

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ имени Б.И. СТЕПАНОВА»
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ**

УДК 539.01.08:53.072.8:539.12.04

**ЭЛЬМАНСУРИ
АЛИ МАСУД**

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ
АКТИВНОСТЯМИ РАДИОНУКЛИДОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ
РБМК-1000 И АВАРИЙНЫХ ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ
ВЫПАДЕНИЯХ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Минск, 2009

Работа выполнена в государственном научном учреждении «Институт физики им. Б. И. Степанова» Национальной Академии Наук Беларуси

Научный руководитель: **Рудак Эдуард Аркадьевич**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник лаборатории теоретической физики ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова» НАН Беларуси

Официальные оппоненты: **Кувшинов Вячеслав Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор Объединенного института энергетических и ядерных исследований-«Сосны» НАН Беларуси

Гурачевский Валерий Леонидович
кандидат физико-математических наук, доцент кафедры управления и научно-технического прогресса ИПКиПКАП БГАТУ

Оппонирующая организация: **Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова**

Защита состоится 20 марта 2009 г. в 15 ч. 30 мин. на заседании совета по защите диссертаций Д 01.05.02 при Институте физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси (220072, г. Минск, пр. Независимости, 68; тел.: +375 17 2840441, e-mail: vyblyi@dragon.bas-net.by).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси

Автореферат разослан « ____ » февраля 2009 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук



Ю.П. Выблый

ВВЕДЕНИЕ

Авария на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 года повлекла за собой много тяжелых последствий, в ходе ликвидации которых был задействован практически весь научно-технический потенциал СССР того времени. Особое место здесь занимают физические исследования (конструкция и надежность работы ядерных реакторов, расчет наработки нуклидов в тепловых реакторах в зависимости от времени работы реактора, ядерно-физическая измерительная аппаратура и многое другое).

В этом плане одним из наиболее важных и интересных в научном отношении аспектом аварии на Чернобыльской АЭС является возможность проверить на практике результаты теоретических расчетов радионуклидного состава активной зоны РБМК-1000 непосредственным сравнением их с результатами экспериментальных исследований загрязнения почв радиоактивными выпадениями чернобыльского происхождения.

В данной диссертационной работе основное внимание уделяется анализу экспериментальных данных по загрязнению почв Гомельской и Могилевской областей аварийными чернобыльскими выбросами, аналитическим оценкам наработки удельных масс и активностей нуклидов и отношений между ними в РБМК-1000 ЧАЭС, сравнению экспериментальных отношений между активностями радионуклидов на местности с рассчитанными теоретически

При анализе данных эксперимента нельзя исключать возможность наличия недостоверных данных как вследствие технических причин, так и вследствие человеческого фактора. Наиболее надежные по качеству измерений и по количеству спектрометрической информации данные, особенно в первые недели и месяцы после аварии, были получены, по-видимому, в Институте ядерных исследований АН БССР.

Основной объем проведенных измерений составляют спектрометрические измерения γ -излучающих изотопов. Измерений содержания стронция и плутония выполнено значительно меньше как вследствие меньшей распространенности этих радионуклидов, так и по причине сложности проведения их измерений.

В процессе обследования радиоактивного загрязнения территории, особенно на начальных этапах, пришлось встретиться с трудностью оценки достоверности получаемых результатов. Вследствие весьма сжатых сроков работы и связанной с этим необходимостью привлечения большого количества сотрудников, не имевших прежде необходимого опыта, нередко наблюдался большой разброс данных, относящихся к одному и тому же населенному пункту. Требовался критерий, позволяющий оперативно оценивать "качество" измеренной пробы.

В литературе был предложен экспресс-метод такой оценки, основанный на сравнении мощности экспозиционной дозы, измеренной при отборе пробы, $MЭД_{изм}$ с расчетной $MЭД_{расч}$, восстановленной по измеренному радионуклидному составу загрязнения данной пробы. Учитывая порядок

погрешностей при отборе и измерении пробы. Она считалась достоверной, если $MЭД_{изм}$ и $MЭД_{расч}$ отличались одна от другой в любую сторону не более чем в 2 раза.

Несмотря на простоту, этот метод оценки позволил быстро отбраковать большое количество недостоверных проб и подтвердил свою результативность в процессе последующих измерений повторно отобранных проб вместо отбракованных. Однако следует отметить, что описанный способ не позволяет оценить качество данных для радионуклидов, вносящих малозаметный вклад в МЭД.

Все эти обстоятельства учитывались в настоящей диссертационной работе при анализе экспериментальных данных по загрязнению почв γ -излучающими осколками деления чернобыльского происхождения. На основании этого анализа было предложено в качестве критерия при оценке экспериментальных данных использовать отношения между активностями осколков деления одного и того же химического элемента типа $\rho(Ru) = A(^{106}Ru)/A(^{103}Ru)$, $\rho(Cs) = A(^{134}Cs)/A(^{137}Cs)$, $\rho(Ce) = A(^{144}Ce)/A(^{141}Ce)$ и другие.

Основная цель работы связана с верификацией экспериментальных данных по загрязнению почв γ -излучающими осколками деления, использованием их для косвенного определения уровней загрязнения почв α -излучающими изотопами ТУЭ как в Гомельской, так и в Могилевской областях.

Актуальность данной проблемы подчеркивается и в Национальных докладах РБ, посвященных 10-, 15- и 20-летию аварии на ЧАЭС. естественная убыль α -излучающих изотопов ТУЭ за счет распада пренебрежимо мала из-за большого периода их распада.

В связи с этим особый интерес представляют работы по изучению скорости миграции изотопов ТУЭ вглубь почвы в зависимости от типа почвы, расстояния от ЧАЭС и других факторов.

Верификации экспериментальных данных по загрязнению почв γ -излучающими осколками деления и использованию их для косвенного определения уровней загрязнения почв изотопами ТУЭ и подчинены все исследования, которые проводились в данной диссертационной работе.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Исследования, составившие тему диссертации, выполнялись в 2004-2007 годах в соответствии с утвержденными планами научных работ Института физики НАН Беларуси.

Тема диссертации соответствует следующим приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь:

* физика фундаментальных взаимодействий, ядерных реакций, квантовых систем и топологически нетривиальных объектов;

* радиационные и ядерно-физические технологии с использованием релятивистских пучков электронов, гамма-квантов и нейтронов;

* методы мониторинга окружающей среды, прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера;

* защитные меры по преодолению отдаленных радиэкологических и медико-биологических последствий Чернобыльской катастрофы.

Изложенные в диссертации результаты были получены при участии соискателя в выполнении следующих заданий и крупных проектов:

1. Проекта «Исследовать взаимное влияние радиоактивных загрязнений на радиационную обстановку приграничных территорий Беларуси и Украины после аварии на ЧАЭС», 2004-2006 г.г. (Исполнительная программа белорусско-украинского научно-технического сотрудничества на период 2004-2006 г.г., хоздоговор №790 от 20-12-2004 г между Институтом физики НАН Б (г.Минск), Национальным научным центром «Харьковский физико-технический институт» (г.Харьков), УО «Гомельский государственный университет им. Ф.Скорины» (г. Гомель).
2. Задания №32 «Исследование ядерных процессов и систем с участием нейтронов и гамма-квантов», 2006-2010 г.г. (Государственной программы фундаментальных исследований «Поля и частицы»-32, 2006-2010 г.г.)

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка метода проверки достоверности имеющихся экспериментальных данных по загрязнению почв Беларуси осколками делений и продуктами активации ядер топлива чернобыльского происхождения, возможности использования их для оценки радиационной обстановки приграничных территорий Беларуси и Украины после аварии на ЧАЭС.

Для достижения данной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Построить графики распределений экспериментальных отношений

плотностей загрязнений почв радионуклидами чернобыльского происхождения типа $A(^{134}\text{Cs})/A(^{137}\text{Cs})$, $A(^{106}\text{Ru})/A(^{103}\text{Ru})$, $A(^{106}\text{Ru})/A(^{137}\text{Cs})$ и т.д.

2. Разработать удобный в практическом отношении математический аппарат феноменологической модели для расчета активностей осколков деления в активной зоне теплового реактора с учетом деления ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu тепловыми нейтронами и ^{238}U нейтронами спектра деления.

