 (Intranuclear Cascade+Pre-equilibrium+Equilibrium/Fission).

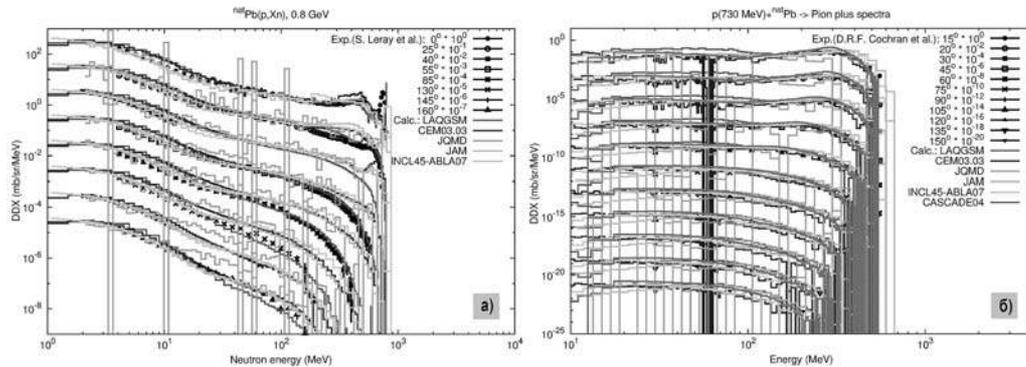


Рис. 1. Комплекс RTS&T-2014. Сравнение расчетных и экспериментальных значений дваждыдифференциальных сечений рождения нейтронов (а) и положительных пионов (б) в реакции  $p(800, 730 \text{ МэВ}) + {}^{nat}\text{Pb}$

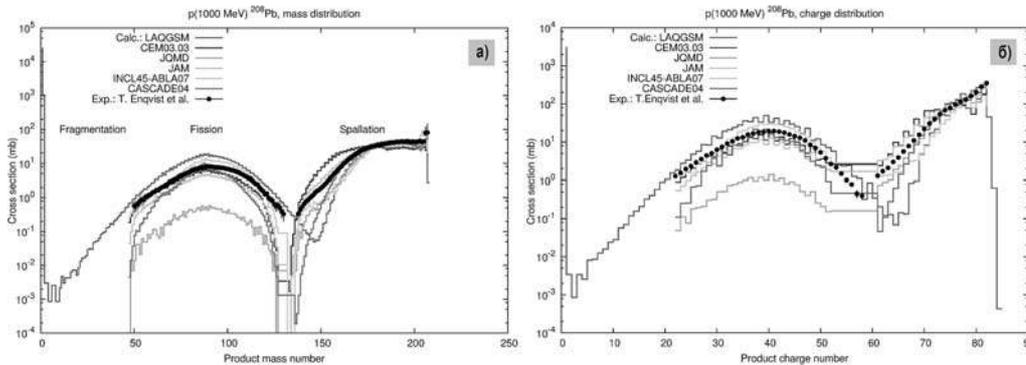


Рис. 2. Комплекс RTS&T-2014. Сравнение расчетных и экспериментальных значений массовых (а) и зарядовых (б) распределений остаточных ядер, образованных в реакции  $p(1000 \text{ МэВ}) + {}^{208}\text{Pb}$

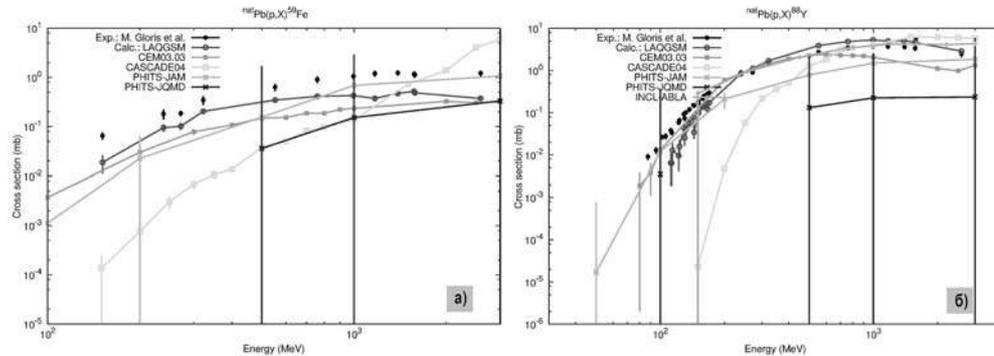


Рис. 3. Комплекс RTS&T-2014. Энергетическая зависимость сечения рождения изотопов  ${}^{59}\text{Fe}$  (а) и  ${}^{88}\text{Y}$  (б) при взаимодействии протонов с ядром  ${}^{208}\text{Pb}$

