

*На правах рукописи*

**Максимушкина  
Анастасия Владимировна**

**ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ И НАВЕДЁННАЯ АКТИВНОСТЬ  
ОБЛУЧЁННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ  
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки,  
включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Автор:



**Обнинск 2015**

Работа выполнена в Обнинском институте атомной энергетики – филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Коровин Юрий Александрович,  
ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
Артисюк Владимир Васильевич,  
проректор по международной  
деятельности, НОУ ДПО «ЦИПК»  
кандидат технических наук,  
Соснин Андрей Николаевич,  
с.н.с. лаборатории информационных  
технологий ОИЯИ

Ведущая организация: Национальный  
исследовательский центр  
«Курчатовский институт»

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г. в \_\_\_ час. \_\_\_ мин.  
на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ  
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м. н., профессор

И.И. Чернов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Задача исследования процесса трансмутации и активации материалов является актуальной для теоретических и практических работ, связанных с ядерно-энергетическими установками. Расчет активности и токсичности радионуклидов является очень важным в области медицины и экологии для определения радиотоксичности и активности препаратов, содержащих радионуклиды, или радионуклидов, содержащихся в почве, воде и воздухе, что позволяет оценить их биологическую опасность для человека. Важным также является подготовка и отбор точных данных, необходимых для расчетов, например, сечений ядерных реакций. Часть данных может быть получена экспериментальным путем, часть – с помощью расчетных кодов, в основе которых заложены определенные физические модели. Таким образом, необходимым является выбор моделей, которые наилучшим образом описывают экспериментальные данные.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы явилась модификация программных кодов для расчета изотопного состава и наведённой активности облучённых материалов и создание интерактивной программной системы по ядерной трансмутации в пучках высокоэнергетических частиц.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи.

1. Создан интерактивный комплекс программ по расчёту ядерной трансмутации с использованием современных компьютерных технологий и проведена его верификация.

2. Расширен энергетический диапазон моделей посредством интеграции с современными библиотеками ядерных физических данных (JENDL, JEFF, TENDL) и библиотеками активационных данных (IEAF, NEPAD, HEAD).

3. Подготовлены данные по сечениям ядерных реакций с помощью программы CASCADE/INPE, учитывая образования кластеров ядер; подготовлены данные по сечениям ядерных реакций с использованием нейронных сетей.

4. Проведен анализ полученных расчетных данных и выбраны расчетные модели с помощью факторов согласия и метода статистического сравнения данных.

В соответствии с поставленной целью был разработан интерактивный комплекс, предназначенный для расчета изотопного

состава и активности материалов, находящихся под облучением в ускорителях, термоядерных установках и ядерных реакторах. Ввод данных и вывод результатов осуществляется через графический интерфейс, что существенно облегчает работу с программой. Проведен анализ и выбор методов для оценки близости расчетных и экспериментальных данных.

### **Научная новизна работы**

1. Впервые создан интерактивный комплекс, который позволяет проводить расчет изотопного состава, активности, радиотоксичности материалов для ускорительной установки, ток которой меняли во время облучения мишени, учитывая изменение со временем спектра нейтронов и протонов внутри мишени.

2. Для проведения расчетов в комплексе использованы современные и новые библиотеки ядерных физических (JENDL, JEFF, TENDL) и активационных данных (IEAF, NEPAD, HEAD), которые позволяют расширить энергетический диапазон и проводить расчет для энергий налетающих частиц свыше 20 МэВ.

3. Для аппроксимации и прогнозирования ядерно-физических данных впервые была использована математическая модель, основанная на нейронных сетях.

4. При получении данных по сечениям ядерных реакций впервые использована модифицированная программа CASCADE/INPE, включающая в себя модель образования кластеров; проведены анализ и сравнение с экспериментальными и расчетными данными, полученными по другим программам и моделям.

5. Впервые для анализа расчетных и экспериментальных данных был использован метод статистического сравнения и на его основе сформулированы рекомендации по использованию моделей.

### **Практическая значимость работы**

1. Интерактивный комплекс позволяет проводить расчеты изотопного состава, активности и радиотоксичности материалов с учетом режима работы ускорительной установки. Разработанный инструментарий применим в области медицины (для расчета активности, оценки радиотоксичности и дозы облучения для препаратов, содержащих радионуклиды) и в экологии (для оценки биологической опасности радионуклидов, содержащихся в почве, воде и воздухе).

2. Интеграция комплекса с современными библиотеками активационных данных позволяет проводить расчеты для высокоэнергетической части спектра частиц.

3. Получены сечения реакций с выходом изотопа  ${}^7\text{Be}$ , которые пополняют библиотеку активационных данных HEAD-2009.

4. Разработана программа для анализа данных и расчетных моделей, с помощью которой были сформулированы рекомендации по использованию расчетных моделей. Данная программа может быть использована в различных областях, где требуется статистический анализ данных с целью определения принадлежности этих данных к одной генеральной совокупности.

#### **Личный вклад автора**

Автор принимала непосредственное участие в разработке интерактивного комплекса программ по расчёту ядерной трансмутации и его верификации, выборе структуры нейронных сетей для аппроксимации и прогнозирования ядерно-физических данных. Автором произведены расчеты сечений реакций с помощью новой версии программы CASCADE/INPE; проведен анализ полученных данных с помощью факторов согласия и метода статистического сравнения данных; создана программа для анализа и выбора расчетных моделей.

Автор принимала личное участие в апробации результатов работы и написании основных публикаций по теме диссертации.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработанный интерактивный комплекс для расчета изотопного состава и наведенной активности облученных материалов инновационных ЯЭУ.

2. Результаты расчетов сечений образования кластеров ядер, полученные с использованием модифицированного кода программы CASCADE/INPE и разработанной математической модели, базирующейся на основе искусственных нейронных сетей.

