

УДК 621.039.578:629.78

**РАСЧЕТ НАРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР И РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАЗЛИЧНЫХ УЗЛОВ КОСМИЧЕСКИХ ЯЭУ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
КАМОД**

*Дубинин А.А., Пышко А.П., Фролов О.В., Хоромский В.А.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск)*

В состав программного комплекса расчета активации конструкционных материалов и продуктов деления КАМОД [1] входят программы подготовки групповых констант из файлов оцененных данных, библиотека ядерно-физических данных, алгоритмы расчета радиационных характеристик продуктов деления и наведенной активности в различных конструкционных узлах установки. Библиотека ядерно-физических данных включает в себя:

библиотеку свойств радионуклидов;

групповые сечения активации для 10 основных реакций (n, γ), (n, p), (n, α), ($n, 2n$), ($n, 3n$), (n, t), ($n, n'p$), (n, He^3), ($n, n'\alpha$), (n, d) (~2820 реакций);

независимый выход продуктов деления (~1230);

групповые характеристики γ - (~1870 изотопов), α - и β -излучения.

В общем случае при расчете радиационных характеристик учитывается, что при работе в реакторе накапливаются продукты деления, нарабатываются продукты активации, происходят радиоактивный распад и выгорание продуктов радиоактивного распада. После останова реактора радионуклиды распадаются. Кроме того, после останова реактора учитывается газовая неплотность твэлов с выходом летучих изотопов во внешнюю среду (испарение летучих продуктов во время работы реактора в данной версии программы не рассматривается).

В основу расчета, который позволяет получить следующие функции от времени: активность образца по каждому изотопу (Бк), интегральную энергию γ - и β -излучения (МэВ/распад), массу активных и стабильных изотопов (кг), групповые спектры γ - и β -излучения образца, легли аналитические решения балансных дифференциальных уравнений.

Для программного комплекса КАМОД по сравнению с комплексом ORIGEN (США), для которого программа расчета нейтронного поля,

кроме спектра нейтронов, должна формировать скорость всех процессов взаимодействия нейтронов с веществом, необходим только средний спектр нейтронов в заданном объеме.

С помощью программного комплекса КАМОД на всех этапах проектирования ЯЭУ рассчитывают:

наведенную активность конструкционных материалов и элементов ЭГК;

наработку продуктов деления в термоэмиссионных реакторах-преобразователях с выходом некоторых из них в межэлектродный зазор ЭГК;

активацию жидкометаллического теплоносителя (в натриево-калиевом теплоносителе основной вклад в активацию вносит натрий, в литиевом теплоносителе наведенная активность определяется примесями, продуктами коррозии и β -активностью ^8Li);

наработку продуктов деления и активации в тяжелом компоненте защиты;

активность конструкционных материалов реакторного блока и наработку продуктов деления за кампанию при выводе установки из эксплуатации.

Для прогнозирования радиационных характеристик космических ЯЭУ, находящихся на орбите длительного существования, с помощью комплекса КАМОД были рассчитаны накопление радионуклидов и временные зависимости радиационных характеристик продуктов деления ядерного топлива и наведенной активности конструкционных материалов [2].

Для изучения возможностей вторичного использования конструкционных материалов исследовали наработку долгоживущих радионуклидов в интенсивных нейтронных полях с последующей оценкой радиационной безопасности при их технологической переработке и эксплуатации.

При оценке радиационной безопасности проекта ЯЭУ-50 [3] с помощью программного комплекса КАМОД рассчитывали наработку продуктов деления после физических пусков,

радиационные характеристики нуклидов, нарабатанных для заданной циклограммы работы реактора, накопление тяжелых нуклидов в активной зоне реактора и защите из обедненного урана, радиационную обстановку в окрестности остановленного реактора. Аналогичные характеристики рассчитывали при выполнении проекта БУК-ТЭМ [4].

Одной из главных задач по обеспечению безопасности ЯЭУ является прогнозирование радиационной обстановки в окрестностях остановленного реактора. Для такого прогнозирования необходимо взаимодействие двух комплексов расчетных программ — программ расчета переноса излучения в веществе и активационной наработки радионуклидов в конструкциях ЯЭУ с получением спектральных характеристик γ -источников этих продуктов активации. В результате образуется программная цепочка:

программа переноса рассчитывает дифференциальный по энергии поток нейтронов и передает информацию в программу расчета активационной наработки радионуклидов;

программа расчета активационной наработки радионуклидов рассчитывает спектральные характеристики γ -источников продуктов активации и передает эту информацию обратно в программу переноса излучения.

