

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2-2002-122

На правах рукописи
УДК 621.039

БЗНУНИ
Сурик Араратович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДВУХРЕАКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы, комплексы программ,
01.04.16 — физика атомного ядра

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2002

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор Худавердян Альфред Гайкович

доктор физико-математических наук,
Жамкочян Ваган Микаелович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Шелаев Игорь Александрович

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Соболевский Николай Михайлович

Ведущая организация: Институт атомной энергии,
г. Обнинск.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2002г. в ___ час. на
заседании Диссертационного совета Д720.001.04 в Лаборатории
информационных технологий Объединенного института ядерных
исследований по адресу: г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2002г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



З.М.Иванченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Одним из перспективных направлений крупномасштабного развития ядерной энергетики являются подкритические электроядерные системы, управляемые ускорителями. Такие системы подобно реакторам обеспечивают высокий выход нейтронов и тепла, вместе с тем гарантируют необходимый уровень безопасности - невозможность неконтролируемой реакции деления, предотвращение распространения технологий и материалов, пригодных для создания ядерного оружия, эффективную трансмутацию опасных радиотоксичных отходов.

Однако обычно рассматриваемые одnoreакторные электроядерные системы (ЭЛЯУ) встречаются серьезными трудностями. Высокая стоимость ускорителя требует сочетания в одной установке трансмутации, как актиноидов, так и долгоживущих продуктов деления, особенно если их использовать в качестве трансмутатора отходов энергетических реакторов. Система должна обеспечивать режим работы в жестком, и одновременно в тепловом спектре. При этом мощность ЭЛЯУ должна составлять несколько ГВт, а потоки нейтронов должны быть на уровне 10^{14} - 10^{15} см⁻²с⁻¹, в то время как ток ускорителя не превышать 5-10мА. Сочетать эти требования с помощью одnoreакторных ЭЛЯУ весьма трудно ввиду их малой удельной мощности, больших токов пучков протонов (30-100мА) и фиксированной жесткости спектра нейтронов.

Оценки показывают, что значительно большие возможности предоставляют двухреакторные подкритические системы, состоящие из реактора-бустера на быстрых нейтронах, работающего в жестком нейтронном спектре, и реактора на тепловых нейтронах, производящего основную часть энергии. Такие ЭЛЯУ позволяют при сравнительно небольшом токе протонов обеспечить необходимый уровень мощности и потока нейтронов, а наличие быстрой и тепловой зон дают возможность эффективно трансмутировать всю палитру ядерных отходов. Изучение таких систем, их преимуществ и возможных трудностей, является весьма актуальной задачей.

Поскольку такие системы сложны и очень дороги, их изучение в настоящее время возможно лишь путем математических экспериментов с их математическими моделями. Сложность геометрии и состава ЭЛЯУ требует использование Монте-карловских программных комплексов, позволяющих учесть особенности реальных экспериментов, в частности – использование различных типов реакторов.

Целью диссертационной работы является математическое моделирование двухреакторных ЭЛЯУ с бустером на обогащенном уране (20%), использующих энергетические реакторы типа ВВЭР-1000, MSBR-1000, CANDU-6, БН-350, изучение их основных ядерно-физических характеристик и, в частности, выяснение условий гарантированной подкритичности, посредством математических экспериментов.

Научные результаты и новизна работы.

В представленной диссертации впервые рассмотрены ЭЛЯУ с двумя реально действующими реакторами БН-350, ВВЭР-1000, MSBR-1000, CANDU-6.

Впервые изучено влияние кадмиевого вентилля в двухреакторных системах с бустером на обогащенном уране и выявлены условия обеспечения гарантированной подкритичности в этих системах. Предложена специальная конструкция с жидким кадмием для обеспечения гарантированной подкритичности таких систем.

Разработана программа LATTICE на языке C++, с помощью которой для программного комплекса CASCAD можно описать решеточную структуру, тем самым повышая точность создания математической модели таких систем.

Приведен сравнительный анализ точности одно-группового подхода с многогрупповым (26 групповой подход) Монте-карловским моделированием.

Практическая значимость работы состоит в выяснении особенностей ядерно-физических характеристик двухреакторных систем. Математические эксперименты позволяли промоделировать поведение двухреакторных электроядерных систем не только в штатских режимах функционирования, но и в некоторых гипотетических аварийных ситуациях, при которых осуществление физических экспериментов практически невозможно. В частности, посредством Монте-карловского моделирования показано, что в процессе работы установки могут быть созданы такие условия, при которых разрушение промежуточного вентильного слоя делает такие

системы надкритичными ($k_{эфф} > 1$). Вместе с тем применение жидкокадмиевого вентиля обеспечивает подкритичность двухреакторных систем с бустером на обогащенном уране.