3. Результаты анализа расчетных и экспериментальных данных по сечениям ядерных реакций, который был выполнен с помощью метода статистического сравнения и факторов согласия.

4. Разработанная программа для анализа данных по сечениям ядерных реакций на основе метода статистического сравнения.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы докладывались на следующих всероссийских и международных семинарах и конференциях: Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (г. Обнинск, 2009, 2011, 2013 гг.); Научная сессия НИЯУ МИФИ (г. Обнинск, 2010 – 2015 гг.); V международная конференция «Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам

естествознания» (г. Обнинск, 2011 г.); конференция «Молодежные инновации Калужской области» (г. Калуга, 2014 г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ; имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Статистическое сравнение расчетных и экспериментальных данных» №2015614094 от 06.04.2015.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав основного текста, заключения, библиографического списка, включающего в себя 114 наименований. Работа изложена на 112 страницах, содержит 60 иллюстраций и 16 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведены проблемы, влияющие на развитие ядерной энергетики, выделена основная проблема, связанная с уменьшением ядерных отходов. Перспективным методом решения этой проблемы является трансмутация отходов как альтернатива их захоронению. Раскрыта актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** Приведены основные стратегии по решению проблемы с радиоактивными отходами, выделена роль трансмутации при решении этой проблемы. Подробно рассмотрена трансмутация долгоживущих младших актинидов (МА) и продуктов деления, а также возможные варианты по разделению и трансмутации радиоактивных отходов. Все варианты подразумевают непрерывное использование ядерной энергии, стабилизацию запасов трансурановых элементов в топливном цикле и минимизацию отходов в хранилище.

Определена актуальность разработки и использования ядерных установок с внешним нейтронным источником. Приведены преимущества и недостатки электро-ядерных установок (ЭЛЯУ). Основная схема ЭЛЯУ представлена на рис.1.

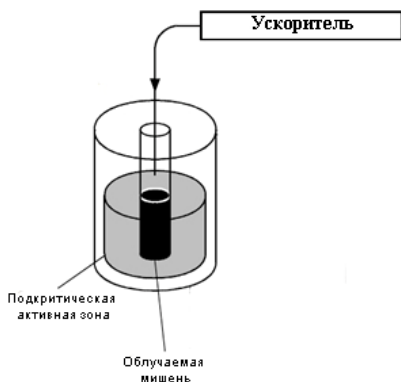


Рис.1. Основная схема ЭЛЯУ

Основными европейскими проектами являются

- MEGAPIE (MEGAwatt Pilot Experiment);
- n-TOF (A neutron Time-of-Flight facility);
- MUSE (Multiplication avec Une Source Externe);
- TRADE (TRiga Accelerator Driven Experiment);
- MYRRHA (Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications).

В США реализуется проект Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI).

Обзор современных программных средств по расчету изотопного состава показал, что они позволяют рассчитать различные характеристики для ЭЛЯУ: изотопный состав, активность материалов, дозу облучения, радиационные повреждения в единицах сна. Наиболее широкое применение получили CINDER, Origen, FISPACT, FLUKA.

В основе расчетов изотопного состава и наведенной активности материалов лежит решение системы уравнений Бейтмана. Решение этого уравнения реализуется несколькими методами: численное, методом матричной экспоненты и аналитическое решение (формулы Бейтмана):

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{k \neq i} (\lambda_{ik}^r + \lambda_{ik}^d) \cdot N_k(t) - (\lambda_i^r + \lambda_i^d) \cdot N_i(t),$$

где  $N_i(t)$  – концентрация  $i$ -го нуклида в момент времени  $t$ ;  $\lambda_{ik}^r$  и  $\lambda_{ik}^d$  – скорости ядерной реакции и радиоактивного распада, в результате которого  $k$ -ый нуклид превращается в  $i$ -ый;  $\lambda_i^r$  – скорость

Приведен обзор современных проектов и установок по трансмутации.

В Японии этими исследованиями занимаются три института:

- JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute);
- JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute);
- CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry).

трансмутации  $i$ -го нуклида в ядерных реакциях;  $\lambda_i^d$  – скорость радиоактивного распада такого нуклида.

В **заключении главы 1** сформулированы следующие задачи диссертационной работы:

- разработка программы для расчета изотопного состава и активности облученных материалов с учетом возможных изменений режимов работы установки;
- подключение к комплексу различных библиотек ядерных данных, в том числе и последних, например, высокоэнергетической библиотеки активационных данных HEAD;
- качественная аппроксимация экспериментальных данных по сечениям ядерных реакций;
- выбор расчетных моделей для получения сечений реакций с использованием различных методов.

В **главе 2** представлено полное описание интерактивной системы по расчету изотопного состава и наведенной активности облученных материалов SNT.1.

Описаны основные методы решения уравнения, характеризующего изменение концентрации изотопа (уравнения Бейтмана):

- решение Бейтмана, которое имеет следующий вид

$$N_k(t) = N_1(0) \left( \prod_{i=1}^{k-1} b_{i+1,i} \lambda_i \right) \sum_{j=1}^k \frac{e^{-\lambda_j t}}{\prod_{i=1, i \neq j} (\lambda_i - \lambda_j)};$$

- численные методы интегрирования;
- метод матричной экспоненты, тогда решение будет иметь вид

$$e^{A \vec{N}(0)} = \left( I + A + \frac{A^2}{2!} + \frac{A^3}{3!} + \dots \right) \vec{N}(0)$$

В главе приведены основные недостатки и преимущества каждого метода. В программе SNT.1 реализован метод матричной экспоненты, выбор которого обоснован в данной главе диссертации.

Представлен алгоритм интерактивной системы по расчету изотопного состава и наведенной активности облученных материалов SNT.1 (рис. 2).