На рисунке 1 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений дваждыдифференциальных сечений рождения нейтронов и положительных пионов в неупругих рА-взаимодействиях с ядром  $^{nat}\text{Pb}$  при энергиях 800 и 730 МэВ. На рисунке 2 показано расчетно-экспериментальное сравнение массовых и зарядовых чисел остаточных ядер, образованных в реакции  $p(1 \text{ ГэВ}) + ^{208}\text{Pb}$ . Рисунок 3 иллюстрирует энергетическую зависимость парциальных сечений каналов рождения изотопов, рассчитанную на основе микроскопических моделей, включенных в состав комплекса RTS&T-2014.

**Взаимодействия нуклонов низких энергий.** Реализованный в комплексе подход ориентирован на прямое использование библиотек оцененных ядерных данных в формате ENDF-6 [11] (например, ENDF/B-VI,VII.1, ENDF-HE, JENDL, JENDL-HE, FENDL, BROND, РОСФОНД, TENDL и др.) в качестве системы констант для переноса нуклонов с энергией ниже 20/150/3000 МэВ. В процессе моделирования траекторий используется вся информация об элементарных актах взаимодействия нуклонов с ядрами в данном энергетическом диапазоне, доступная в файлах оцененных ядерных данных и представленная в соответствии с законами ENDF-6-формата, без дополнительных приближений и округлений (в частности, таких, например, как групповое приближение). Рассматриваются следующие типы реакций с участием нуклонов: упругое рассеяние, поглощение, реакции с рождением одного нейтрона в выходном канале, поглощение с рождением иных типов частиц (с разделением по уровням возбуждения остаточного ядра), деление (с моделированием мгновенных, запаздывающих нейтронов и осколков деления [MF = 8]) и т.д., а также фотоядерные взаимодействия. Энергии и углы эмиссии вторичных частиц выбираются из распределений файлов MF = 4, 5, 6, 12, 13, 14 и 15. Типично процесс подготовки файлов оцененных ядерных данных состоит из последовательного применения процедур разного целевого назначения, входящих в состав пакетов препроцессинга. На текущий момент времени наибольшее распространение получили два альтернативных пакета подготовки данных – NJOY [13] и ENDF Preprocessing Codes (PREPRO) [14], ставшие практически стандартами обработки файлов оцененных данных. Первый из приведенных пакетов, NJOY, имеет существенные экспортные ограничения и практически недоступен для использования в отечественной практике. Второй из пакетов, PREPRO, имеет свободную лицензию использования, размещен на официальном сайте Группы данных МАГАТЭ (<https://www-nds.iaea.org/public/endl/prepro/>) и доступен как в виде исполняемых кодов, так и в виде исходных текстов, что делает его практически безальтернативным для применения в организации подготовки транспортных данных.

В процессе подготовки файлов транспортных констант используются три основные процедуры пакета PREPRO – для линеаризации, восстановления разрешенных резонансов нейтронных сечений, учета доплеровского уширения уровней в резонансной области: LINEAR, RECENT, SIGMA1 соответственно, и дополнительные: LEGEND – процедура восстановления индикатрисы рассеяния, представленной в виде коэффициентов  $P_n$ -разложения; FIXUP – обеспечивает внутреннюю непротиворечивость интегральных сечений при всех энергиях для их последующего использования при моделирования переноса излучения (в частности, производится проверка равенства интегральных сечений сумме парциальных сечений каналов реакций и, при необходимости, их записей в соответствующих форматах) и DICTIN – обновляет индекс раздела в MF = 1 (общая информация), MT = 451 (общее описание файла и содержание).