Программа переноса излучения, используя полученные γ -источники, рассчитывает радиационную обстановку в окрестности остановленного реактора — необходимые функционалы, производные плотности потока γ -излучения.

В качестве программных элементов построенной в ходе работы цепочки использовали программы КАСКАД [5] (двумерный расчет переноса излучения) и КАМОД. Важным в выстраиваемой программной цепочке является передача из программы КАСКАД в программу КАМОД полной информации о нейтронном поле, т.е. поточечной информации о нейтронных спектрах, из программы КАМОД соответственно в программу КАСКАД полной информации о γ -источниках, т.е. поточечной информации об их интенсивности и спектрах по всей области расчетной задачи. Таким образом, точное представление о нейтронном поле дает точное представление о

наработанных продуктах активации и деления, γ -источниках активации и деления, что позволяет свести к минимуму ошибку прогнозирования радиационной обстановки в окрестностях остановленной ЯЭУ.

Для объединения этих программ одним программным интерфейсом необходимо было:

разработать и согласовать форматы входных файлов программы КАМОД с точным представлением поля нейтронов в рассчитываемой области. Данные форматы являются выходными для программы КАСКАД;

разработать и согласовать формат выходных файлов программы КАМОД с точным представлением поля источников γ -квантов в рассчитываемой области. Данный формат является входным для программы КАСКАД;

внести в блоки ввода-вывода программ модификации или разработать отдельные программные блоки для перевода данных из обменных форматов во внутренние форматы программ КАСКАД и КАМОД, так как структура внутренних форматов этих программ различна.

При создании обменных файлов были внесены изменения в пять программных блоков программы КАСКАД, в том числе в головную KAS, в блок ввода KASDE, вывода KASOUT и два сервисных блока KASSERV и KASPCF50. Для расчета γ -излучения в программном комплексе КАМОД были разработаны новые блоки:

программа подготовки входных характеристик на основании выходных данных КАСКАД, в которой формируется файл MATZON с ядерной концентрацией изотопов по всем зонам расчетной системы (при этом учитывается, что часть изотопов природного содержания, другая с заданным обогащением) и файл MATDEL с сечением деления в зонах с делящимися изотопами;

программа общей организации расчета характеристик наведенной активности, которая в каждой пространственной точке (r, z) из входного файла с информацией о поточечных нейтронных спектрах считывает спектр нейтронов, формирует все необходимые входные характеристики для расчета спектра γ -излучения. Полученная поточечная информация о спектрах γ -квантов формируется в файл специального об-

менного формата для передачи в программу КАСКАД.

Для расчета радиационной обстановки в окрестности ЯЭУ с остановленным реактором полученную из обменного файла информацию о поточечных спектрах γ -источников необходимо ввести в программу КАСКАД. Эта операция проводится через файл, содержащий пространственно-угловое распределение источника излучения для каждой энергетической группы в формате, подробное описание которого представлено в инструкции программы КАСКАД. Для формирования файла в этом формате были разработаны две программы:

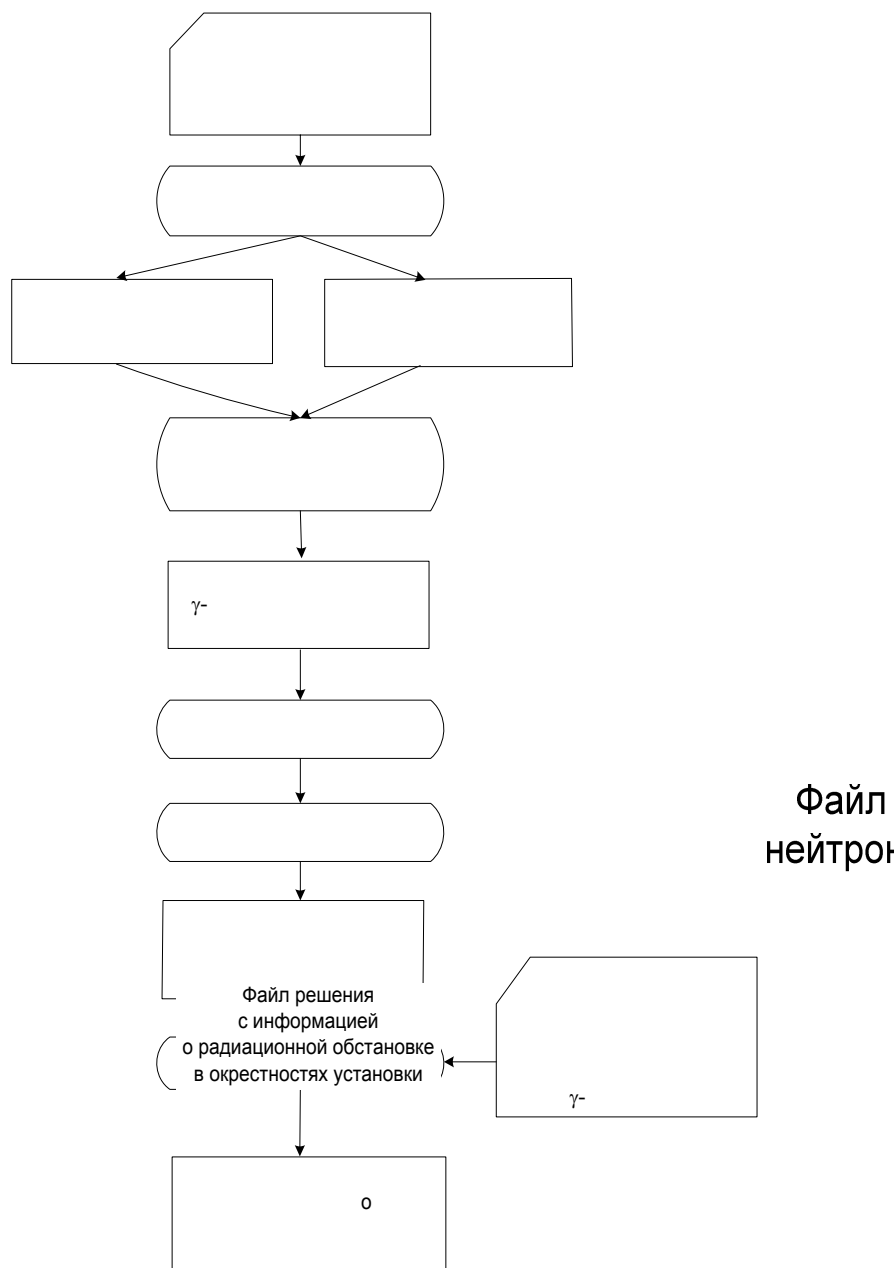
RD — программа преобразования поточечного представления спектров γ -источников продуктов активации, полученных из программы КАМОД, в погрупповую бесформатную структуру, необходимую для формирования файла источника для программы КАСКАД;

RW — программа чтения, модификации и перезаписи файла источника для программы КАСКАД.

Таким образом была сформирована цепочка программного интерфейса КАСКАД—КАМОД—КАСКАД (см. рисунок).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинин А.А., Пышко А.П., Фролов О.В. Обновление базы нейтронно-физических данных программного комплекса КАМОД для решения задач радиационной безопасности ЯЭУ. Тезисы докл. IX Рос. научной конф. «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». Обнинск, 2006, с. 81—83.
2. Dubinin A.A., Levchenko V.M., Pyshko A.P., Frolov O.V. Radiation characteristics of decommissioned space nuclear power systems. — In: ICENES'96. Obninsk, 1996, p. 775—781.
3. Andreev P.V., Galkin A.Ya., Trukhanov Y.L. e.a. Status and prospects for space thermionic reactors. — Ibid., p. 128—135.
4. Зродников А.В. Прямое преобразование энергии. — В сб.: IV Научно-практ. конф. Минатома России «Использование достижений фундаментальных исследований в ядерных технологиях». М., 2003, с. 105—122.



Общая блок-схема расчета с использованием интерфейса КАСКАД—КАМОД—КАСКАД

5. Волощенко А.М. Вычислительные возможности пакета программ РОЗ-6.5/КАСКАД-С-2.0/КАТРИН-1.0 для решения стационарного уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения методом дискретных ординат в 1D, 2D и 3D геометриях. Тезисы докл. VIII Рос. научной конф. «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». Обнинск, 2002, с. 30—33.

Поступила в Редакцию 5.06.08