3. Провести сравнение распределений рассчитанных теоретически отношений активностей ряда радионуклидов ($^{89,90}\text{Sr}$, ^{95}Zr , $^{103,106}\text{Ru}$, ^{131}I , $^{134,137}\text{Cs}$, $^{141,144}\text{Ce}$ и др.) для активной зоны РБМК-1000 с аналогичными распределениями экспериментальных отношений для территорий, находящихся на различных расстояниях от ЧАЭС.

4. Определить условия, необходимые для корректного определения косвенным методом уровней загрязнения почв трудно измеряемыми α - и β -излучающими изотопами ТУЭ, ^{90}Sr и т.д. по легко измеряемому γ -излучению ^{95}Zr , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{134,137}\text{Cs}$, $^{141,144}\text{Ce}$ и т.д.

Положения, выносимые на защиту

- Приближенное решение в аналитическом виде системы уравнений Бейтмана для активностей членов изобарных цепочек с периодом полураспада порядка суток и более с учетом четырех делящихся нуклидов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) и разработка на его основе феноменологической модели для оценки масс и активностей осколков деления в тепловых реакторах.

- Усредненная по выгоранию топлива оценка в рамках указанной феноменологической модели накопленных активностей наиболее важных в радиоэкологическом отношении осколков деления на момент аварии РБМК-1000 ЧАЭС и сравнение их с результатами аналогичных численных расчетов.

- Аппроксимация зависимостей удельных активностей изотопов ТУЭ от времени работы реактора t функциями типа $\alpha \cdot t^{\beta} \cdot e^{-\gamma t}$ для тепловых реакторов ВВЭР-440 с обогащением по ^{235}U 1.6, 2.4, 3.3, 3.6%, ВВЭР-1000 с обогащением по ^{235}U 4.4%, РБМК-1000 с обогащением по ^{235}U 2.0%.

- Результаты анализа экспериментальных данных по отношениям плотностей загрязнения радионуклидами для ряда районов Гомельской и Могилевской областей и результаты аппроксимации для РБМК-1000 отношений удельных активностей нуклидов временном интервале $t \sim 1,35 \div 2,7$ года.

Личный вклад соискателя

Общее направление исследований и постановка задач были сформулированы научным руководителем, доктором физ.-мат. наук Э.А. Рудаком.

Соискателем была лично проделана следующая работа:

- Математическая обработка, табулирование и графическое представление экспериментальных данных по уровням загрязнения почв осколками деления и продуктами активации ядер топлива.

- Вычисление зависящих от времени работы теплового реактора эффективных суммарных выходов радионуклидов с учетом деления ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu тепловыми нейтронами и ^{238}U нейтронами спектра деления.

- Вычисление зависимостей от времени работы теплового реактора удельных масс и удельных активностей осколков деления, имеющих наибольший практический интерес в радиозоологии.

- Вычисление уровней загрязнения почв изотопами плутония ^{239}Pu + ^{240}Pu с помощью корреляционных соотношений типа $\rho(W) = A_1(W)/A_2(W) \approx \text{const} \cdot W$.

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались и опубликованы в материалах следующих совещаний и конференций:

1. Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2004: экологические проблемы XXI века», 23-25 мая Минск,
2. Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2005: экологические проблемы XXI века», 21-22 мая, Минск,
3. III Международная научно-практическая конференция «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация», 7-9 июня 2005г., Минск,
4. III Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 28 февраля-4 марта 2005 г., Харьков, Украина,
5. Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2006 года: экологические проблемы XXI века». Минск, 17-18 мая 2006 г.,
6. IV Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. 27 февраля – 3 марта 2006 г., Харьков, Украина,
7. Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях, 2006, 24-26 октября, Обнинск, Россия,
8. Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2007 года: экологические проблемы XXI века». Минск, 17-18 мая 2007 г.,

9. 6-ой международный симпозиум «Актуальные проблемы дозиметрии» в рамках XV Международной научно-практической конференции “Экология человека в постчернобыльский период”. Минск, 28-30 ноября 2007 г.,
10. V конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 26 февраля - 2 марта 2007 года, 2007 г., Харьков, Украина,
11. VI конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 25 - 29 февраля 2008 года, Харьков, Украина.

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 4 статьи: из них 2 в российском рецензируемом журнале «Атомная энергия», 1 в украинском рецензируемом журнале «Вопросы атомной науки и техники» и 1 в литовском рецензируемом журнале «Литовский физический журнал», 1 препринте Института физики НАН Беларуси, 12 тезисах докладов и докладах, в том числе 6 в зарубежных изданиях. Общий объем опубликованного материала составляет 9,7 авторского листа, из них в реферируемых изданиях – 3,0 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, приложения и библиографического списка из наименований (78 использованных источника, 17 публикаций соискателя). Объем составляет 114 страниц, включая 28 рисунков и 34 таблицы).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации.

В главе 1 приведены общие сведения об аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году, дан краткий обзор литературных источников по вопросу радиоактивного загрязнения чернобыльского происхождения, проведен анализ структуры радиоактивных выбросов на разных стадиях аварии.

В разделе 1.1 на основании обзора литературных источников за 10-летний период с момента аварии сформулирована общая точка зрения на характер развития аварии, величину и структуру аварийного выброса радионуклидов, отражающая результаты исследований российских, украинских и белорусских ученых.

В разделе 1.2 дана характеристика радиоактивных выбросов на разных стадиях аварии. В соответствии с имеющимися в литературе данными выделены 4 стадии аварийных выбросов. На первой стадии (до 14 часов 26 апреля) имел место механический выброс диспергированного топлива, образовавшегося вследствие инициированного взрыва реактора. Радионуклидный состав выброса соответствует топливу реактора с обогащением по летучим нуклидам йода, теллура и цезия.

На второй стадии (с 26 апреля по 2 мая) выброс обусловлен горением графита. В основном это также мелкодисперсные частицы топлива, осевшие на продуктах горения графита, и выносимые из реактора потоком горячего воздуха. Третья стадия (3-5 мая) характеризуется быстрым повышением температуры топливосодержащих масс. Сначала в выбросе преобладают летучие элементы (в первую очередь йод), а затем состав выброса становится близким к топливу. Одновременно происходят химические процессы окисления диоксида урана и ряда других элементов (образуются не связанные с урановой матрицей летучие соединения рутения, плутония). Выброс радионуклидов происходит в форме аэрозолей или на продуктах горения графита. Четвертая стадия (с 6 мая) характеризуется резким спадом выброса радиоактивных продуктов вследствие истечения расплавленной топливной массы в расположенные ниже помещения.

В дальнейшем гораздо меньшие по интенсивности выбросы имели место и в июне.

Согласно работам многих авторов, предполагается, что в 30-км зоне изотопы плутония, как и некоторые осколки деления (^{95}Zr , ^{99}Mo , ^{141}Ce , ^{144}Ce и др.) тугоплавких химических элементов, находятся в составе топливных частиц. Выброс изотопов плутония в составе топливных частиц оценивался примерно в 3,5% от общего количества топлива и содержащихся в нем изотопов ТУЭ. При этом основная масса этого выброса сосредоточена

именно в 30-км зоне. По-видимому, близкие по составу к мелкодисперсному топливу выбросы могли происходить на первых трех стадиях аварии.

Указанные выше нуклиды, входящие в состав топливной матрицы, относятся к так называемым «нелетучим» нуклидам. Часть нуклидов считается «летучей» - радиоактивные благородные газы, изотопы йода, цезия. Изотопы рутения, стронция, бария ведут себя в зависимости от обстоятельств то как «нелетучие» (в составе топливной матрицы), то как «летучие» (в составе аэрозолей, на продуктах горения графита и т.д.).

