

Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет)

РГБ ОД

На правах рукописи

Л 4 СЛН 1998

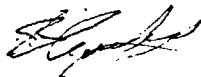
СЕЛИВЕРСТОВ Владимир Валерианович

**АНАЛИЗ ЦЕННОСТИ НЕЙТРОНОВ ВНЕШНЕГО
ИСТОЧНИКА В ПОДКРИТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Специальность 05.14.03 - Ядерные энергетические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:



Москва, 1998

УДК 621.039

Работа выполнена в Государственном научном центре РФ
"Институт теоретической и экспериментальной физики".

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Ильичев Б.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Орлов В.В.,
кандидат физико-математических наук
Афанасьев А.М.

Ведущее предприятие: Обнинский институт атомной энергетики.

Защита состоится "12" октября 1998г.
в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета К-053.03.0
в МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31,
ауд. Б-100, тел. 324-84-98, 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.
Автореферат разослан "3" сентября 1998г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в один
экземпляр, заверенный печатью организации.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

В.Н.Яльцев.

Подписано к печати 06.07.98 Формат 60x90 1/16
Усл.-печ.л. 1,25 Тираж 100 экз. Заказ 453

Отпечатано в ИТЭФ, И17259, Москва, Б.Черемушкинская, 25

Актуальность проблемы. На современном этапе развития ядерной энергетики важное значение приобрела проблема утилизации и уничтожения долгоживущих радиоактивных отходов ядерной энергетики и конверсия военного плутония. Одним из перспективных путей решения проблемы является трансмутация отходов и конверсия плутония в подкритических реакторах с внешним источником, питаемым ускорителем - системы ATW/ABC (Accelerator Transmutation of nuclear Wastes and Accelerator Based Conversion). В настоящее время возможность и перспективы использования систем ATW/ABC широко исследуются как в России, так и в других странах, в том числе на основе международного сотрудничества. В этой связи исследование нейтронно-физических аспектов такого рода установок представляется весьма важной задачей.

Основные проблемы нейтронно-физического анализа установок ATW/ABC.

Главными элементами реакторной части систем ATW/ABC являются: нейтронный источник - мишень, конвертирующая падающий ток высокоэнергетических протонов от ускорителя в нейтроны, и подкритический бланкет, размножающий нейтроны источника, которые затем используются для трансмутации и сжигания находящихся в бланкете изотопов. Возможно применение традиционных компоновок, использующих пассивные (неразмножающие) мишени, состоящие из неделящихся материалов (свинец, вольфрам и др.), и, так называемых, секционированных систем с активными (размножающими) мишенями, по существу представляющими быстрый подкритический реактор с высокой утечкой нейтронов, являющихся источником для теплового бланкета. Двойное умножение нейтронов внешнего источника, сначала в быстрой мишени, а затем в тепловом бланкете, как предполагается, позволит существенно повысить тепловую мощность секционированной системы при фиксированном токе протонов и заданном уровне подкритичности.

Системы ATW/ABC характеризуются двумя основными физическими параметрами:

1) коэффициентом размножения системы - $k_{эф}$, являющимся решением задачи без источника и определяющим уровень подкритичности, а, следовательно, и ядерной безопасности системы;

2) коэффициентом умножения нейтронов источника - μ , являющимся решением задачи с источником, равным числу нейтронов деления в бланкете на один нейтрон внешнего источника и при заданной мощности внешнего источника определяющим тепловую мощность, а, следовательно, и трансмутационный потенциал бланкета.

Логичным критерием оптимальности является получение максимального коэффициента умножения нейтронов внешнего источника при заданном уровне подкритичности системы. Таким образом, при оптимизации и анализе систем возникает проблема определения связи решений задачи с источником и задачи без источника, т.е., в конечном счете, нахождение функционала, связывающего параметры $k_{эф}$ и ρ . Такая связь должна быть определена как для систем с пассивной, так и с активной мишенями.

При использовании активных мишеней является целесообразным применение компоновок, где нейтроны, рожденные в активной мишени, инициируют нейтроны деления в бланкете, а нейтроны деления в бланкете или не вызывают делений в активной мишени, или этот эффект весьма мал - так называемые системы с односторонней связью. Численное моделирование и расчет таких систем как единого целого традиционными реакторными методами является затруднительным, вследствие, главным образом, плохой сходимости решения. Кроме этого, при полном разрыве обратной связи, задача без источника может вообще не иметь стационарного состояния. В этой связи, является актуальной разработка точного и быстрого метода анализа систем с односторонней связью, позволяющего рассчитывать системы активная мишень/бланкет как единое целое в широком диапазоне величин обратной связи- от невозмущенной до полностью оборванной.