Перенос нейтронов с энергиями ниже 3 – 4 эВ зависит от теплового движения атомов среды. Для его корректного моделирования рассматриваются два аспекта этой зависимости. Во-первых, для учета зависимости полного сечения взаимодействия нейтрона с ядром от скорости теплового движения ядра вводится понятие эффективного сечения для данной температуры материала, определяемое таким образом, чтобы иметь такую же скорость реакции для покоящегося ядра, как и скорость реакции, рассчитан-

ную для реального сечения с учетом движения ядра. При этом для учета влияния температуры среды вместо моделирования движения ядра используется заранее подготовленное (с использованием процедуры SIGMA1) эффективное сечение, отличающееся от реального при энергиях нейтрона ниже некоторой энергии, пропорциональной температуре среды и обратно пропорциональной массе ядра, а также в резонансной области. Во-вторых, тепловое движение ядра приводит к изменению кинетических параметров рассеянного нейтрона. В коде RTS&T реализованы три возможности учета теплового движения атомов среды. Первый метод состоит в использовании файлов, содержащих распределения по энергиям и направлениям рассеянного нейтрона – матрицы рассеяния, которые могут быть подготовлены для 27-ми замедлителей на основе Файла 7 библиотек оцененных данных (ENDF/B VI.8, ENDF/B-VII.1, JEFF3.1x, JENDL 4, INDL/TSL), в которых учтено влияние молекулярной или кристаллической связи рассеивающего ядра с соседними атомами. Второй метод основан на использовании приближения наикратчайшего времени столкновения для описания процесса некогерентного неупругого рассеяния. Третий метод базируется на использовании модели свободного газа. К сожалению, в пакет PREPRO не входит процедура, аналогичная по назначению и функциональным возможностям модулю THERMR комплекса NJOY, выполняющему расчет интегральных сечений и энергетически-угловых распределений рассеянных частиц при взаимодействии нейтронов на свободных или связанных атомах среды в тепловой области энергий с учетом температуры среды на основе файлов оцененных данных. Для выполнения функций, сходных с функциями модуля THERMR, была разработана оригинальная процедура THERMRTST. Модуль THERMRTST включен в общую систему препроцессинга данных комплекса RTS&T-2014.

В версию RTS&T-2014 включены два метода моделирования переноса нейтронов в резонансном и тепловом диапазонах энергий, учитывающие температурные эффекты непосредственно в процессе моделирования траектории и не требующие их предварительного учета на этапе подготовки транспортного файла (так называемые методы «on the fly»). При их использовании обработка исходного константного файла процедурами SIGMA1 и THERMRTST опускается.

Считывание данных из файла в формате ENDF-6 и их запись в оперативную память организована в виде дерева динамически размещаемых объектов, связанных со стандартными типами записей формата ENDF-6: CONT, LIST, TAB1, TAB2 и т.д. Во всех реакциях моделируются характеристики остаточных ядер с их последующим транспортом.

**Распады нестабильных частиц.** В комплексе RTS&T-2014 моделируется более 20-ти каналов распада нестабильных частиц на основе опубликованных PDG (Particle Data Group) оцененных значений брэнчингов. Двух- и трехчастичные распады нестабильных частиц моделируются с использованием метода Г.И. Копылова. Для моделирования многочастичных распадов используется процедура взвешенной генерации события в лоренц-инвариантном фазовом пространстве GENBOD (W515) из библиотеки CERNLIB.

### **СИСТЕМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ КОМПЛЕКСА RTS&T**

Одним из наиболее значимых факторов, определяющих быстродействие и универсальность программ, реализующих метод статистического моделирования переноса излучения в гетерогенных пространственно-неоднородных средах, является эффективность системы представления геометрии, включающей в себя универсальный геометрический модуль; пакет процедур определения границы геометрической области, базирующийся на двух альтернативных методах локализации (итерационном и аналитическом) и их комбинации; GEOMETRY → CAD/CAM/CAE-интерфейс; пакет процедур, обеспечивающих формирование геометрии наиболее типичных макрообъектов.