В связи с этим встает вопрос, как можно отличить «летучую» и «нелетучую» форму выпадений и можно ли сделать это вообще? В диссертационной работе показано, что это может быть сделано. Так, согласно расчетам, в топливе аварийного РБМК ЧАЭС отношения средних активностей $\rho(^{95}\text{Zr}, ^{103}\text{Ru}) = \langle A(^{95}\text{Zr}) \rangle / \langle A(^{103}\text{Ru}) \rangle \approx 1,1$, $\rho(^{95}\text{Zr}, ^{106}\text{Ru}) = \langle A(^{95}\text{Zr}) \rangle / \langle A(^{106}\text{Ru}) \rangle \approx 4,3$, $\rho(^{95}\text{Zr}, ^{137}\text{Cs}) = \langle A(^{95}\text{Zr}) \rangle / \langle A(^{137}\text{Cs}) \rangle \approx 22$, $\rho(^{95}\text{Zr}, ^{141}\text{Ce}) = \langle A(^{95}\text{Zr}) \rangle / \langle A(^{141}\text{Ce}) \rangle \approx 1$ и $\rho(^{95}\text{Zr}, ^{144}\text{Ce}) = \langle A(^{95}\text{Zr}) \rangle / \langle A(^{144}\text{Ce}) \rangle \approx 1,5$. Поэтому сравнение экспериментальных отношений активностей с теоретическими позволяет судить о характере локальных радиоактивных выпадений.

В разделе 1.3 на основе литературных данных проведен анализ качественного и количественного состава выброса радионуклеидов при аварии.

Изучению качественного и количественного состава аварийного чернобыльского выброса, хронологии выброса посвящено большое количество работ, согласно которым за исключением благородных газов и ^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs , ^{137}Cs , остальные радионуклиды тесно связаны с топливом, выброс которого оценивается примерно в 3,5%, т.е. ~6,7 т. Обычно предполагается, что жестко связанные с топливной матрицей нуклиды выпали в основном в 30-км зоне. Так радиологическая значимость выпадений ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ для стран Западной Европы невелика по сравнению со ^{137}Cs .

Карта загрязненной $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ территории находится внутри 30-км зоны. Фактически выбросы ^{239}Pu и ^{240}Pu в аэрозольной форме, которые могут распространяться и на большие расстояния от ЧАЭС (сотни и тысячи км), считаются пренебрежимо малыми по сравнению с выбросами ^{239}Pu и ^{240}Pu в составе топливных частиц.

В действительности высокие уровни загрязнения почвы изотопами $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ встречаются и на большом расстоянии от ЧАЭС.

В отношении выброса йода следует иметь в виду, что согласно истории облучения активной зоны и содержания нуклидов в аварийном РБМК-1000 ЧАЭС, рассчитанной с помощью программ SHS-2/ORIGEN-5, с

20-21 апреля реактор или был остановлен, или работал на мощности 5-7% от номинальной.

Принципиальный интерес представляют исследования процесса образования чернобыльских лав. Поскольку не был обнаружен диоксид UO_2 , то был сделан вывод о том, что температура была выше $2860^\circ C$.

Подтверждением возможного выброса изотопов ТУЭ в аэрозольной форме может служить обнаруженная корреляция между активностями ^{131}I и $^{239,240}Pu$ в мае 1986 г. в дождевой воде в Арканзасе (США).

Проведенный анализ дает достаточно полную картину радиоактивного загрязнения в настоящее время. Актуальными являются исследования по долгосрочному прогнозированию уровней загрязнения почв в 30-км зоне ЧАЭС и прилегающим к ней территориям.

В **главе 2** приведены теоретические оценки радионуклеидного состава активной зоны аварийного РБМК-1000 ЧАЭС.

В **разделе 2.1** изложены основы теории и методы расчета образования нуклидов в активной зоне теплового реактора. Основной физической величиной, характеризующей свойства аварийных реакторных выбросов, является коэффициент фракционирования $f_{i,95} = (A_i/A_{95})/(Y_i/Y_{95})$, где отношение активностей Y_i/Y_{95} рассчитывается теоретически для активной зоны аварийного реактора на момент аварии. Для этого, естественно, необходимо уметь корректно рассчитывать накопленные активности нуклидов в активной зоне реактора

Все процессы, описывающие превращения нуклидов в ядерных реакторах, базируются на условиях баланса. Условия баланса могут быть простые – когда один нуклид за счет данной реакции превращается в другой нуклид, или сложные – когда один нуклид с определенной вероятностью может превратиться в несколько.

В рассмотрение вводится вектор концентраций нуклидов $N(r,t) = \sum_i N(r,t,i)_{o.d.} + \sum_j N(r,t,j)_{п.а.}$, компонентами которого являются значения концентраций в точке r в момент t осколков деления i ядер топлива $N(r,t,i)_{o.d.}$ и продуктов активации j ядер топлива $N(r,t,j)_{п.а.}$. Изменение вектора концентраций нуклидов $N(r,t)$ во времени и определяет в конечном итоге радионуклеидный состав активной зоны реактора в момент времени t .

Поскольку выгорание топлива в ТВС происходит неравномерно, то количества наработанных нуклидов рассчитываются в каждой из ТВС активной зоны на основании данных о глубине выгорания топлива. Затем данные по каждой из ТВС суммируются и получаются данные по нуклеидному составу активной зоны в целом. В связи с этим возникают серьезные проблемы, связанные с необходимостью усреднения результатов.

Из-за сложности и громоздкости, расчеты проводят для ограниченного набора параметров, характеризующих тепловыделяющие сборки реакторов. Для каждого типа реакторов используется своя, так называемая эквивалентная ячейка для физических расчетов образования нуклидов при выгорании ядерного топлива.

Из-за неравномерного выгорания топлива определенные сложности возникают для нуклидов с нелинейной зависимостью наработки от глубины выгорания топлива. Особенно это касается изотопов трансурановых элементов. Необходимо усреднение результатов численных расчетов по распределению Пуассона для функции выгорания.

В разделе 2.2 приведены результаты численных расчетов радионуклидного состава активной зоны РБМК-1000 ЧАЭС.

Схема численных расчетов наработки осколков деления и продуктов активации ядер топлива дана в работе. На первом этапе моделируется процесс выгорания топлива в реакторе типа РБМК в течение всей кампании реактора (временной интервал $t = 0 - 3$ года, соответствующий интервал глубины выгорания $W = 0 - 18.2$ МВт \times сут/кг).

Затем с помощью программы WIMS-4D рассчитываются зависимости удельных масс нуклидов $m_{уд}$ от глубины выгорания. Процесс выгорания топлива моделируется пересчетом спектра нейтронов. Для реактора типа РБМК пересчет спектра нейтронов производится порядка 10 раз за кампанию реактора.

На втором этапе, на основании данных о глубине выгорания топлива в каждой из 1659-ти тепловыделяющих сборок (ТВС), были рассчитаны количества наработанных нуклидов в каждой ТВС. Массы этих нуклидов затем были покассетно просуммированы, и таким образом получены данные по массам и активностям нуклидов для всей активной зоны.

Полученные результаты численных расчетов радионуклидного состава активной зоны аварийного РБМК-1000 находятся в хорошем согласии с результатами других работ.

В разделе 2.3 разработана простая феноменологическая модель наработки нуклидов в активной зоне реактора на тепловых нейтронах, которая по строгости физического обоснования и по точности расчетов должна не уступать комплексам сложных ядерно-физических программ.

Известно, что суммарная масса наработанных в активной зоне реактора осколков деления и продуктов активации ядер топлива определяется выгоранием основных компонентов топлива - ^{235}U и ^{238}U . Это сложный физический процесс, зависящий от конструктивных особенностей реактора, режима работы реактора и действий оператора по поддержанию заданного режима.

Соответственно очень сложными являются и существующие численные методы описания данного процесса. Однако полученные этими методами результаты показывают, что скорость выгорания ^{235}U можно аппроксимировать простой экспоненциальной зависимостью от времени, что и является основой для разработки различных вариантов упрощенной феноменологической модели наработки осколков деления в тепловых реакторах.

В тепловых реакторах отношение сечения поглощения тепловых нейтронов ядрами ^{235}U σ_a к сечению деления σ_f $\rho = \sigma_a/\sigma_f$ очень слабо меняется в течение кампании реактора. Поэтому будем полагать, что скорость деления ядер ^{235}U

$$P_f(^{235}\text{U}, t) = P_{of} e^{-\lambda t},$$

где P_{of} и λ - константы.

В режиме постоянной мощности скорость делений ядер топлива примерно постоянна. Небольшая часть (порядка 2-3%) скорости делений приходится на деление ядер ^{238}U быстрыми нейтронами. Для упрощения расчетов мы ею пренебрегаем, хотя при необходимости это можно легко сделать. В конце кампании реактора небольшой вклад скорость деления может давать ^{241}Am . По указанным выше соображениям мы его также не будем учитывать.