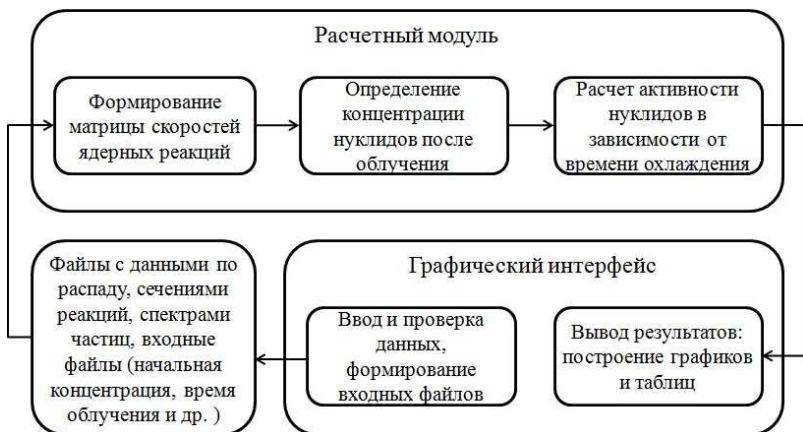


Рис. 2. Блок-схема программы SNT.1

Расчетный модуль – это набор программ, реализованных на языке программирования FORTRAN. Эти программы служат для формирования матрицы скоростей ядерных реакций, вычисления концентрации нуклидов после облучения и расчета активности в зависимости от времени охлаждения.

Графический интерфейс (рис. 3) реализован на языке программирования C# и служит для ввода и вывода данных и обработки результатов.

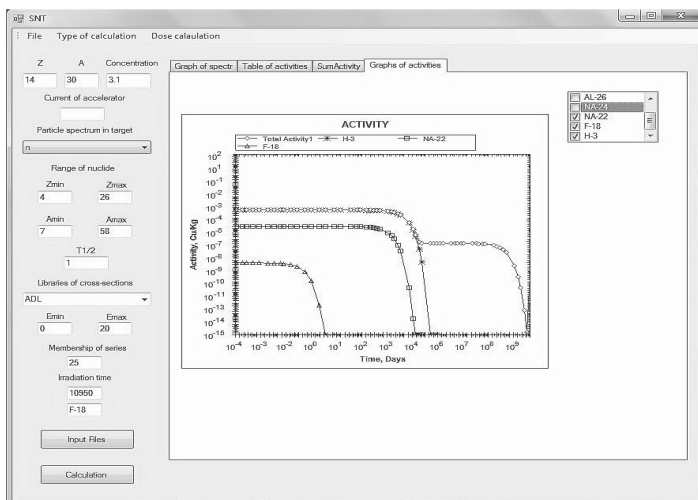


Рис. 3. Графический интерфейс

Проведение расчётов включает в себя: подготовку данных, необходимых для расчета концентраций нуклидов, вычисление изотопного состава материалов при облучении, расчет концентраций и активностей изотопов при охлаждении.

Описан алгоритм проведения расчетов с учетом изменения тока ускорительной установки со временем и с учетом изменения спектра со временем. Для этих вариантов расчета используется модифицированная программа решения дифференциальных уравнений.

Проведен расчет концентрации и активности нуклидов, образующихся при облучении свинцово-висмутовой мишени (43.5% Pb, 56.5% Bi) протонами с энергией 575 МэВ. Расчет концентрации проводился для 1153 нуклидов  $4 \leq Z \leq 84$ ,  $T^{min}_{1/2} \geq 6$  мин. Время облучения составляет один день.

Рассмотрены три варианта облучения.

- Во время облучения (одни сутки) ток ускорительной установки менялся. Значения токов и интервалов времени, в течение которых поддерживались данные токи, представлены в табл. 1.

- С постоянным значением тока установки 77,42 мкА (среднее значение тока для первого варианта) в течение всего времени облучения (одни сутки).

- С постоянным значением тока установки 77,42 мкА (среднее значение тока для первого варианта) в течение всего времени облучения за исключением времени остановки установки (0,5 сут.).

Таблица 1. Значения токов ускорительной установки

Ток, мкА	Интервал времени, с
36,88	5520
0	54840
31,56	16980
69,49	3540
118,47	3420
134,95	2580
227,99	8220
0	54000

Результаты расчета активностей для всех случаев представлены на рис. 4.

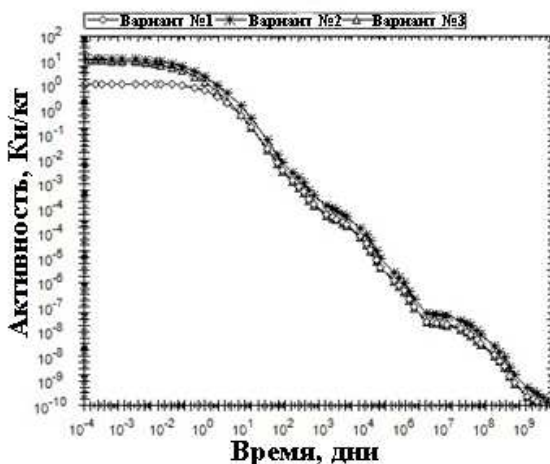


Рис. 4. Графики активностей для трех вариантов облучения

Из графиков видно, что сразу после окончания облучения и в начале охлаждения наибольшая активность наблюдается во втором случае, а наименьшая – в первом. Это связано с тем, что большую роль в этот промежуток времени играет вклад в активность короткоживущих нуклидов, которые постоянно образуются при непрерывном облучении (второй и третий варианты облучения), в отличие от варианта с различными режимами работы установки (в том числе и с периодами остановки облучения). В этом случае короткоживущие изотопы либо полностью распадаются, либо их активность успевает значительно снизиться за время остановки облучения.