Разработанная программа LATTICE, с помощью которого в программе CASCAD можно учитывать решеточные структуры, позволяет повышать точность создания математической модели электроядерной системы, и тем самым точность вычисления коэффициента размножения нейтронов $k_{эфф}$ и расчета спектра, что очень важно с точки зрения вопросов обеспечения безопасности и трансмутации долгоживущих радиотоксичных отходов.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании электроядерных установок.

Апробация работы.

Основные положения работы докладывались на конференциях: "Second International Conference Modern Trends in Computational Physics". Dubna, Russia, July 24-29, 2000, VI Научная конференция молодых ученых и специалистов, Дубна, 4-9 февраля, 2002. и на семинарах ЛИТ ОИЯИ, Ереванского гос. университета, НАН РА, ИАТЭ, ИСТР.

Основные результаты работы опубликованы в сборниках указанных конференций, в виде препринтов ОИЯИ, а так же в журналах «Атомная энергия» и «Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering»

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы содержащего 165 наименований. В ней имеется 37 рисунков и 11 таблиц. Общий объем работы – 129 страницы наборного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность и раскрывается содержание темы диссертации. Дан краткий обзор состояния и перспектив ядерной энергетики, в частности роли электроядерных установок в топливном цикле ядерной энергетики, вопросы безопасности и сравнение с соответствующими параметрами критических реакторов. Кратко рассмотрены различные подходы трансмутации ядерных отходов, очерчен набор изотопов, которые, по условиям уровня активности, миграции в биосфере и уровню вредного воздействия на биологические объекты, в настоящее время рассматриваются как вредные отходы, требующие обязательной трансмутации. Обосновывается необходимость двухреакторных ЭЯУ. Выделен круг вопросов нуждающихся в математическом моделировании. На этой основе формулируются цели работы и указывается в чем заключается новизна и научно-практическая значимость полученных результатов. Кратко изложено содержание работы.

В первой главе проведено изучение основных свойств двухфакторных электроядерных систем с бустером на обогащенном уране (20%) и кадмиевым вентилем в эффективном одно-групповом

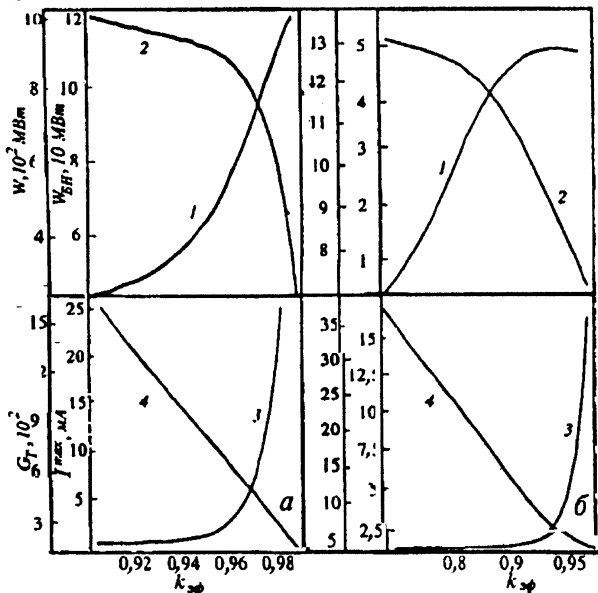


Рис.1. Максимальная электрическая мощность теплового блока (1) и бустера (2), коэффициент выигрыша (3) и ток ускорителя в максимальном режиме (4) в зависимости от $k_{эф}$ для энергетической системы на основе CANDU-6 (а) и MSBR-1000(б).

приближении.

В § 1.1 дается описание физической сущности рассматриваемой задачи. В этом случае нейтронное поле описывается стационарным уравнением диффузии:

$$\Delta\Phi + \frac{k_{\infty} - 1}{M^2} \Phi = 0$$

где Φ - скалярный поток нейтронов, k_{∞} и M^2 - коэффициент размножения нейтронов площадь миграции для данной среды соответственно.

Роль бустера по отношению к основному реактору сводится к перенормировке плотности потоков внешних нейтронов на фактор $r_b F(r_b)/r_a F(r_a)$ с радиусом излучающей поверхности r_b , где $F(r)$ - радиальное распределение нейтронов, r_a - радиус мишени, r_b - радиус бустера.