На долю остальных дающих заметный вклад в энерговыработку нуклидов ^{239}Pu и ^{241}Pu приходится

$$P_f(^{239,241}\text{Pu}, t) = P_{of}(1 - e^{-\lambda t}).$$

При этом заметный вклад в энерговыработку ^{241}Pu дает лишь в конце кампании реактора. Кумулятивные выходы осколков деления $y^k(^{239}\text{Pu})$ и $y^k(^{241}\text{Pu})$ отличаются незначительно. Поэтому без особой погрешности основными делящимися нуклидами можно считать ^{235}U и ^{239}Pu , автоматически учитывающий и вклад ^{241}Pu , т.е. $P_f(^{239}\text{Pu}, t) \cong P_{of}(1 - e^{-\lambda t})$.

Полученные выражения для скоростей деления ^{235}U и ^{239}Pu позволяют получить оценку масс и активностей осколков деления в аналитическом виде. Известно, что именно для постоянной скорости деления и для скорости деления зависящей от времени экспоненциальным образом возможно получение аналитических выражений для активностей n членов линейной изобарной цепочки $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_i \rightarrow \dots \rightarrow A_n$, для чего необходимо решить систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 A_1(t)' &= \lambda_1 y_1^H p(t) - \lambda_1 A_1(t) \\
 A_2(t)' &= \lambda_2 y_2^H p(t) - \lambda_2 A_2(t) + \lambda_2 A_1(t) \\
 &\dots\dots\dots \\
 A_i(t)' &= \lambda_i y_i^H p(t) - \lambda_i A_i(t) + \lambda_i A_{i-1}(t)
 \end{aligned}$$

де i - текущий номер члена линейной цепочки, λ_i и $A_i(t)$ - константы распада и активность i -го члена линейной цепочки, y_i^H - абсолютный независимый выход i -го члена линейной цепочки, $p(t)$ - количество актов деления в единицу времени ядер определенного вида.

В нашем случае полная скорость делений ядер топлива

$$P_{of} = P_f(^{235}\text{U}, t) + P_f(^{239,241}\text{Pu}, t) \approx P_f(^{235}\text{U}, t) + P_f(^{239}\text{Pu}, t)$$

Приведенная система дифференциальных уравнений решается в аналитическом виде в двух случаях: $p(t) = \text{const}$ и $p(t) = p_0 \exp(-\lambda t)$. В предлагаемой модели это означает, что искомое решение для i -го члена линейной цепочки $A_i(t)$ будет являться суперпозицией решений трех задач:

$$A(t)_i = A(^{239}\text{Pu}, t)_c + A(^{235}\text{U}, t)_e + A(^{239}\text{Pu}, t)_e,$$

где $A(^{239}\text{Pu}, t)_c$ является решением задачи с делением с постоянной скоростью делений ^{239}Pu , $A(^{235}\text{U}, t)_e$ и $A(^{239}\text{Pu}, t)_e$ являются решением задачи с экспоненциально убывающей скоростью делений ^{235}U и ^{239}Pu соответственно. Общее решение $A_i(t)$ в случае ядер с периодом полураспада порядка суток и более можно представить в виде

$$A_i(t) = P_{of} y_i^k(^{239}\text{Pu}) [1 - \beta \exp(-\lambda t) - (1 + \beta) \exp(-\lambda_i t)],$$

где $\beta = \lambda_i [y_i^k(^{235}\text{U}) - y_i^k(^{239}\text{Pu})] / y_i^k(^{239}\text{Pu}) (\lambda_i - \lambda)$, λ_i - постоянная распада i -го члена изобарной цепочки и y_i^k - его суммарный выход.

В случае стабильных конечных нуклидов для их числа $N_i(t)$ получено выражение

$$\begin{aligned}
 N_i(t) &= P_{of} y_i^k(^{239}\text{Pu}) \{t + \sigma [1 - \exp(-\lambda t)]\} \\
 \sigma &= [y_i^k(^{235}\text{U}) - y_i^k(^{239}\text{Pu})] / y_i^k(^{239}\text{Pu}) \lambda.
 \end{aligned}$$

Примеры расчета масс стабильных нуклидов для РБМК-1000 приведены в ПРИЛОЖЕНИИ А диссертации.

В разделе 2.4 разработана феноменологическая модель наработки масс и активностей нуклидов в РБМК-1000 в приближении четырех делящихся нуклидов: ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu (тепловые нейтроны) и ^{238}U (нейтроны спектра деления). Удельная активность многих используемых в радиоэкологии продуктов деления ($^{89,90}\text{Sr}$, ^{91}Y , $^{95,97}\text{Zr}$, ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{125}Sb , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba , $^{141,143,144}\text{Ce}$ и др.), рассчитанная по приведенной выше упрощенной модели раздела 2.3, не учитывающей вкладов ^{238}U и ^{241}Pu в их наработку, практически совпала с результатами численных расчетов для аварийного РБМК-1000 Чернобыльской АЭС. Однако в случае ^{106}Ru наблюдалось заметное расхождение $\sim 10\%$. С физической точки зрения это кажется понятным, поскольку отношение суммарного выхода ^{106}Ru по ^{239}Pu и ^{235}U $y^c(^{106}\text{Ru}, ^{239}\text{Pu})/y^c(^{106}\text{Ru}, ^{235}\text{U}) \cong 11$.

В связи с этим в настоящей работе предложена более совершенная модель, учитывающая возможный вклад в наработку продуктов деления ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu (деление тепловыми нейтронами) и ^{238}U (нейтроны спектра деления). Это необходимо для более точного описания процесса наработки как ^{106}Ru , так и других нуклидов с сильно отличающимся суммарным выходом по ^{235}U и ^{239}Pu .

Такие нуклиды удобны при косвенном определении содержания изотопов трансурановых элементов в реакторном топливе и аварийных выбросах. В частности, еще более подходящим, чем ^{106}Ru , для этих целей является ^{111}Ag с $T_{1/2} = 7,45$ сут [$y^c(^{111}\text{Ag}, ^{239}\text{Pu})/y^c(^{111}\text{Ag}, ^{235}\text{U}) \cong 15$]. Представляет интерес и долгоживущий ^{125}Sb с $T_{1/2} = 2,73$ г [$y^c(^{125}\text{Sb}, ^{239}\text{Pu})/y^c(^{125}\text{Sb}, ^{235}\text{U}) \cong 3,8$].

В предлагаемой модели суммарная скорость делений ядер топлива также постоянна

$$P_{0f} = P(^{235}\text{U}, t)_f + P(^{238}\text{U}, t)_f + P(^{239}\text{Pu}, t)_f + P(^{241}\text{Pu}, t)_f .$$

Для расчета парциальной скорости деления $P(^{235}\text{U}, t)_f$, $P(^{238}\text{U}, t)_f$, $P(^{239}\text{Pu}, t)_f$ и $P(^{241}\text{Pu}, t)_f$ были использованы результаты численных расчетов зависимости удельной массы ядер топлива и продуктов их активации от времени для РБМК-1000 по модели «Центральная зона» с плотностью воды $d(\text{H}_2\text{O}) = 0,41$ г/см³ [44].

С использованием данной модели были проведены расчеты парциальной активности $A(^{106}\text{Ru}, ^{235}\text{U}, t)$, $A(^{106}\text{Ru}, ^{238}\text{U})$, суммарной удельной активности ^{106}Ru $A(^{106}\text{Ru}, t) = \sum A_{\text{парц}}$. Аналогичные расчеты были проведены для ^{111}Ag и ^{125}Sb . Очевидно, что для всех этих нуклидов учет деления ^{238}U и ^{241}Pu желателен, хотя и при использовании упрощенной модели расхождение между результатами аналитических и численных расчетов лежит в пределах 10%. Более полезным, на наш взгляд, является то обстоятельство, что при выполнении условий $\lambda_i \ll \lambda_j$ при $j < i$ приближенные аналитические решения $A_j(t)$ существуют и для скорости деления типа $P(t)_n \sim t^n$, где n – целые положительные числа. Вследствие

этого приближенные аналитические решения $A_j(t)$ должны существовать и для скорости деления $P(t)$, являющейся суперпозицией функций $P(t)_n$: $P(t) = \sum a_n t^n$, где a_n – константы.