Проведена верификация программы SNT.1, путем сравнения результатов расчета активности по программе SNT.1 с расчетами по другим программам, в том числе по программам, использующим другие методы решения уравнения Бэйтмана.

Для верификации программы проделан расчет активности воды, которая охлаждает мишень из Ta в проекте TRADE (TRiga Accelerator Driven Experiment).

Результаты расчетов активности по SNT.1 сравнивались с расчетами других программных кодов: FISPACT, SP-FISPACT ANITA-IEAF (рис. 5).

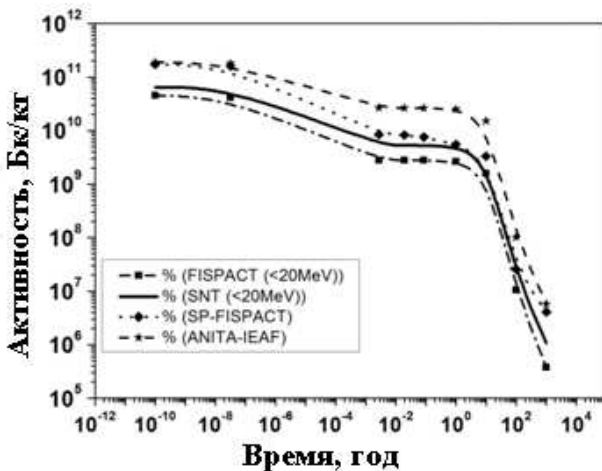


Рис. 5. Результаты расчета активности по различным программам

Расчеты, проводимые с помощью программы SNT.1, согласуются с расчетами по другим современным программам, даже с учетом того, что методы решения уравнения Бэйтмана, реализуемые в этих программах, различны. Программа SNT.1 может быть использована для проведения расчетов изотопного состава и активности облученных материалов.

Представлена схема оценки токсичности, которая имеет важное значение с практической точки зрения для определения потенциальной биологической опасности радионуклидов.

Расчет радиотоксичности проводится для двух категорий граждан: сотрудники (workers) и взрослые граждане (adult public); а также двух видов токсичности в зависимости от типа попадания нуклида в организм: поглощенная токсичность (ingestion toxicity) и ингаляционная токсичность (inhalation toxicity). Расчет радиотоксичности проводится в единицах ALI (Annual Limit of Intake – годовой предел потребления) и определяется как

$$tox_i = \frac{\lambda_i N_i}{ALI_i},$$

где  $N_i$  - количество  $i$ -го радиоактивного изотопа,  $\lambda_i$  - постоянная радиоактивного распада,  $ALI_i$  - наименьшая величина потребления радиоактивного вещества человеком в год, которая не приводит к превышению предела поглощенной дозы. Эта величина выражена, как

$$ALI_i = \frac{0,02}{e(50)} - \text{для сотрудников и}$$

$$ALI_i = \frac{0,001}{e(50)} - \text{для взрослых граждан,}$$

где 0,02 и 0,001 – средние годовые дозы соответственно для сотрудников и взрослых граждан в Зв;  $e(50)$  – дозовые коэффициенты для различных органов в Зв/Бк.

Была сформирована база данных по дозовым коэффициентам для всех изотопов для различных органов и тканей. Для каждого изотопа приведены зависимость активности от времени и результаты расчета токсичности для различных органов и тканей в виде таблицы и графиков.

В главе 3 дано описание нейронных сетей, рассмотрено их использование для получения сечений реакций. Дано определение нейронной сети, приведены её основные свойства и недостатки, наиболее распространенные функции активации, структура. Проведен выбор структуры нейронной сети для наиболее эффективной аппроксимации данных. Для этого было взято четыре структуры нейронной сети: Newfit, Newpr, RBF, GRNN (рис. 6) и проделана для каждой из них аппроксимация данных по сечениям реакций  $^{209}\text{Bi}(p,4n)^{206}\text{Po}$ , которые брались из библиотеки экспериментальных данных EXFOR. Реализация нейронных сетей производилась в системе MatLab. Для выбора структуры сети, наилучшим образом описывающей экспериментальные данные, был проведен расчет и анализ факторов согласия (F, D, R, H), рекомендованных МАГАТЭ для анализа и сравнения расчетных сечений ядерных реакций с экспериментальными.

В дополнение к анализу с помощью факторов согласия для выбора структуры нейронной сети был впервые использован метод статистического сравнения данных по сечениям ядерных реакций.

Данный метод заключается в том, что при анализе данных по сечениям ядерных реакций использовалась двухмерная величина

$SRMS = (\bar{S}, RMS)$ , где  $\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^M S_i}{M}$  есть среднее значение распределения «нормализованных значимостей различия»,

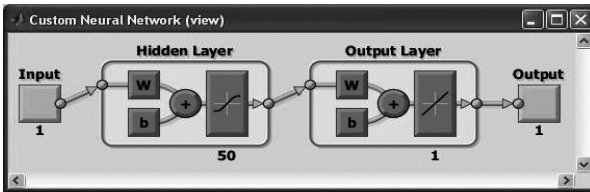
а  $RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (S_i - \bar{S})^2}{M}}$  – среднее квадратичное отклонение этого распределения.

Для сравнения двух наборов данных значимость различия в соответствующих точках измерения задается следующим образом:

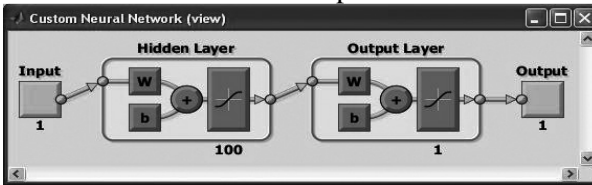
$$S_i = \frac{n_{i1} - n_{i2}}{\sqrt{\sigma_{i1}^2 + \sigma_{i2}^2}},$$

где  $n_{ik}$  – наблюдаемое значение в точке измерения  $i$ -го набора данных  $k$ ;  $\sigma_{ik}$  – соответствующее стандартное отклонение.