Описание конфигурации исследуемой системы осуществляется при помощи трех операций булевой алгебры над множеством пространственных геометрических примитивов: объединения, пересечения и вычитания. Все геометрические области системы нумеруются в произвольном порядке. Допускается возможность присвоения произвольному подмножеству объемов единого номера (формирование объединений областей для сбора усредненных функционалов). Пространственное позиционирование и ориентация произвольной геометрической области осуществляется заданием начала и углов поворота осей локальной системы координат в координатной системе ее материнской области. Позиционирование и поворот системы координат внешней области рассматриваемой системы осуществляется относительно глобальной системы координат. Традиционно используемые методы определения координат точки пересечения траектории частицы с поверхностью геометрической области можно разделить на две альтернативных категории: первая реализует итерационный способ локализации границы области; вторая, использующая точный способ нахождения точки пересечения, основанный на аппарате аналитической геометрии, требует дополнительного определения формы каждого геометрического примитива как комбинации ограничивающих его поверхностей, как правило, не выше второго порядка (метод координатных поверхностей). Каждый из перечисленных способов локализации обладает рядом известных достоинств и недостатков. В комплексе RTS&T реализован синтетический метод локализации границы области, объединяющий оба подхода. В описываемой версии комплекса определено 67 геометрических примитивов, соответствующих различным типам замкнутых поверхностей.

Значимость графических инструментальных средств поддержки для проверки геометрии и анализа расчетных функционалов бесспорна. К настоящему времени сформировались два базисных подхода к решению проблемы визуального представления геометрии исследованного объекта: создание собственного графического приложения, интерпретирующего язык описания геометрии; разработка программного интерфейса к широко используемым графическим комплексам, преобладающе к CAD/CAM/CAE-системам. Наиболее существенными преимуществами второго подхода, выбранного нами в качестве базисного, являются высокая портбельность, совместимость с другими графическими приложениями и современными аппаратными средствами графического ввода данных. В RTS&T-2014 входные данные описания геометрии преобразовываются в формат ASCII DXF® (Drawing eXchange Format), разработанный компанией Autodesk как стандарт для обмена графической информацией между системой AutoCAD® и другими приложениями. Выбор DXF-формата описания обусловлен несколькими причинами. Во-первых, это сравнительно простой, хорошо документированный, поддерживаемый и развиваемый формат, доступный для свободного использования (в настоящий момент времени – один из de facto мировых стандартов обмена графической информацией, включая CAD-системы высшего уровня). Во-вторых, конструкции формата DXF не только делают возможным достижение высокого качества векторной визуализацией трехмерных объектов с масштабированием, произвольным вращением в пространстве экрана, управлением свойствами уровней, удалением невидимых линий, получением разрезов и т.д., но они обеспечивают также предельно автоматизированную подготовку полной проектной документации, а также конвертирование информации в иной формат описания (DWG, VRML и т.д.). Программный RTS&T-CAD-интерфейс позволяет автоматически формировать файлы в формате DXF на основе конструкций языка описания геометрии с использованием разработанной графической библиотеки основных CAD-объектов (типы текст, линия, дуга, окружность, 3D-поверхность и т.п.). Библиотека поддерживает все необходимые свойства объектов (уровень, цвет, тип линии и т.д.) и служит в качестве базиса для другой библиотеки специальных процедур, формирующих трехмерный DXF-образ каждого пространственного примитива. Визуальная модель сложной

геометрии формируется комбинаторно на основе образов простых форм с использованием процедуры декодирования иерархического дерева и преобразованием координат каждого примитива в глобальную систему координат.

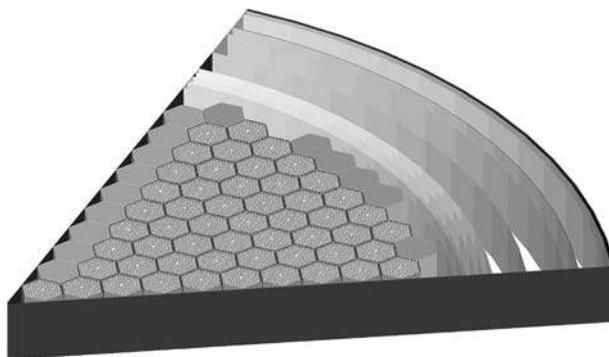


Рис. 4. Комплекс RTS&T-2014. Твёрдотельная модель 60-градусного сектора симметрии реактора ВВЭР-440/В-230