Представлен анализ результатов расчета основных ядерно-физических характеристик - мощности, коэффициента усиления энергии и тока ускорителя для рассмотренных систем (рис 1.). Рассматривается вопрос расширения области эффективной функционирования электроядерных систем до $k_{эфф}=0,9-0,95$ и снижения тока ускорителя на порядок.

В § 1.2 выполнен сравнительный анализ точности одно-группового подхода по сравнению с многогрупповым монте-карловским моделированием. Выявлены причины сравнительно высоких выходных характеристики по сравнению с результатами Монте-карловского моделирования при одинаковых значениях $k_{эфф}$.

Во второй главе моделирование методом Монте-Карло применяется для изучения основных свойств двухреакторных электроядерных систем, содержащих в качестве основного блока базовые энергетические реакторы ВВЭР-1000, CANDU-6, MSBR-1000, а в качестве бустера БН-350.

В § 2.1 посредством математических экспериментов изучаются основные свойства двухреакторных систем на основе твердотопливных реакторов ВВЭР-1000 и CANDU-6.

В § 2.1.1 представляются основные характеристики этих систем, на основе которых создается их математическая модель. Обосновывается применение в качестве мишени и теплоносителя бустера свинцово-висмутовой эвтектики.

В § 2.1.2 представлен метод расчетов. Для расчета параметров системы использовалась программа CASCAD, описывающая транспорт частиц в веществе и основанная на каскадно-испарительной модели адрон-ядерных взаимодействий (с учетом высокоэнергетического деления). Перенос нейтронов низкой энергии ($E < 10,5$ МэВ) также моделировался с помощью программы CASCAD, дополненной программными модулями, позволяющими определять относительные скорости нейтронов и ядер среды в области термализации нейтронов (собственные скорости ядер моделировались в соответствии со спектром Максвелла - Больцмана) и соответствующие им сечения взаимодействия нейтронов с ядрами среды. Для проверки точности расчета коэффициента размножения нейтронов $k_{эфф}$ использовалась программа MCNP4B с библиотекой нейтронных сечений DLC-189.

Монте-Карло моделирование позволяет рассматривать сложные геометрические блоки ЭЛЯУ и оценить вероятности столкновений, характеристики рожденных частиц и их распространение через разнородные среды, генерация различных каскадных ветвей и в конечном счете оценить размножение нейтронов, тепловыделение и различные характеристики трансмутации.

В § 2.1.3 представлена физическая интерпретация результатов математических экспериментов (рис.2, 3) и на этом основании анализируются потенциальные возможности по обеспечению безопасности, эффективной трансмутации и применяемости при нынешнем уровне ускорительной техники для твердотвzльных двухреакторных систем.

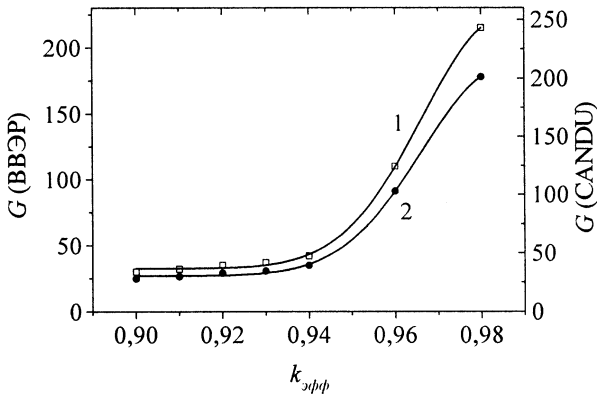


Рис. 2. Коэффициент усиления энергии в зависимости от $k_{эфф}$ для систем на основе ВВЭР-1000 (1) и CANDU-6(2)

В § 2.2 посредством математических экспериментов изучаются основные свойства двухреакторных систем на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000. Рассматриваются трудности связанные с использованием твердотвzльных систем в качестве трансмутаторов долгоживущих радиотоксичных отходов. Обосновывается перспективность внедрения жидкосолевых двухреакторных систем в

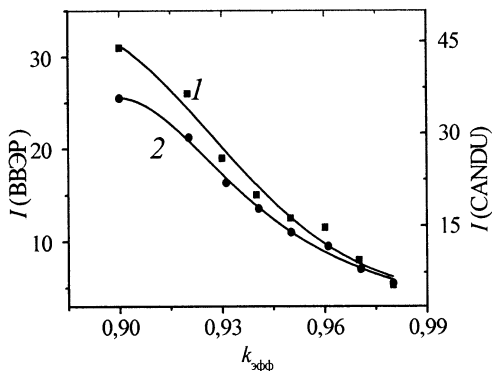


Рис. 3. Ток ускорителя, обеспечивающий поток нейтронов $1014 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в зависимости от коэффициента размножения $k_{эфф}$ для систем на основе ВВЭР-1000 (1) и CANDU-6(2)

качестве безопасного трансмутатора с одновременным производством электроэнергии.