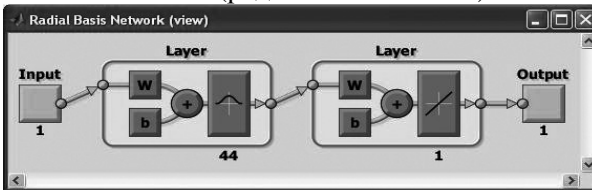
Newfit



Newpr



RBF (радиально-базисная)



GRNN (обобщенно-регрессионная)

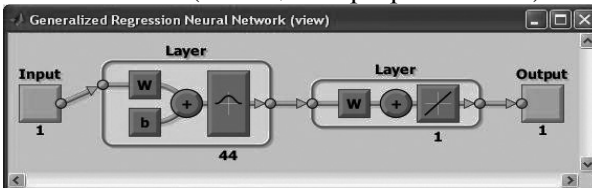


Рис. 6. Схемы нейронной сети

Для каждого из сравниваемых наборов данных проводится генерация повторных наборов в соответствии с нормальным законом распределения. Это позволяет создать две имитационные модели генеральных совокупностей наборов данных для сравниваемых наборов данных. В ходе каждого сравнения строится распределение значимостей различия в соответствующих точках измерения и определяется среднее и среднеквадратическое полученного распределения. Полученные величины используются для проверки гипотезы о принадлежности наборов данных одной или разным генеральным совокупностям.

Приведенный метод был реализован в программе, предназначенной для анализа данных или расчетных моделей. Программа написана на языке программирования C#. Пользователю необходимо задать число клонов (повторных генераций), ошибку первого рода и выбрать файл с данными. Результаты водятся в виде графиков распределений  $S$  и  $RMS$  (рис. 7).

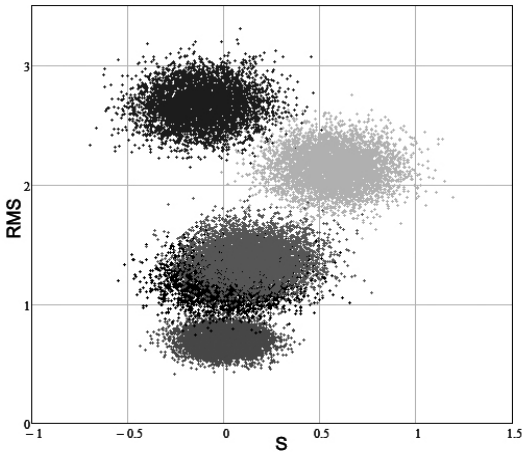


Рис. 7. Распределения  $S$  и  $RMS$ : нижнее пятно (калибровочное) соответствует экспериментальным данным; верхнее левое пятно – результат сравнения данных для Newfit и экспериментальных данных; верхнее правое пятно – результат сравнения Newpr с экспериментальными данными, два центральных пятна (почти полностью пересекающихся) – результат сравнения RBF и GRNN с экспериментальными данными

В результате анализа было выбрано две структуры нейронных сетей RBF и GRNN. В качестве функции активации в этих сетях используется радиально-базисная функция.

Для проверки возможности восстановления и получения данных с использованием нейронной сети были взяты данные по полному сечению реакций при взаимодействии нейтронов с ядрами  $^{209}\text{Bi}$  для диапазона энергий от 150 до 1000 МэВ из библиотеки экспериментальных данных EXFOR. Из этих данных было выделено две области: одна, где сечения ядерных реакций уменьшались с увеличением энергии в диапазоне от 150 до 200 МэВ, и другая, где сначала сечение ядерных реакций уменьшается, затем возрастает с увеличением энергии от 200 до 400 МэВ. Для этих областей проведено восстановление данных по сечениям ядерных реакций с использованием двух структур нейронной сети RBF и GRNN (рис. 8, 9). Нейронные сети могут быть использованы не только для аппроксимации имеющихся экспериментальных данных, но и для их получения в случае, если отсутствует возможность использования специализированных программ и кодов для расчета сечений ядерных реакций.

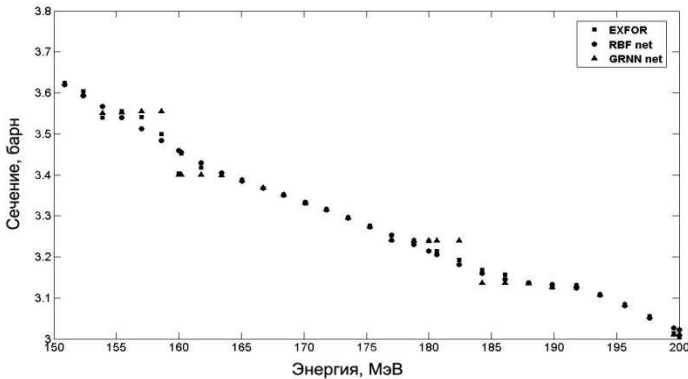


Рис. 8. Результаты расчета сечений ядерных реакций для области 150–200 МэВ



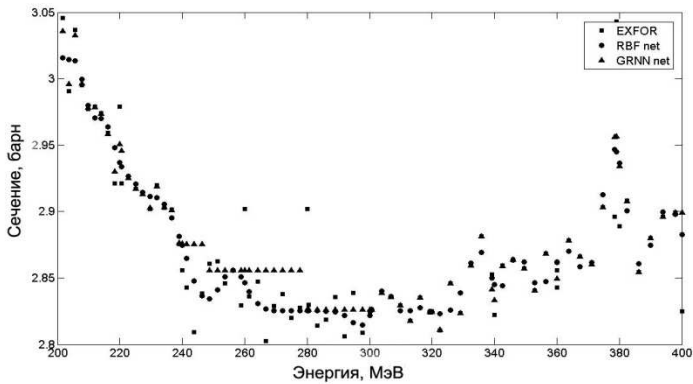


Рис. 9. Результаты расчета сечений ядерных реакций для области 200–400 МэВ

В главе 4 дано описание ряда моделей, используемых для расчета сечений ядерных реакций. Приведены описание модели образования кластеров ядер, реализованной в новой версии CASCADE/INPE, а также расчеты сечений с использованием этой модели и результаты расчетов.