В разделе 2.5 рассмотрена связь между наработками осколков деления и изотопов ТУЭ в активной зоне аварийного РБМК-1000 ЧАЭС. Известно, что трансурановые элементы по физико-химическим свойствам близки между собой. Поэтому достаточно изучить экспериментально распределение какого-либо одного или двух изотопов ТУЭ, чтобы затем простым пересчетом оценить вклады и остальных изотопов ТУЭ.

Для такого пересчета необходимо знать отношения между содержанием изотопов ТУЭ в реакторном топливе в зависимости от времени работы реактора, при этом необходимо учитывать, что выгорание топлива W является статистической величиной.

Предварительно рассчитанные численным способом активности и массы изотопов ТУЭ представлялись в виде $A(X_i, t) = C_a t^\alpha$ и $M(X_i, t) = C_b t^\alpha$, где C_a, C_b, α – подбираемые константы. При этом учитывалось, что реактор РБМК-1000 до аварии проработал примерно 1,8 года. Поэтому в расчетах можно ограничиться временным интервалом $t \sim 1,35 \div 2,7$ года, так как при меньших временах облучения изотопы трансурановых элементов нарабатываются в незначительных количествах. Затем время t заменялось на выгорание W и полученные выражения усреднялись по распределению Гаусса при среднем выгорании $\langle W \rangle = 11$ МВт·сут/кг. Полученные функции в свою очередь могут быть аппроксимированы функциями типа $A(X_i, t) = C_a t^\alpha$ и $M(X_i, t) = C_b t^\alpha$, в которых под временем t следует уже понимать среднее время $\langle t \rangle$, соответствующее среднему выгоранию $\langle W \rangle$. Используя полученные функции показано, что для РБМК-1000 разность суммарных активностей $\Delta A(^{137}\text{Cs}, ^{90}\text{Sr}, t) = A(^{137}\text{Cs}, t) - A(^{90}\text{Sr}, t)$ во всем временном интервале $t \sim 0 - 2,7$ г практически полностью обусловлена делением ^{239}Pu и может быть использована для оценки количества разделившихся ядер ^{239}Pu .

Глава 3 посвящена сравнению экспериментальных и теоретических отношений удельных активностей нуклидов в аварийных выпадениях РБМК-1000 ЧАЭС

В Разделе 3.1 проведена аппроксимация зависимостей удельных масс и активностей нуклидов в тепловых реакторах от времени работы реактора аналитическими функциями. В литературе имеется большой материал по расчетам зависимости удельных масс и удельных активностей нуклидов в активной зоне тепловых реакторов типа ВВЭР-440 с обогащением по ^{235}U 1.6, 2.4, 3.3, 3.6%, ВВЭР-1000 с обогащением по ^{235}U 4.4%, РБМК-1000 с обогащением по ^{235}U 2.0%. Для многих важных в практическом отношении осколков деления можно получить в аналитическом виде достаточно точные и удобные для использования аналитические выражения.

В связи с этим можно получить и удобные для анализа экспериментальных отношений активностей между осколками деления и между осколками деления и изотопами ТУЭ. Поэтому особый интерес представляет аппроксимация зависимостей удельных активностей изотопов ТУЭ от времени работы теплового реактора простыми аналитическими функциями типа $\alpha \cdot t^\beta \cdot e^{\gamma t}$, где α , β и γ – константы. В ПРИЛОЖЕНИЕ Б диссертации приводится аппроксимация зависимостей удельных активностей изотопов ТУЭ от времени работы реактора функциями $\alpha \cdot t^\beta \cdot e^{\gamma t}$ для тепловых реакторов ВВЭР-440 с обогащением по ^{235}U 1.6, 2.4, 3.3, 3.6%, Точность аппроксимации порядка нескольких процентов. Таким образом показано, что предложенная для РБМК-1000 феноменологическая модель для оценки масс и активностей осколков деления, может быть использована и для аналогичных оценок в ВВЭР-1000.

В Разделе 3.2 проведен теоретический анализ наиболее важных на практике отношений между удельными активностями осколков деления и продуктами активации ядер топлива. Отношения удельных активностей осколков деления типа $A(^{134}\text{Cs},t)/A(^{137}\text{Cs},t)$, $A(^{141}\text{Ce},t)/A(^{144}\text{Ce},t)$, $A(^{103}\text{Ru},t)/A(^{106}\text{Ru},t)$, $A(^{106}\text{Ru},t)/A(^{95}\text{Zr},t)$ и т.д. с первых экспериментальных исследований радиоактивных выпадений чернобыльского происхождения использовались как критерий корректности получаемых спектрометрических данных.

В случае отношения активностей изотопов одного и того же химического элемента [$A(^{134}\text{Cs},t)/A(^{137}\text{Cs},t)$, $A(^{141}\text{Ce},t)/A(^{144}\text{Ce},t)$, $A(^{103}\text{Ru},t)/A(^{106}\text{Ru},t)$ и др. нет зависимости от так называемой “летучести” радионуклида, обусловленной различным характером выпадением, соотношением между топливной и аэрозольной компонентами.

Поэтому в радиоактивных выпадениях на местности, независимо от расстояния от аварийного 4-го блока ЧАЭС, средние отношения активностей радионуклидов типа $A(^{134}\text{Cs},t)/A(^{137}\text{Cs},t)$ должны быть такими же, что и рассчитанные для активной зоны РБМК-1000 на момент аварии. В результате показано, что отношение удельных активностей осколков деления рутения $\rho(W) = A(^{106}\text{Ru},W)/A(^{103}\text{Ru},W) \sim W$ примерно линейно зависит от выгорания W и вследствие этого описываются распределением Гаусса со средним значением $\langle \rho \rangle \approx 0,22$, дисперсией $D(\rho) \approx 3,89 \cdot 10^{-8}$ и стандартным отклонением $\Delta(\rho) \approx 6,24 \cdot 10^{-2}$.

В Разделе 3.3 представлен анализ экспериментальных отношений между удельными активностями нуклидов в аварийных выпадениях РБМК-1000 ЧАЭС. Исследовалось отношение $\rho = A(^{106}\text{Ru})/A(^{103}\text{Ru})$, которое согласно теоретическим расчетам может быть аппроксимировано с точностью до нескольких процентов линейной функцией $W/49,5$. Вследствие этого теоретические «выходы» отношения $\rho(W)$ в зависимости от выгорания W должны подчиняться распределению Гаусса с параметрами $\langle \rho \rangle = 0,22$, $D(\rho) = 4,1 \cdot 10^{-3}$, $\Delta(\rho) = 6,4 \cdot 10^{-2}$. В диссертации приводятся их экспериментальные аналоги для некоторых районов. Проведенный детальный анализ распределения экспериментальных отношений плотностей загрязнения $\rho =$