В состав комплекса включен пакет сервисных процедур, обеспечивающих формирование геометрии наиболее типичных макрообъектов, используемых в прикладных задачах расчета ядерно-физических установок и детекторов элементарных частиц, дозиметрии и радиационной терапии, реакторостроения, атмосферной оптики и т.д. (например, типичные периодические структуры калориметров, реакторных ячеек и АЗ (рис. 4), критических сборок, рекомендованные антропоморфные математические модели фантомов человеческого тела (MIRD, Оксье).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная в работе новая версия комплекса программ RTS&T наряду с известными зарубежными кодами аналогичного назначения (MCNP6, GEANT, FLUKA, PHITS) может применяться для решения широкого спектра задач физики реакторов, радиационной защиты, радиационной терапии, ядерной медицины, расчетно-теоретического сопровождения прикладных и фундаментальных исследований в области ядерной физики и физики высоких энергий.

## Литература

1. *Blokhin A.I., Degtyarev I.I., Lokhovitskii A.E., Maslov M.A. and Yazynin I.A.* in Proceedings of the 17th Particle Accelerator Conference, Vancouver, BC, CAN, pp. 258-260, 1998.
2. *Дегтярев И.И., Новоскольцев Ф.Н.* Концепции построения и результаты валидации инклюзивного адронного генератора комплекса RTS&T в диапазоне промежуточных и высоких энергий, Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, т.2, № 4, с.461, 2013.
3. *Salvat F., Fernandez-Varea J.M., Sempau J.* ISBN 92-64-02145-0, OECD, 2003.
4. *Seltzer S.M., Berger M.J.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B12. 1985, pp. 95-134.
5. *Tsai Y.S.* Rev. Mod. Phys. 1974, v. 46, p. 815.
6. *Uzhinskii V.V.* JINR preprint E2-96-192, 1996.
7. *Andersson B., Gustafson G., Nilsson-Almqvist B.* Nucl. Phys. 1987, v. 281B, p.289.
8. *Amelin N.* Preprint CERN/IT/99/6.
9. *Gudima K.K., Mashnik S.G. and Sierk A.J.* Report LA-UR-01-6804, Los Alamos, 2001.
10. *Roesler S., Engel R., Ranft J.* The Monte Carlo Event Generator DPMJET-III, Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications, Proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon, 23–26 October 2000, pp. 1033-1038.
11. *Nara Y., Otuka N., Ohnishi A., Niita K. and Chiba S.* Phys. Rev. C61, 024901, 2000.

12. *Herman M., Trkov A.* ENDF-6 Formats Manual Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VI and ENDF/B-VII, Report BNL-90365-2009, June 2009.

13. *McFarlane R.E., Muir D.W., Boicourt R.M., Kahler A.C.* (ed.), NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2012, LA-UR-12-27079 Rev.

14. *Cullen D.E.* IAEA-NDS-39, Rev. 9, 1996.

Поступила в редакцию 11.03.2016 г.

#### Авторы

Дегтярёв Игорь Иванович, старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук  
E-mail: Igor.Degtyarev@ihep.ru

Новоскольцев Федор Николаевич, старший научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук  
E-mail: Fedor.Novoskoltsev@ihep.ru

Ляшенко Ольга Анатольевна, младший научный сотрудник  
E-mail: Olga.Liashenko@ihep.ru

Гулина Евгения Владимировна, младший научный сотрудник  
E-mail: Evgenia.Altukhova@ihep.ru

Морозова Людмила Валентиновна, инженер  
E-mail: Luda.Morozova@ihep.ru

UDC 621.039

### RTS&T-2014 CODE STATUS

Degtyarev I.I., Novoskoltsev F.N., Liashenko O.A., Gulina E.V., Morozova L.V.  
Institute for High Energy Physics National Research Centre  
«Kurchatov Institute»  
1 Nauki sq., Moscow reg., Protvino, 142281 Russia