С помощью новой версии CASCADE/INPE проведены расчеты сечений ядерных реакций с образованием кластеров ядер. Результаты расчетов приведены в виде графиков (рис. 10 – 15).

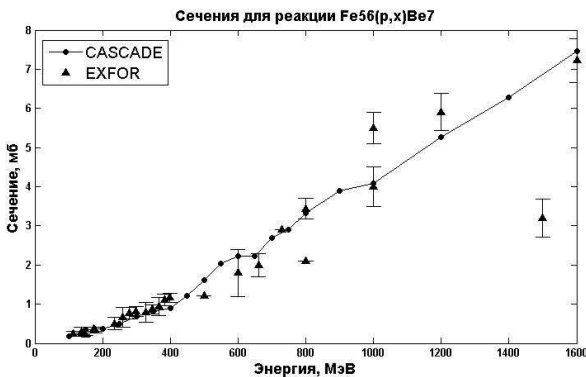


Рис. 10. Экспериментальные и расчетные сечения для реакции  $^{56}\text{Fe}(p, x)^7\text{Be}$

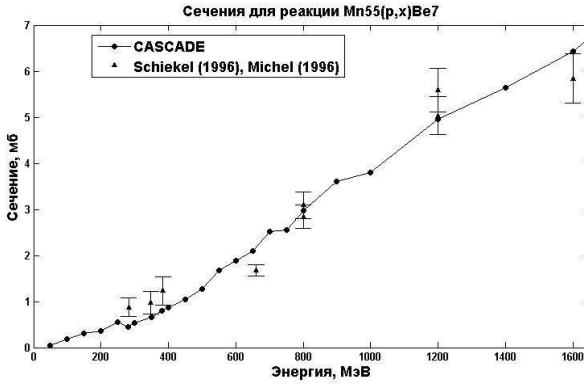


Рис. 11.  
Экспериментальные и расчетные сечения для реакции  $^{55}\text{Mn}(p, x)^7\text{Be}$

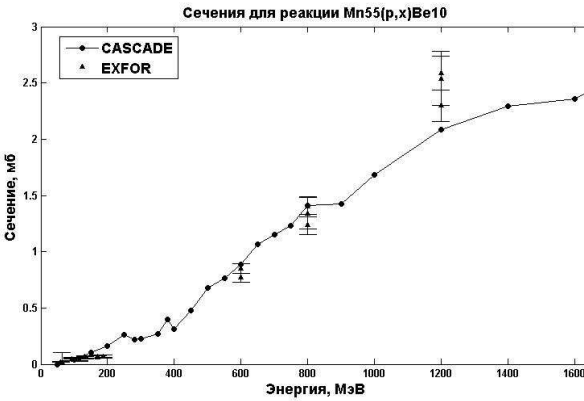


Рис. 12.  
Экспериментальные и расчетные сечения для реакции  $^{55}\text{Mn}(p, x)^{10}\text{Be}$

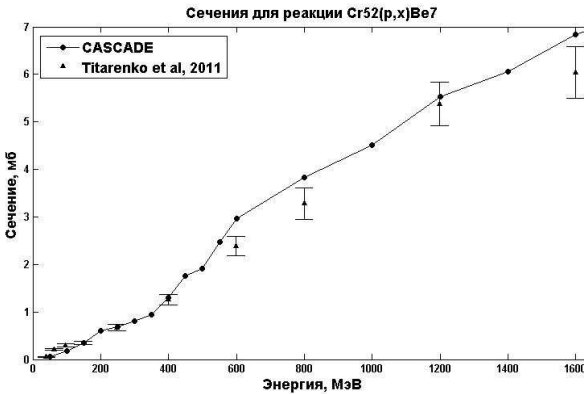


Рис. 13.  
Экспериментальные и расчетные сечения для реакции  $^{52}\text{Cr}(p, x)^7\text{Be}$

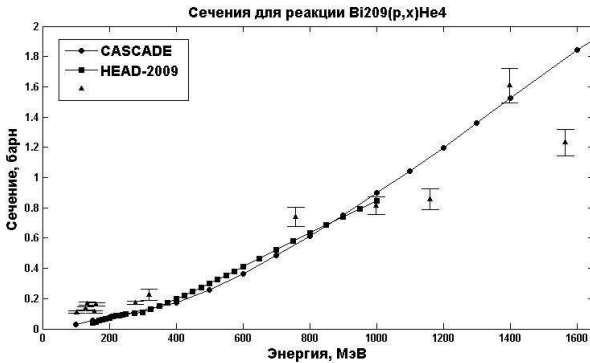


Рис. 14.  
Экспериментальные и расчетные сечения и данные из HEAD-2009 для реакции  $^{209}\text{Bi}(p, x)^4\text{He}$

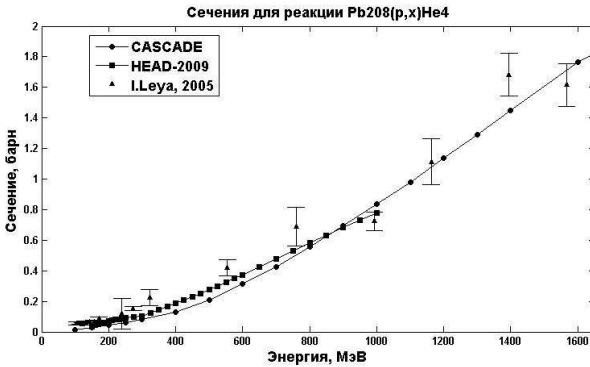


Рис. 15.  
Экспериментальные и расчетные сечения и данные из HEAD-2009 для реакции  $^{208}\text{Pb}(p, x)^4\text{He}$

Близость расчетных значений к эксперименту оценена с помощью факторов согласия. Результаты расчетов сравнивались с расчетами по другим моделям и сечениями из библиотеки активационных данных HEAD-2009.