В § 2.2.1 представлены основные характеристики двухреакторной системы, на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000, на основании которых создается его математический модель. Обсуждаются преимущества жидкосольных технологий как одновременно и горючего и теплоносителя, и возможные трудности.

В § 2.2.2 представлена физическая интерпретация результатов численных экспериментов (рис. 4) и на этом основании анализируются преимущества жидкосольных систем по отношению твердотельным системам по обеспечению безопасности, эффективной трансмутации и применимости при современном уровне ускорительной техники.

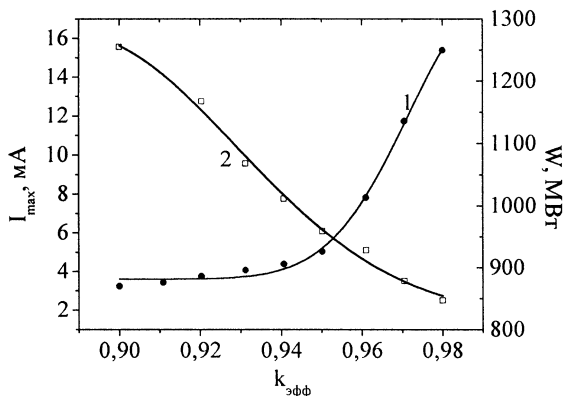


Рис. 4. Мощность системы (1) и ток ускорителя (2), в зависимости от $k_{эфф}$ при максимальном потоке нейтронов в тепловой зоне 10^{14} см⁻²·с⁻¹

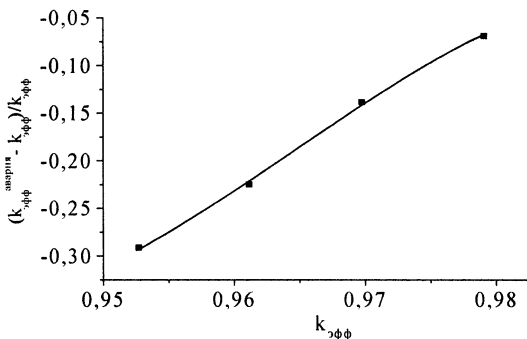


Рис. 5. Изменения $k_{эфф}$ при разрушении вентиля в зависимости от $k_{эфф}$ при гомогенном растворении кадмия в тепловой зоне для двухреакторной системы на основе ВВЭР-1000

Рассматриваются вопросы снижения соотношения плотностей деления в быстром и тепловом зоне и нейтронного баланса.

В § 3 моделируется поведение двухреакторных систем с бустером на обогащенном уране при разных аварийных ситуациях, когда в результате перепадов давления обрушается тепломеханическая изолирующая зона и вместе с ним кадмиевый вентильный слой.

Рассмотрены две возможные варианты: а) кадмий растворяется гомогенно (рис. 5), и б) когда кадмий выпадает в осадок (рис. 6). Посредством математических экспериментов выясняются условия обеспечения гарантированной подкритичности двухреакторных систем

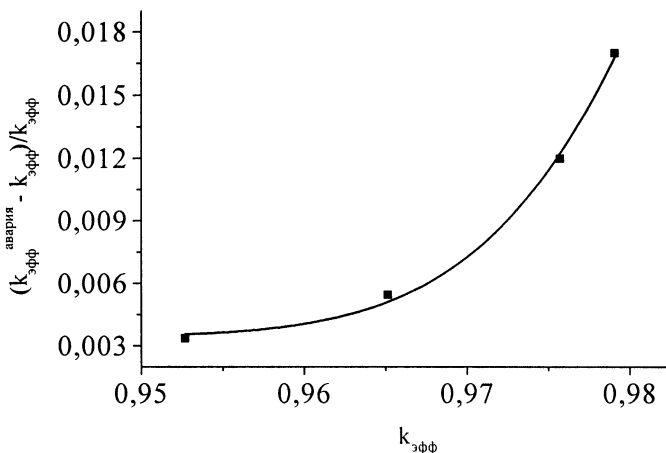


Рис. 6. Изменения $k_{эфф}$ при разрушении вентиля в зависимости от $k_{эфф}$ при падении кадмия в осадок в бустере для двухреакторной системы на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000.