При проектировании систем АТW/АВС необходимо выбрать структуру, компоновку и материалы системы мишень/бланкет, в частности, тип мишени - активная или пассивная, базовый материал мишени, конструкционные материалы мишени и бланкета, целесообразность наличия замедлителя и поглотителя между мишенью и бланкетом и др. В этой связи возникает необходимость наличия простых, приближенных, но достаточно точных методов оценки влияния этих параметров на коэффициент умножения. Кроме этого, весьма желательно наличие результатов сравнительного качественного анализа систем с активной и пассивной мишенями, с различными компоновками и конструкционными материалами, применимых для широкого диапазона вариантов системы. Результаты такого анализа могут служить базой при принятии решения о целесообразности того или иного решения относительно компоновки и материалов системы.

Цель работы. Для систем как с пассивной, так и с активной мишенью:

- получить связь решения задачи с источником и задачи без источника;
- определить функционал, являющийся критерием оптимальности системы, с точки зрения достижения максимального умножения нейтронов внешнего источника в бланкете при фиксированной подкритичности системы;
- разработать методику точного численного решения задач с источником и без для систем активная мишень/ бланкет, обладающую хорошей сходимостью и быстродействием в широком диапазоне величин обратной связи;
- разработать приближенную, достаточно точную методику оценки умножения нейтронов внешнего источника;
- провести качественный сравнительный анализ, по определению влияния различных факторов на умножение нейтронов источника, результаты которого могут быть применимы для анализа и оптимизации систем типа ATW/ABC в широком диапазоне типов мишеней, компоновок и материалов системы мишень/бланкет.

Научная новизна и практическая ценность.

1. Впервые получена в общем виде связь решения задачи с источником и задачи без источника. В качестве отправной базы для подкритической системы предложено ввести понятие - **реперный источник**.
2. Впервые предложен критерий оптимальности системы с точки зрения достижения максимального умножения нейтронов при фиксированной подкритичности системы. В качестве критерия оптимальности предложено ввести понятие - **ценность нейтрона источника**.
3. Предложен новый метод точного решения задач с источником и без для систем активная мишень/бланкет в широком диапазоне величин обратной связи -**метод связанных зон**. Метод характеризуется хорошей сходимостью и быстродействием при любой, сколь угодно малой обратной связи.
4. Предложен новый приближенный и достаточно точный метод оценки умножения, применимый для систем с любым типом мишени.
5. Впервые проведен качественный анализ влияния на умножение нейтронов внешнего источника различных типов мишеней (активная или пассивная), материалов мишени, конструкционных материалов мишени и бланкета, компоновки и геометрии системы мишень/бланкет. Результаты анализа применимы для широкого диапазона вариантов систем.

6. Полученные результаты могут быть полезными при проектировании установок типа АТW/АВС, особенно при оптимизации и анализе систем. Результаты работы уже применены при разработке такого рода систем, в частности в рамках проекта МНТЦ №17, а также при проектировании создаваемой под научным руководством ИТЭФ установки “Электроядерный генератор нейтронов”.

Автор защищает:

- целесообразность введения для характеристики подкритических систем с источником типа АТW/АВС понятий реперный источник и ценность нейтрона внешнего источника;
- методику определения связи решений задачи с источником и задачи без источника;
- методику точного решения задач с источником и без для систем с односторонней нейтронной связью;
- метод приближенной оценки коэффициента умножения;
- результаты качественного сравнительного анализа и рекомендации по повышению эффективности систем АТW/АВС.

Структура диссертации.

Диссертация состоит из 124 страниц печатного текста, 23 рисунков, 22 таблиц. Список используемой литературы включает 30 наименований.

Апробация работы.

Основные положения диссертации докладывались на международных совещаниях и конференциях.

-The 2nd Meeting on ISTC project # 17. Arzamas-16, October 2-6 1995.

-The 3rd Meeting on ISTC project #17. Sanct-Petersburg, February 5-8, 1996.

-Second International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications. 3-7 June 1996, Kalmar, Sweden.

-International Workshop “Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Wastes”. Dubna, Russia, 29-31 May, 1996.

-Конференция “Усовершенствованные тяжеловодные реакторы”. Москва, ИТЭФ, 18-20 ноября 1997.