Проделан анализ и сравнение полученных расчетных данных по сечениям ядерных реакций с экспериментальными данными с помощью метода статистического сравнения данных. На рисунке 16 приведены распределения S и RMS для данных по сечениям для реакции  $^{56}\text{Fe}(p, x)^7\text{Be}$  для энергий налетающих протонов  $E_p > 300$  МэВ.

Два распределения практически полностью пересекаются и с вероятностью 80% расчетные и экспериментальные данные по сечениям для выбранной реакции принадлежат одной генеральной совокупности. Это означает, что расчетные значения, полученные с использованием модели образования кластеров, хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

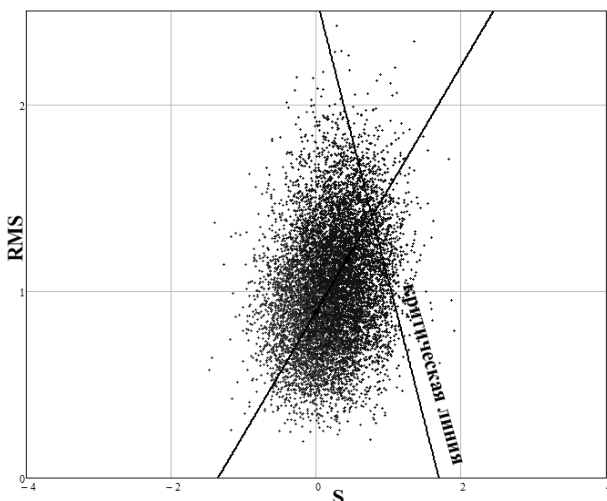


Рис. 16. Распределения  $S$  и  $RMS$ : нижнее пятно (калибровочное) соответствует экспериментальным данным; верхнее пятно – результат сравнения для CASCADE/INPE

На рис. 17 приведены распределения  $S$  и  $RMS$  для данных по сечениям для реакции  $^{52}\text{Cr}(p, x)^7\text{Be}$  для энергий налетающих протонов  $E_p < 300$  МэВ. Как видно из графиков распределений, расчетные данные по сечениям для реакции  $^{52}\text{Cr}(p, x)^7\text{Be}$ , полученные в ALICE-ASH, хорошо описывают экспериментальные данные и могут быть использованы для дальнейших расчетов. Распределение для данных по сечениям, полученных с помощью CASCADE/INPE, не пересекается с калибровочным. В энергетическом диапазоне  $E_p < 300$  МэВ не рекомендуется использовать расчетную модель, заложенную в программе для получения расчетных данных по сечениям ядерных реакций.

Аналогичный анализ данных был проведен с помощью факторов согласия, результаты расчета которых представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения факторов согласия

	F	D	R	H
CASCADE/INPE	1.56	0.24	0.83	3.05
ALICE-ASH	1.17	0.11	0.96	1.00

Анализ с помощью факторов согласия также показал, что расчетные данные, полученные в ALICE-ASH, лучше описывают экспериментальные данные.

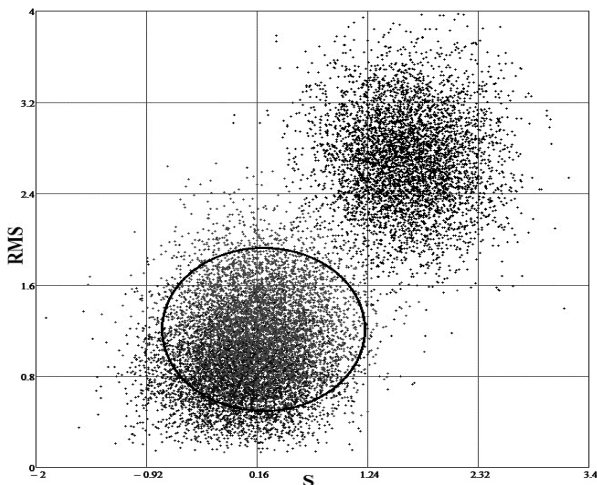


Рис. 17. Распределения  $S$  и  $RMS$ : нижнее пятно (калибровочное) соответствует экспериментальным данным; верхнее правое пятно – результат сравнения данных, полученных в CASCADE/INPE; нижнее пятно, границы которого выделены на рисунке эллипсом, соответствует расчетным данным, полученным в ALICE-ASH

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Создана интерактивная система по расчету изотопного состава, наведенной активности и радиотоксичности облученных материалов инновационных электроядерных установок, имеющая простой графический интерфейс и возможность вывода результатов расчета в виде графиков и таблиц. Расчет изотопного состава и активности материалов проводится с учетом режима работы ускорительной установки (учитывается изменение со временем тока установки и спектра нейтронов и протонов в облучаемой мишени), что повышает точность расчетов изотопного состава, активности и радиотоксичности.

2. С использованием нейронных сетей получены значения сечений ядерных реакций. Проведен анализ качества аппроксимации экспериментальных данных с использованием метода статистического сравнения, выбраны структуры сетей.