$A(^{106}\text{Ru})/A(^{137}\text{Cs})$ для Краснопольского района показал, что для проведенных после 60 сут после аварии измерений данное распределение хорошо описывается распределением Гаусса. В случае более ранних измерений наблюдается отклонение от распределения Гаусса со стороны малых значений ρ . На экспериментальном материале по загрязнению почв районов Могилевской области показано, что распределение отношений $\rho_{\text{экс}} = [A(^{106}\text{Ru})/A(^{137}\text{Cs})]_{\text{экс}}$ приближенно описывается распределением Гаусса с параметрами: средним значением $\langle \rho \rangle \approx 0,35$, дисперсией $D \approx 0,0123$ и стандартным отклонением $\Delta \approx 0,11$. Сходный характер данное распределение имеет и для ряда районов Гомельской области (Ветковский, Кормянский, Чечерский). Проведен анализ доступного экспериментального материала по распределению отношений активностей $\rho = A(^{239,240}\text{Pu})/A(^{137}\text{Cs})$ для Краснопольского, Костюковичского и Чериковского районов Могилевской области. Распределение имеет форму четкого пика со средним значением $\langle \rho_{\text{экс}} \rangle \approx 0,001$, что позволяет быстро получать по активности ^{137}Cs приближенные оценки суммарной активности $A(^{239,240}\text{Pu})$ для указанного региона. Показано, что результаты локальных измерений отношений ρ между плотностями загрязнений почвы осколками делений следует рассматривать как элементы поля событий всей совокупности аналогичных измерений на данной местности, описываемой определенным распределением с параметрами: средним значением отношения $\langle \rho \rangle$, дисперсией $D(\rho)$ и стандартным отклонением $\Delta(\rho)$. Проанализированы экспериментальные распределения отношений активностей $A(^{106}\text{Ru})/A(^{103}\text{Ru})$, $A(^{106}\text{Ru})/A(^{137}\text{Cs})$, $A(^{137}\text{Cs})/A(^{134}\text{Cs})$, $A(^{144}\text{Ce})/A(^{141}\text{Ce})$, $A(^{144}\text{Ce})/A(^{137}\text{Cs})$ и др. для загрязненных районов Гомельской и Могилевской областей. Показано, что экспериментальные значения этих отношений описываются вполне определенными распределениями, что свидетельствует о корректности проведенных γ -спектрометрических измерений уровней загрязнения почв Беларуси. Показано, что отношения экспериментальных запасов в почвах Беларуси $\sigma(^{95}\text{Zr}) = 1,30 \cdot 10^{16}$ Бк, $\sigma(^{141}\text{Ce}) = 1,32 \cdot 10^{16}$ Бк, $\sigma(^{144}\text{Ce}) = 8,05 \cdot 10^{15}$ Бк $\sigma(^{95}\text{Zr}) : \sigma(^{141}\text{Ce}) : \sigma(^{144}\text{Ce}) = 1 : 1 : 0,62$ хорошо коррелируют со средними оценками удельных активностей этих нуклидов в топливе РБМК-1000 на момент аварии $A(^{95}\text{Zr}) \approx 3,5 \cdot 10^{16}$ Бк/т, $A(^{141}\text{Ce}) \approx 3,4 \cdot 10^{16}$ Бк/т, $A(^{144}\text{Ce}) \approx 2,2 \cdot 10^{16}$ Бк/т, т.е. свидетельствует в целом о хорошем качестве экспериментальных данных по γ -спектрометрированию почв Беларуси. Для проверки качества экспериментальных γ -спектров осколков деления на почвах можно использовать приближенное рассчитанное для топлива соотношение $\rho = [A(^{137}\text{Cs})/A(^{134}\text{Cs})]/[A(^{103}\text{Ru})/A(^{106}\text{Ru})] \approx 0,34$ практически не зависящее от выгорания W . Данное отношение проверено на 211 населенных пунктах Краснопольского района Могилевской области, для которого $\langle \rho_{\text{экс}} \rangle \approx 0,40$.

В Главе 4 проведен корреляционный анализ радионуклидного состава аварийных выпадений РБМК-1000 ЧАЭС.

В разделе 4.1 сделан анализ ранних экспериментальных работ (до 3 лет после аварии) по исследованию корреляционного соотношения $K =$

$A(^{239,240}\text{Pu})/A(^{144}\text{Ce})$. Основным вывод из этих исследований состоял в том, что корреляционный метод определения содержания $^{239,240}\text{Pu}$ по ^{144}Ce необходимо сопровождать жестким радиохимическим контролем.

В разделе 4.2 более поздние корреляционные исследования связаны с относительно долгоживущими радионуклидами ^{90}Sr и ^{154}Eu и выполнены в Украинском научно-исследовательском институте сельскохозяйственной радиобиологии (г. Киев). На их основании был оценен полный выброс радионуклидов в составе топливной матрицы и оценен запас радионуклидов в 30-см слое почвы 30-км зоны Украины. Было показано, что запас ^{90}Sr в 30-км зоне Украины ранее был превышен примерно в 3-4 раза. Однако эти результаты пока не подтверждены в работах других авторов.

В разделе 4.3 показано, что использование усредненных по выгоранию топлива W теоретических отношений активностей в топливе типа $\langle \rho(W) \rangle_T = \langle A(^{239,240}\text{Pu}, W) \rangle_T / \langle A(^{144}\text{Ce}, W) \rangle_T$ для реконструкции уровней загрязнения почвы изотопами плутония $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ по γ -излучению осколков деления в общем случае некорректно. Выгорание W в топливе описывается распределением Гаусса, является флуктуирующей величиной и их необходимо учитывать при корреляционном анализе уровней загрязнения почвы [16-А, 17-А]. Показано, что при наличии хорошей статистики по измерениям γ -активностей осколков деления, по среднему значению $\langle A(^{103}\text{Ru}) \rangle$ и экстремальным значениям $A_{\text{макс}}$, $A_{\text{мин}}$ можно предсказать среднее расчетно-экспериментальное значение суммарной α -активности $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ $\langle A(^{239,240}\text{Pu})_{\text{р-э}} \rangle$ и диапазон возможных значений суммарной α -активности при отдельных измерениях. Показано, что средняя корреляционная оценка содержания изотопов $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ в почвах г. Брагина, определенная по формуле $\langle A(^{239,240}\text{Pu}) \rangle_{\text{теор}} = 5,8 \cdot 10^{-4} \langle A(\text{Ru}) \rangle_{\text{экс}}$, равна $0,044 \text{ Ки/км}^2$ и с точностью $\sim 10\%$ согласуется со средней экспериментальной радиохимической оценкой $0,048 \text{ Ки/км}^2$.

В разделе 4.4 показано, что отношение $\rho(W) = A(^{106}\text{Ru})/A(^{103}\text{Ru})$ может иметь самостоятельное значение для оценки среднего выгорания $\langle W \rangle$ топлива, из которого образовались данные аварийные радиоактивные выпадения, так как локальные значения отношения $A(^{106}\text{Ru}, W)/A(^{103}\text{Ru}, W) \approx W/\alpha$. Теоретический параметр $\alpha(W)$ лежит в пределах 40 - 50. Поэтому после усреднения отношения по экспериментальным данным $\langle W \rangle \approx 50 \langle [A(^{106}\text{Ru})/A(^{103}\text{Ru})] \rangle_{\text{экс}}$. Показано, что отношения экспериментальных запасов в почвах Беларуси $\sigma(^{95}\text{Zr}) = 1,30 \cdot 10^{16} \text{ Бк}$, $\sigma(^{103}\text{Ru}) = 3,34 \cdot 10^{16} \text{ Бк}$, $\sigma(^{106}\text{Ru}) = 7,03 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$ $\sigma(^{95}\text{Zr})_{\text{экс}} : \sigma(^{103}\text{Ru})_{\text{экс}} : \sigma(^{106}\text{Ru})_{\text{экс}} = 1 : 2,6 : 0,54$ примерно в 3 раза больше оценок отношений удельных активностей этих нуклидов в топливе РБМК-1000 на момент аварии $A(^{95}\text{Zr}) \approx 3,5 \cdot 10^{16} \text{ Бк/т}$, $A(^{103}\text{Ru}) \approx 2,7 \cdot 10^{16} \text{ Бк/т}$, $A(^{106}\text{Ru}) \approx 6,1 \cdot 10^{15} \text{ Бк/т}$, $A(^{95}\text{Zr}) : A(^{103}\text{Ru}) : A(^{106}\text{Ru}) = 1 : 0,77 : 0,17$, что свидетельствует о том, что изотопы рутения примерно в 3 раза более "летучи", чем жестко связанные с топливной матрицей изотопы циркония.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Основные результаты, полученные в данной диссертации, можно сформулировать следующим образом:

1. Получено приближенное решение в аналитическом виде системы уравнений Бейтмана для активностей членов изобарных цепочек с периодом полураспада порядка суток и более с учетом четырех делящихся нуклидов (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) и разработка на его основе феноменологической модели для оценки масс и активностей осколков деления в тепловых реакторах [1, 6].

2. Выполнен в аналитическом виде расчет в рамках разработанной модели зависимостей удельных активностей осколков деления (^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{111}Ag , ^{125}Sb , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{147}Nd и др.) от времени работы реактора в активной зоне аварийного РБМК-1000 ЧАЭС [1,2,6,7].

3. Получена усредненная по выгоранию топлива оценка в рамках указанной феноменологической модели накопленных активностей наиболее важных в радиозэкологическом отношении осколков деления на момент аварии РБМК-1000 ЧАЭС и проведено сравнение с результатами аналогичных численных расчетов [7,16].