Публикации.

Материалы диссертации отражены в 5 авторских работах соискателя.

Содержание диссертации.

Ценность нейтрона внешнего источника.

Распределение потока нейтронов в подкритической системе мишень/бланкет определяется решением задачи с источником

$$MF(r) = -M_1 F(r) - q(r), \quad r \in V, F(S) = 0, \text{ где} \quad (1)$$

M - матрица переносов, замедления и поглощения; M_1 - матрица источников нейтронов деления; $q(r)$ - внешний вектор-источник; V - объем системы; S - экстраполированная поверхность системы.

Нейтронная мощность источника есть $Q_0 = \int_V q(r) dr,$

нейтронная мощность blankets $-Q = \int_V M_1 F(r) dr$ и умножение нейтронов

источника - $\mu = \frac{Q}{Q_0} = \frac{\int_V M_1 F(r) dr}{\int_V q(r) dr}.$

Пусть $F_0(r)$ решение критической задачи для системы (1)

$$MF_0(r) = -\frac{1}{k_{эф}} M_1 F_0(r) \text{ с нормировкой } Q_0 = \frac{1 - k_{эф}}{k_{эф}} \int_V M_1 F_0(r) dr.$$

Тогда $F_0(r)$ является также решением задачи с источником

$$MF_0(r) = -M_1 F_0(r) - q_0(r) \quad (2)$$

при источнике $q_0(r) = \frac{1 - k_{эф}}{k_{эф}} M_1 F_0(r).$

Умножение системой (2) нейтронов источника очевидно есть

$$\mu_0 = \frac{\int_V M_1 F_0(r) dr}{\int_V q_0(r) dr} = \frac{k_{эф}}{1 - k_{эф}}.$$

Определим $q_0(r)$ как реперный внешний источник и μ_0 - как умножение нейтронов реперного источника.

Вычитая (2) из (1), после простой вариационной процедуры получим:

$$\mu = \frac{k_{эф}}{1 - k_{эф}} \times \frac{\int_V q(r) \Psi(r) dr}{\int_V q_0(r) \Psi(r) dr}, \quad (3)$$

где $\Psi(r)$ - решение уравнения $M^+ \Psi(r) = -M_1^+ \Psi(r) - M_1^+, \quad \Psi(S) = 0.$

Выразим (3) как $\mu = \omega \frac{k_{эф}}{1 - k_{эф}}$, и определим ω как ценность нейтрона

внешнего источника:

$$\omega = \frac{\int_V q(r)\Psi(r)dr}{\int_V q_0(r)\Psi(r)dr}. \quad (4)$$

Ценность нейтрона внешнего источника является отношением размножающих потенциалов системы с реальным и реперным источником и связывает решения задач с источником и без. Этот параметр равен числу нейтронов реперного источника по размножающему потенциалу эквивалентному одному нейтрону реального источника, т.е. представляет ценность реального нейтрона в единицах реперного. Чем выше ценность нейтрона источника, тем выше умножение при фиксированной подкритичности системы. Именно этот параметр следует рассматривать как оптимизируемый функционал системы и критерий сравнения эффективности умножения систем с различной подкритичностью.

Внешний источник в (4) удобно рассматривать как распределение нейтронов первого поколения, определяемого из решения сравнительно простой задачи распределения нейтронов внешнего источника в системе.

Пусть $q_1(r)$ распределение нейтронов первого поколения в топливной зоне blankets. Ценность нейтронов источника (4) тогда есть

$$\omega = P_f \left(w + \frac{1 - k_{эф}}{k_{эф}} \right), \quad \text{где} \quad P_f = \frac{\int_V q_1(r)dr}{\int_V q(r)dr} = P_a \eta_a - \text{вероятность}$$

нейтрону источника инициировать нейтрон первого поколения; P_a - вероятность поглощения нейтрона источника в топливной зоне blankets; η_a - число вторичных нейтронов на поглощение; и

$$w = \frac{\int_V q_1(r)\Psi(r)dr}{\int_V q_1(r)dr} \times \frac{\int_V q_0(r)dr}{\int_V q_0(r)\Psi(r)dr} - \quad (5)$$

ценность нейтронов первого поколения. Для оценочных расчетов функция ценности задачи с источником в (5) может быть заменена функцией ценности, или даже распределением потока в критической системе. По опыту автора, для систем с однородной топливной зоной соответствующая погрешность не превышает ~5%.