3. Проведен анализ расчетных сечений реакций, полученных по новой версии CASCADE/INPE, с включением модели образования кластеров. Показано, что полученные значения более точные по сравнению с моделями, в которых не учитывается образование кластеров. Расчетные значения сечений образования  ${}^7\text{Be}$  рекомендованы для обновления библиотеки HEAD-2009.

4. Создана программа для анализа данных по сечениям ядерных реакций на основе метода статистического сравнения, использование которой позволило провести анализ всех полученных расчетных значений сечений, показать эффективность использования нейронных сетей и повышение точности расчетов сечений в программе CASCADE/ INPE.

### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Саенко А.В., Тихоненко А.В. Реализация многофакторных моделей теплопроводности в многослойном устройстве со сферическими твэлами // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. – № 3. – С. 184–192.

2. Коровин Ю.А., Наталенко А.А., Саенко А.В. Верификация и валидация моделей высокоэнергетических нуклон-ядерных взаимодействий на базе программного комплекса CADEP // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. – Т. 1. – № 6. – С. 504–511.

3. Коровин Ю.А., Максимушкина А.В., Наталенко А.А. Интерактивная система по расчету изотопного состава и наведенной активности облученных материалов перспективных ЯЭУ // Вестник НИЯУ МИФИ. 2013. – Т. 2. – № 1. – С. 79–84.

4. Коровин Ю.А., Максимушкина А.В. Использование нейронных сетей для аппроксимации ядерно-физических данных // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. – Т. 5. – № 3. – С. 237–246.

5. Коровин Ю.А., Максимушкина А.В. Расчет изотопного состава и наведенной активности облученных материалов инновационных электроядерных установок // Известия вузов. Ядерная энергетика, №2, 2014. – С.51–59.

6. Битюков С.И., Красников Н.В., Максимушкина А.В., Никитенко А.Н., Смирнова В.В. Метод статистического сравнения данных и его применение для анализа экспериментальных ядерно-физических данных // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. – № 3. – С. 43–51.

7. Саенко А.В., Тихоненко А.В. Многофакторные модели теплопроводности и проблема высокотехнологичных способов защиты делящихся материалов / В сб.: Докл. междунар. конф. «Безопасность АЭС и подготовка кадров», Обнинск, 2009. – С. 68–69.

8. Саенко А.В., Коровин Ю.А. Модификация программ расчета изотопного состава и наведенной активности облученных материалов перспективных ЯЭУ / В сб.: Аннотации докл. научной сессии НИЯУ МИФИ-2010, Обнинск, 2010. – С. 233.

9. Саенко А.В., Коровин Ю.А. Расчет изотопного состава и наведенной активности облученных материалов инновационных ЯЭУ / В сб.: аннотации докл. научной сессии НИЯУ МИФИ-2011, Обнинск, 2011. –Т. 1. – С. 206.

10. Максимушкина А.В., Коровин Ю.А. Расчет изотопного состава и наведенной активности облученных материалов инновационных ЯЭУ / В сб.: Докл. V Междунар. конф. «Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания», Обнинск, 2011. – С. 91.

11. Максимушкина А.В., Тихоненко А.В. Многофакторные модели теплопроводности и проблема высокотехнологичных способов защиты делящихся материалов / В сб.: Докл. V междунар. конф. «Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания», Обнинск, 2011. – С. 92.

12. Максимушкина А.В., Коровин Ю.А. Интерактивная система по расчету изотопного состава и наведенной активности облученных материалов / В сб.: Докл. междунар. конф. «Безопасность АЭС и подготовка кадров», Обнинск, 2011. – С. 67–68.

13. Максимушкина А.В., Коровин Ю.А. Интерактивная система по расчету изотопного состава и наведенной активности облученных материалов / В сб.: Аннотации докл. научной сессии НИЯУ МИФИ-2012, Обнинск, 2012. –Т. 1. – С.204.

14. Максимушкина А.В., Коровин Ю.А. Оценка токсичности с помощью программы SNT.1 / В сб.: Аннотации докл. научной сессии НИЯУ МИФИ-2013, Обнинск, 2013. – Т. 1. – С.7.

15. Максимушкина А.В., Коровин Ю.А. Использование нейронных сетей для аппроксимации ядерно-энергетических данных / В сб.: Докл. междунар. конф. «Безопасность АЭС и подготовка кадров», Обнинск, 2013. – С. 245–246.

16. Максимушкина А.В., Коровин Ю.А. Использование нейронных сетей для аппроксимации ядерно-физических данных / В сб.: Аннотации докл. научной сессии НИЯУ МИФИ-2014, Обнинск, 2014. –Т. 3. – С. 256.

17. Максимушкина А.В. Интерактивная система по расчету изотопного состава и наведенной активности облученных материалов / В сб.: Докл. итогового мероприятия по программе "Умник-2014" «Молодежные инновации Калужской области», Калуга, 2014. – С. 59.

18. Максимушкина А.В., Смирнова В.В. Метод статистического сравнения данных / В сб.: Аннотации докл. научной сессии НИЯУ МИФИ-2015, Обнинск, 2015. – Т. 3. – С. 313.

19. Фролова Т.А., Коровин Ю.А., Максимушкина А.В. Расчет сечений ядерных реакций с выходом кластеров в диапазоне энергий от 30 МэВ до 2.6 ГэВ / В сб.: Аннотации докл. научной сессии НИЯУ МИФИ-2015, Обнинск, 2015. – Т. 1. – С. 312.

Компьютерная верстка А.В. Максимушкина

ЛР № 020713 от 27.04.1998

Подписано к печати

Формат 60×84/16

Печать ризограф

Бумага SvetoCopy

Печ.л. 1. 5

Заказ №

Тираж 60

Цена договорная

Отдел множительной техники ИАТЭ

249040, г. Обнинск, Студгородок, 1