4. Выполнена аппроксимация зависимостей удельных активностей изотопов ТУЭ от времени работы реактора t функциями типа $\alpha \cdot t^{\beta} \cdot e^{\gamma t}$ для тепловых реакторов ВВЭР-440 с обогащением по ^{235}U 1.6, 2.4, 3.3, 3.6%, ВВЭР-1000 с обогащением по ^{235}U 4.4%, РБМК-1000 с обогащением по ^{235}U 2.0% [16,17].

5. Проведен анализ экспериментальных данных по отношениям плотностей загрязнения радионуклидами типа $A(^{106}\text{Ru})/A(^{103}\text{Ru})$, $A(^{103}\text{Ru})/A(^{106}\text{Ru})$, $A(^{106}\text{Ru})/A(^{137}\text{Cs})$, $A(^{144}\text{Ce})/A(^{95}\text{Zr})$, $A(^{131}\text{I})/A(^{137}\text{Cs})$, $A(^{134}\text{Cs})/A(^{137}\text{Cs})$, $A(^{144}\text{Ce})/A(^{141}\text{Ce})$ и др. для районов Гомельской и Могилевской областей [3-5, 8-15].

6. Выполнена аппроксимации для РБМК-1000 отношений удельных активностей нуклидов типа $A(t)_1/A(t)_2 = \rho t^{\sigma}$, где $A(t)_1$ и $A(t)_2$ – осколки деления или продукты активации ядер топлива во временном интервале $t \sim 1,35 \div 2,7$ года [17].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Подтверждение достоверности результатов экспериментальных исследований уровней загрязнения почв Беларуси γ -излучающими осколками деления в настоящей диссертационной работе может служить

научной основой для составления корректного долгосрочного прогноза по α -излучающим загрязнителям почв для 30-км зоны и прилегающим к ней территориям.

Самостоятельный практический интерес имеет разработанная в диссертации феноменологическая модель расчета в аналитическом виде активностей осколков деления в тепловых реакторах (физика реакторов, радиоэкология и др.).

Предложенный метод учета флуктуаций для отношений активностей типа $\rho(W) = A_1(W)/A_2(W) \approx \text{const} \cdot W$ может найти применение при реконструкции уровней загрязнения почв ^{90}Sr , ^{131}I , изотопами ТУЭ и другими нуклидами.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бурак, А.О. Феноменологическая модель для оценки активностей осколков деления в ядерном топливе и аварийных реакторных выбросах/ А. О.Бурак, Э.А. Рудак, А.М. Эльмансури, О.И. Ячник //Сахаровские чтения 2004: экологические проблемы XXI века, II часть, Минск, 23-25 мая 2004 г./ МГЭУ им. А.Д. Сахарова. – Минск, 2004. - С. 140-142.

2. Бурак, А.О. О возможности использования ^{106}Ru и ^{111}Ag для косвенного определения содержания изотопов трансурановых элементов в реакторном топливе и радиоактивных загрязнениях/ А. О.Бурак, Э.А. Рудак, А.М. Эльмансури, О.И. Ячник //Сахаровские чтения 2004: экологические проблемы XXI века, II часть, Минск, 23-25 мая 2004 г./ МГЭУ им. А.Д. Сахарова. – Минск, 2004. - С. 137-139.

3. Андреев, В.В. Методика мокрого озоления с использованием уз-облучения для определения содержания ^{90}Sr в объектах органического происхождения с низкой удельной активностью./ В.В.Андреев, А.О.Бурак, Н.В.Максименко, Э.А.Рудак, А.Я.Тулубцов, А.М.Эльмансури, О.И.Ячник //III Международная научно-практическая конференция «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация», Минск, 7-9 июня 2005г./ Изд. центр БГУ. – Минск, 2005. – 153-154.

4. Быков, В.Т. Оценка содержания изотопов плутония в 30-км зоне ЧАЭС по γ -излучению Zr-95, Ru-103, Ce-141 и Ce-144./ В.Т.Быков, А.Н.Водин, С.Н.Олейник, Э.А.Рудак, А.Я.Тулубцов, А.М.Эльмансури, О.И.Ячник. // III Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 28 февраля-4 марта 2005 г./ННЦ ХФТИ. – Харьков, 2005. – С. 32

5. В.Т. Быков, А.Н. Водин, С.Н. Олейник, Э.А. Рудак, А.Я. Тулубцов, А.М.Эльмансури, О.И. Ячник. О возможности определения содержания изотопов плутония в реакторных выбросах по γ -излучению Ru-106, Ag-111 и Sb-125./III Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 28 февраля-4 марта 2005 г., стр. 33.

6. Bykov, V.T. Evaluation of isotope contents of plutonium in reactor emissions by gamma-radiations of ^{106}Ru , ^{111}Ag and ^{125}Sb / Bykov V.T., Elmansury A.M., Olejnik S.N., Rudak E.A., Tulubtsov A.Ya, Vodin A.N., Yachnik O.I // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (45). – 2005. - №6. - P.117-121.

7. Рудак, Э.А. Феноменологическая модель для оценки активностей осколков деления в ядерном топливе и аварийных реакторных выбросах, Бурак А.О., Рудак Э.А., Эльмансури А.М., Ячник О.И. Атомная энергия, Москва, 2005, т.98, Вып. 5, стр. 380-386.

8. Рудак, Э.А. Оценка характера радиоактивных выпадений чернобыльского происхождения по отношению плотностей загрязнений почв осколками деления/ Э.А. Рудак, А.М. Эльмансури, О.И. Ячник Э.А. //Сахаровские чтения 2006: экологические проблемы XXI века, II часть, Минск, 17-18 мая 2006 г./ МГЭУ им. А.Д. Сахарова. – Минск, 2004. - С. 111-113.

9. Рудак, Э.А. Оценка содержания изотопов плутония $^{238}\text{Pu} + ^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ в аварийных чернобыльских выпадениях по ^{103}Ru и ^{106}Ru / Э.А.Рудак. А.М.Эльмансури, О.И. Ячник. – Минск, 2006. 24 с. – (Препринт/ НАН Беларуси, Институт физики; ИФ-743),

10. Рудак, Э.А. Статистический анализ локальных загрязнений нуклидами чернобыльсклго происхождения почв Могилевской области/ Э.А.Рудак, А.М.Эльмансури, О.И.Ячник.IX // Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». г. Обнинск, 24-26 октября 2006 гЭ. А.Р./ ИАЭ – Обнинск, 2006. - С. 441 – 443.

11. Рудак, Э.А. Оценка вклада оксидных соединений плутония в загрязнения почв на больших расстояниях от Чернобыльской АЭС./ Э.А.Рудак, А.М.Эльмансури, О.И.Ячник //Сахаровские чтения 2007: экологические проблемы XXI века, II часть, Минск, 17-18 мая 2007 г./ МГЭУ им. А.Д. Сахарова. – Минск, 2007 г., Т2. - С. 177-178.

12. Рудак, Э.А. Определение характеристик отношения $^{137}\text{Cs}/^{131}\text{I}$ в топливе и на местности с целью оценки выброса йода в аварийных реакторных выпадениях по выбросу ^{137}Cs / Э.А.Рудак, А.М. Эльмансури, О.И. Ячник // 6-ой международный симпозиум «Актуальные проблемы дозиметрии» в рамках XV

Международной научно-практической конференции “Экология человека в постчернобыльский период”. Минск, 28-30 ноября 2007г. МГЭУ им. А.Д. Сахарова. – Минск, 2007. - С. 92-97.

13. Быков, В.Т. Теоретические соотношения между удельными активностями нуклидов для ядерного топлива РБМК-1000 ЧАЭС / В.Т.Быков, А.Н.Водин, С.Н.Олейник, Э.А. Рудак, А.М. Эльмансури, О.И. Ячник // V конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 26 февраля - 2 марта 2007 года, /ИНЦ ХФТИ. – Харьков, 2007. – С. 63.

14. Быков, В.Т. Использование отношения активностей $A(^{239,240}\text{Pu})/A(^{106}\text{Ru})$ для оценки содержания плутония в аварийных выпадениях ЧАЭС/ В.Т. Быков, А.Н. Водин, С.Н. Олейник, Э.А. Рудак, А.М. Эльмансури, О.И. Ячник // V конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 26 февраля - 2 марта 2007 года, /ИНЦ ХФТИ. – Харьков, 2007. – С. 64.