**Метод связанных зон для анализа секционированных систем с
односторонней нейтронной связью.**

Решение задач с источником и без традиционными методами затруднено плохой сходимостью. Кроме этого, при полностью оборванной связи задача без источника может вообще не иметь стационарного состояния. Для преодоления расчетных сложностей предлагается метод связанных зон. В отличие от широко известного метода связанных бланкетов, в предлагаемом методе система рассматривается и рассчитывается как единое целое, т.е. как единый бланкет с двумя топливными зонами

Выразим критическую задачу для системы в целом как

$$MF(r) = -\frac{1}{k_{зф}} L_1 F(r) - \frac{1}{k_{зф}} L_2 F(r), \quad (6)$$

$$\text{где: } L_1(r) = \begin{cases} M_1(r) & r \in V_1 \\ 0 & r \notin V_1, \end{cases} \quad L_2(r) = \begin{cases} M_1(r) & r \in V_2 \\ 0 & r \notin V_2, \end{cases}$$

V_1, V_2 - объемы топливной зоны быстрой размножающей мишени и топливной зоны теплового blankets, соответственно.

Предположим далее, что система может иметь бесконечное множество стационарных состояний, характеризующихся наличием одновременно двух собственных чисел, отдельно для мишени и blankets, и удовлетворяющих уравнению

$$MF(r) = -\frac{1}{k_{зф}^1} L_1 F(r) - \frac{1}{k_{зф}^2} L_2 F(r). \quad (7)$$

Очевидно, что в случае $k_{зф}^1 = k_{зф}^2$ решения уравнений (6) и (7) совпадают, т.е. $k_{зф} = k_{зф}^1 = k_{зф}^2$. Если в (7) одно из собственных чисел зафиксировано, нахождение другого собственного числа любым традиционным методом является тривиальной задачей, не вызывающей каких либо проблем со сходимостью и временем счета. Следовательно, если решение задачи с одинаковыми собственными числами может быть выражено как функция решения произвольного состояния с различными собственными числами, итерационный процесс нахождения точного решения критической задачи будет тривиальной процедурой. Такая функция может быть определена следующим образом.

Пусть точное решение системы (6) - $F_0(r)$ известно:

$$MF_0(r) = -\frac{1}{k_{3\phi}} L_1 F_0(r) - \frac{1}{k_{3\phi}} L_2 F_0(r). \quad (8)$$

Введем далее: k_1, k_2 - коэффициенты размножения быстрого бланкета (мишени) и теплового бланкета, соответственно, являющихся решением уравнений:

$$MF_1(r) = -\frac{1}{k_1} L_1 F_1(r), \quad r \in V; \quad MF_2(r) = -\frac{1}{k_2} L_2 F_2(r), \quad r \in V; \quad F_1(S) = F_2(S) = 0.$$

Выразим решение критической задачи (8) как решение для подкритического бланкета с внешним источником:

$$MF_0(r) = -L_2^* F_0(r) - q_1(r), \quad \text{где} \quad (9)$$

$$L_2^* = \frac{1}{k_{3\phi}} L_2; \quad q_1(r) = \frac{1}{k_{3\phi}} L_1 F_0(r).$$

Критическая задача для системы (9) есть $MF(r) = -\frac{k_{2\phi}}{k_2} L_2^* F(r)$.

Применяя введенное ранее понятие ценности нейтрона источника для нейтронов деления в мишени, запишем соотношение нейтронных мощностей мишени и бланкета как $Q_2 = Q_1 \times \omega_{12} \frac{k_2/k_{3\phi}}{1 - k_2/k_{3\phi}}$, где

ω_{12} - ценность нейтронов деления мишени по отношению к умножению в бланкете. Этот параметр может рассматриваться как коэффициент связи мишень-бланкет.

Применяя подобную процедуру для подкритической мишени с внешним источником, получим $Q_1 = Q_2 \times \omega_{21} \frac{k_1/k_{3\phi}}{1 - k_1/k_{3\phi}}$, где ω_{21} - ценность нейтронов деления бланкета по отношению к умножению в мишени. Этот параметр может рассматриваться как коэффициент связи бланкет-мишень.

С учетом этих соотношений, эффективный коэффициент размножения системы как целого есть

$$k_{3\phi} = \frac{(k_1 + k_2) + \sqrt{(k_1 - k_2)^2 + 4\omega_{12}\omega_{21}k_1k_2}}{2}. \quad (10)$$

В частном случае, когда $k_1 = k_2 = k$, $k_{3\phi} = k(1 + \sqrt{\omega_{12}\omega_{21}})$.