с бустером на обогащенном уране. Путем численного эксперимента обосновывается возможность применения вентиля с жидким кадмием, для обеспечения гарантированной подкритичности (безопасности) таких систем на основе принципа внутренне присущей безопасности.

В **Главе 3** представлена программа LATTICE, позволяющая в рамках программного комплекса CASCAD задавать решеточную структуру активных зон, что улучшает точность моделирования реакторных систем. Рассматриваются вопросы связанные изменением $k_{эфф}$ и спектра нейтронов при переходе от гомогенной модели электроядерных систем к гетерогенной с учетом решеточной структуры.

В **Заключении** обобщены результаты выполненных исследований и приведены соответствующие выводы работы.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Программа LATTICE, с помощью которой в программном комплексе CASCAD можно учитывать решеточные структуры, что позволяет более адекватным образом создать математическую модель электроядерных систем.
2. Двухреакторные электроядерные системы функционируя в безопасном режиме ($k_{эфф}=0,94\div 0,98$), обладают существенно большими выходными характеристиками во всем диапазоне $k_{эфф}$ по сравнению с аналогичными системами без промежуточного быстрого реактора-бустера, снижая требования на величину тока примерно на порядок.

-
3. Двухреакторные электроядерные системы с бустером на обогащенном уране обеспечивают функционирование в безопасном режиме с обеспечением наивысших выходных характеристик по отношению к другим двухреакторным системам.
 4. Возможность применения вентилля на основе жидкого кадмия, для обеспечения гарантированной подкритичности двухреакторных систем с бустером на обогащенном уране.
 5. Двухреакторная система на расплавленных солях с бустером на обогащенном уране является наиболее перспективной по сравнению с другими двухреакторными системами за счет наивысших выходных характеристик, существенного упрощения топливного цикла, расширения топливной базы - вовлечение тория и повышения рабочих температур в реакторе по сравнению с технологиями, функционирующими в настоящее время.
 6. В случае перевода реакторов с начальной относительно малой положительной реактивностью в подкритический режим появляется максимум в пространственном распределении нейтронов, смещенного к периферии, что приводит к выравниванию потока нейтронов, следовательно, к более равномерному выгоранию топлива и большему энерговыделению.
 7. существующий на сегодняшний день научно-технический уровень позволяет создать электроядерные установки с одновременной выработкой электроэнергии и трансмутации ядерных отходов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бзнуни С.А., Жамкочян В.М., Худавердян А.Г., «Параметры двухреакторных систем, управляемых ускорителями», *Атомная энергия*, 2000, т. 88, вып. 4, с. 316-319
2. Бзнуни С.А., Барашенков В.С., Жамкочян В.М., Полянски А., Соснин А.Н., Худавердян А.Г., «Монте-Карловское моделирование параметров подкритического каскадного реактора, основанного на жидкосолевой и жидкометаллической технологии», Препринт ОИЯИ Р2-2001-124, 2001
3. Бзнуни С.А., Жамкочян В.М., Худавердян А.Г., Барашенков В.С., Соснин А.Н., Полянски А. «Монте-Карловское моделирование параметров двухреакторных электроядерных систем», Препринт ОИЯИ Р2-2002-27, 2002. Направлено в журнал «*Атомная энергия*»
4. Bznuni S.A., Khudaverdyan A.N., Zhamkochyan V.M., Barashenkov V.S., Sosnin A.N., Polanski A., «Monte Carlo Modeling of Bireactor Electronuclear System», *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2002, v. 2, N 1-2, p. 21-29
5. Бзнуни С.А., Барашенков В.С., Жамкочян В.М., Полянски А., Соснин А.Н., Худавердян А.Г., «Двухреакторные электроядерные системы с жидкокадмиевым ветилем». Препринт ОИЯИ Р2-2002-105, 2002
6. Бзнуни С.А., «Каскадные подкритические электроядерные системы», Материалы VI научной конференции молодых ученых и специалистов, Дубна, 2002, 4-9 февраля, с. 259-263

-
7. Бзнуни С.А., Соловьев А.Г., Соснин А.Н., Полянски А.
«Программа LATTICE для расчета параметров мишеней с
гетерогенной (решеточной) структурой», Сообщение ОИЯИ Р2-
2002-113, 2002

Получено 21 мая 2002 г.

Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 22.05.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,70. Тираж 100 экз. Заказ № 53298.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.