15. Быков, В.Т. Экспериментальное и теоретическое исследование отношения $A(^{106}\text{Ru})/A(^{103}\text{Ru})$ в аварийных выпадениях ЧАЭС / В.Т.Быков, А.Н. Водин, С.Н. Олейник, Э.А. Рудак, А.М. Эльмансури, О.И. Ячник // V конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 26 февраля - 2 марта 2007 года, /ИНЦ ХФТИ. – Харьков, 2007. – С. 65.

16. Rudak, E.A. Integral evaluation of ^{239}Pu and ^{240}Pu masses in the Chernobyl fallout on the territory of Belarus/ E.A. Rudak, A.M. Elmansury, O.I. Yachnik// Lithuanian Journal of Physics. – 2007. - Vol. 47. - P. 365-370.

17. Рудак, Э.А. Корреляционные соотношения для оценки содержания изотопов плутония в аварийных выпадениях Чернобыльской АЭС /Э.А. Рудак., А.М. Эльмансури, О.И. Ячник //Атомная энергия. - 2007. - Т.103. - Вып. 4. - С. 255-259.

РЕЗЮМЕ

Эльмансури Али Масуд

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ АКТИВНОСТЯМИ РАДИОНУКЛИДОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РБМК-1000 И АВАРИЙНЫХ ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЯХ.

Ключевые слова: тепловой реактор, радионуклиды, осколки деления, уравнения Бейтмана, корреляционные соотношения.

Цель исследования – разработка метода проверки достоверности имеющихся экспериментальных данных по загрязнению почв Беларуси осколками делений и продуктами активации ядер топлива чернобыльского происхождения,

Объект исследования – авария на Чернобыльской АЭС, в результате которой произошло радиоактивное загрязнение территории Беларуси осколками деления.

Предмет исследования – экспериментальные данные по плотностям загрязнения почв Беларуси осколками деления аварийного РБМК-1000 ЧАЭС, феноменологическая теория наработки радионуклидов, корреляционные соотношения между удельными активностями радионуклидов в активной зоне аварийного РБМК-1000 ЧАЭС и на почвах ряда районов Гомельской и Могилевской областей.

Полученные результаты и их новизна - получено приближенное решение в аналитическом виде системы уравнений Бейтмана для активностей членов изобарных цепочек и разработана феноменологическая модель для оценки масс и активностей осколков деления в тепловых реакторах. Выполнен в аналитическом виде расчет в рамках разработанной модели зависимостей удельных активностей осколков деления от времени работы реактора в активной зоне аварийного РБМК-1000 ЧАЭС. Получена усредненная оценка в рамках указанной модели накопленных активностей наиболее важных в радиозэкологическом отношении осколков деления на момент аварии РБМК-1000 ЧАЭС. Выполнена аппроксимация зависимостей удельных активностей изотопов ТУЭ от времени работы реактора. Проведен анализ экспериментальных данных по отношениям плотностей загрязнения радионуклидами для районов Гомельской и Могилевской областей.

Область использования – полученные результаты могут быть использованы для составления корректного долгосрочного прогноза по радиоактивному загрязнению 30-км зоны и прилегающих к ней территорий.

КАРРЕЛЯЦЫЙНЫЯ СУАДНОСІНЫ ПАМІЖ АКТЫУНАСЦЯМІ РАДЫЁНУКЛІДАУ У АКТЫУНАЙ ЗОНЕ РБМК-1000 І АВАРЫЙНЫХ ЧАРНОБЫЛЬСКІХ ВЫПАДЗЕННЯХ.

Ключавыя словы: цеплавы рэактар, радыёнукліды, асколкі дзялення, ураўненне Бейтмана, каррэляцыйныя суадносіны.

Мэта даследавання – распрацоўка метада праверкі здольнасці маючых эксперыментальных вынікаў па забруджванню глеб Беларусі асколкамі дзялення і прадуктамі акцівацыі ядзер чарнобыльскага топліва.

Аб'ект даследавання – аварыя на Чарнобыльскай АЭС, вынікам якой з'явілася радыёактыўнае забруджванне тэрыторыі Беларусі асколкамі дзялення.

Прадмет даследавання – эксперыментальныя вынікі па забруджванню глеб Беларусі асколкамі дзялення аварыйнага РБМК-1000 ЧАЭС, феноменалагічная тэорыя напрацоўкі радыёнуклідаў, каррэляцыйныя суадносіны паміж удзельнымі актыўнасцямі радыёнуклідаў у актыўнай зоне аварыйнага РБМК-1000 ЧАЭС і на глебах раёнаў Гомельскай і Могілёўскай абласцей.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Атрымана прыблізнае рашэнне у аналітычным відзе сістэмы ўраўненняў Бейтмана для актыўнасцей ізабарных ланцугоў і распрацавана феноменалагічная мадэль для ацэнкі мас і актыўнасцей асколкаў дзялення ў цеплавых рэактарах. Зроблен у аналітычнай форме разлік у рамках распрацаванай мадэлі залежнасцей удзельных актыўнасцей асколкаў дзялення ад часу работы рэактара у актыўнай зоне аварыйнага РБМК-1000 ЧАЭС. Атрымана сярэдняя ацэнка ў рамках указанай мадэлі запасеных актыўнасцей найбольш важных у радыёэкалагічных адносінах асколкаў дзялення на момант аварыі РБМК-1000 ЧАЭС. Зроблена апраксімацыя залежнасцей удзельных актыўнасцей ізатопаў ТУЭ ад часу работы рэактара. Праведзен аналіз эксперыментальных вынікаў у адносінах шчыльнасцей забруджвання радыёнуклідамі для раёнаў Гомельскай і Могілёўскай абласцей.

Вобласць выкарыстання – атрыманыя вынікі маюць быць выкарыстаны для састаўлення карэктнага далгатэрміновага прагноза па радыёактыўнаму забруджванню 30-км зоны і прылеглых да яе тэрыторый.

SUMMARY

Almansury Ali Masud

CORRELATIONS BETWEEN RADIONUCLIDE ACTIVITIES IN THE HPOR-1000 CORE AND ACCIDENTAL CHERNOBYL FALLOUTS

Keywords: thermal reactor, radionuclides, fission fragments, Beitman equations, correlation ratios.

Research goal – elaboration of examination method of reliability of experimental data concerning Belarussian soil contamination by fission fragments and nuclear activation products.

Research object – Chernobyl catastrophe resulting to radioactive soil contamination of Belarus territory by fission fragments.

Research subject – experimental data concerning the soiling densities of Belarus soils by fission fragments, phenomenological theory of radionuclides inventory, correlations between specific activities of radionuclides in the core of accidental HPOR-1000 and on the soils of some districts of Gomel and Mogilev regions.

Obtained results and their novelty - the approximate solution of Beitman equation in analytic form for isobar chains activities is received and phenomenological model for evaluation of mass and fission fragments activities in thermal reactors is elaborated. In the framework of this model the analytical calculation of dependences of specific fission fragments activities on operation time in the core of accidental reactor is carried out. The average value accumulated activities of ecologically most important fission fragments at the accidental moment is received. The approximation of dependences of specific fission fragments activities of TUE isotopes on operation time is carried out. The analysis of experimental data concerning the densities of radionuclide contamination for some districts of Gomel and Mogilev regions is carried out.

Field of application – the received results may be used for elaborated of correct prolonged predication on radionuclide contamination for 30 – km zone and adjoining territories.

ЭЛЬМАНСУРИ АЛИ

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ
АКТИВНОСТЯМИ РАДИОНУКЛИДОВ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ
РБМК-1000 И АВАРИЙНЫХ ЧЕРНОБЫЛЬСКИХ ВЫПАДЕНИЯХ

Подписано в печать 18.02 2009 г.

Формат 60×90 1/16. Бумага офисная.

Печать офсетная. Печ. л. 1,9 Уч.-изд. л. 1,4

Тираж 60 экз. Заказ № 11

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68

Отпечатано на ризографе Института физики НАНБ
Лицензия ЛП №20 от 27.05.2003г.