#### ABSTRACT

The paper describes the main features of newest version of the RTS&T code system. The RTS&T code (Radiation Transport Simulation and Isotopes Transmutation Calculation) was assigned for detailed Monte Carlo simulation of many particle types ( $\gamma$ ,  $e^\pm$ ,  $\mu$ ,  $N$ ,  $p^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $K_L^0$ ,  $\Sigma^{\pm 0}$ , antinucleons, ions, etc.) transport in a complex 3D geometry's with composite materials in the energy range from a fraction eV to 20 TeV and calculation of particle fluences, radiation field functionals and isotopes transmutation problem as well. A direct using of evaluated nuclear data libraries (ENDF/B-VI.8/VII.1, ROSFOND, JENDL, BROND etc.) to particle transport and isotopes transmutation modeling in low and intermediate energy regions is the general idea of the RTS&T code. The main changes compared to the previous code version concern the hadron- and photo-production model in the intermediate and high energy regions, hadronic, photoatomic and photonuclear cross section compilations, improved data for charged particle energy losses in composite materials, and nuclear structure data. New developments in modeling of discrete hadronic interactions (implementation of improved versions of hA- and AA-interaction models) are described. A comparison of the recent experimental data on double differential and total yields of diffractive,  $\gamma$  and  $\beta$ -particles resulting from the intermediate-energy hA-interactions is made with different theoretical models of direct hadron production: intranuclear cascade model, quark-gluon string model, parton cascade model and quantum molecular dynamic model combined with generalized exciton-evaporation (Fermi break-up)-fission model to describe of slow particles and residual nuclei emission. The RTS&T-2014 code can be successfully used to verify of continuous-energy data libraries were recorded in the ENDF-6 format. It is possible to use the RTS&T

code to simulate of reactors, detectors, spacecraft, radiotherapy treatment planning, criticality calculation and radiation safety analysis. The comparison between calculated and measured data is presented. The geometry definition system and enhanced RTS&T-CAD-interface are described also.

**Key words:** radiation transport, microscopic model of hadron-nucleus interaction, evaluated nuclear data libraries.

#### REFERENCES

1. Blokhin A.I., Degtyarev I.I., Lokhovitskii A.E., Maslov M.A. and Yazynin I.A., in Proceedings of the 17th Particle Accelerator Conference, Vancouver, BC, CAN, pp. 258-260, 1998.
2. Degtyarev I.I., Novoskoltsev F.N., Concepts of the Creation and Results of Validation of the Inclusive Hadron Generator in the RTS&T Code for Intermediate and High Energies Using Modern Experimental Data. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»*. 2013, v. 2, no. 4, p.461 (in Russian).
3. Salvat F., Fernandez-Varea J.M., Sampau J., ISBN 92-64-02145-0, OECD, 2003.
4. Seltzer S.M., M.J. Berger, Seltzer S.M., Berger M.J. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B12*. 1985, pp. 95-134.
5. Tsai Y.S. *Rev. Mod. Phys.* 1974, v. 46, p. 815.
6. Uzhinskii V.V. JINR preprint E2-96-192, 1996.
7. Andersson B., Gustafson G., Nilsson-Almqvist B. *Nucl. Phys.*, 1987, v. 281B, p.289.
8. Amelin N. Preprint CERN/IT/99/6.
9. Gudima K.K., Mashnik S.G. and Sierk A.J., Report LA-UR-01-6804, Los Alamos, 2001.
10. Roesler S., Engel R., Ranft J., The Monte Carlo Event Generator DPMJET-III, Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation and Applications, Proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon, 23–26 October 2000, pp. 1033-1038.
11. Nara Y., Otuka N., Ohnishi A., Niita K. and Chiba S. *Phys. Rev. C*61, 024901, 2000.
12. Herman M., Trkov A., ENDF-6 Formats Manual Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-VI and ENDF/B-VII, Report BNL-90365-2009, June 2009.
13. MacFarlane R.E., Muir D.W., Boicourt R.M., Kahler A.C. (ed.), NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2012, LA-UR-12-27079 Rev.
14. Cullen D.E., IAEA-NDS-39, Rev. 9, 1996.

#### Authors

Degtyarev Igor' Ivanovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: Igor.Degtyarev@ihep.ru

Novoskoltsev Fyodor Nikolaevich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: Fedor.Novoskoltsev@ihep.ru

Liashenko Ol'ga Anatol'evna, Junior Researcher

E-mail: Olga.Liashenko@ihep.ru

Gulina Evgeniya Vladimirovna, Junior Researcher

E-mail: Evgenia.Altukhova@ihep.ru

Morozova Lyudmila Valentinivna, Engineer

E-mail: Luda.Morozova@ihep.ru