С применением полученных соотношений коэффициенты связи могут быть определены из любого произвольного состояния системы (7):

$$\omega_{12} = \frac{Q_2}{Q_1} \frac{1 - k_2 / k_{3\phi}^2}{k_2 / k_{3\phi}^2}; \quad \omega_{21} = \frac{Q_1}{Q_2} \frac{1 - k_1 / k_{3\phi}^1}{k_1 / k_{3\phi}^1},$$

и $k_{3\phi}$ системы в целом определяется из соотношения (10).

Таким образом, мы выразили решение критической системы (6) как функцию решения некоторого произвольного состояния системы (7) с двумя различными собственными числами. Разумеется, получение точного решения требует итерационной процедуры, однако, вследствие относительной нечувствительности коэффициентов связи к значениям $k_{3\phi}^1$ и $k_{3\phi}^2$ для этого необходимо относительно небольшое (обычно 3-4) число итераций.

Выразим задачу с источником в виде $MF(r) = -L_1F(r) - L_2F(r) - q(r)$. Следуя процедуре, примененной к критической системе, рассматривая мишень (бланкет) как подкритическую систему с двумя внешними источниками, и вводя прямую ценность нейтронов внешнего источника в мишени и бланкете, без учета взаимного умножения (например, v_f для мишени принимается равным нулю при определении ω_{02}), получим умножение нейтронов внешнего источника в тепловом бланкете секционированной системы $\mu = \frac{Q_2}{Q_0} = \omega \times \frac{k_{3\phi}}{1 - k_{3\phi}}$, где ω - ценность нейтронов источника секционированной системы

$$\omega = \omega^1 \times \omega^2 \times \omega^3 \times \omega^4, \text{ и} \quad (11)$$

$$\omega^1 = 1 + \omega_{01} \frac{k_1}{1 - k_1} \frac{\omega_{12}}{\omega_{02}}; \quad \omega^2 = \omega_{02};$$

$$\omega^3 = \frac{k_2}{1 - k_2} \frac{1}{1 - k_{3\phi}}; \quad \omega^4 = \frac{1}{1 - \omega_{12}\omega_{21} \frac{k_1}{1 - k_1} \frac{k_2}{1 - k_2}}.$$

Изложенная методика реализована в разработанной автором двухмерной (R-Z) диффузионной программе BNAWAT, оттестированной на ряде эталонных критических задач. Тестирование задачи с источником производилось введением в критическую задачу реперного источника. Тестирование метода связанных зон - произвольным делением активной зоны тестовой задачи на две зоны.

Далее приведены результаты анализа компоновок традиционных и секционированных систем, разработанных в ходе проекта МНТЦ №17.

Анализ традиционных систем.

Из приведенных соотношений видно, что имеются две величины, наиболее сильно влияющие на ценность нейтронов источника и, следовательно, умножение: 1) P_a , -вероятность нейтрону источника поглотиться в топливной зоне бланкета, и 2) w - ценность нейтронов первого поколения.

Параметр P_a определяется, главным образом, вероятностью нейтрону источника избежать поглощения на пути от рождения в мишени до поглощения в топливной зоне бланкета, с учетом поглощения нейтронов источника, сначала вышедших из мишени в бланкет и замедлившихся в нем, но затем отраженных обратно. Кроме этого,

сильное поглощение в мишени и прилегающих к ней элементах бланкета формирует завал функции ценности в топливной зоне бланкета в сторону мишени, т.е. в области, где рождается основная часть нейтронов первого поколения, снижая, таким образом, их ценность. Следовательно, для повышения умножения для конструктивных элементов должны применяться материалы с

малым поглощением быстрых и тепловых нейтронов. На Рис. 1-3 приведены результаты анализа этих эффектов из расчета тяжеловодного бланкета со свинцовой мишенью и $k_{эф}=0.95$. В расчетах, представленных на Рис.1, мишень заменена тяжелой водой. В расчетах на Рис.2 твердосвинцовая мишень, охлаждаемая тяжелой водой,

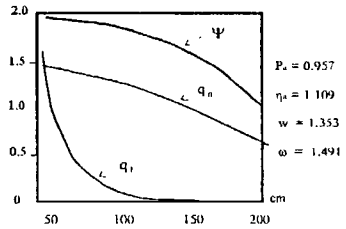


Рис. 1.
Система без мишени.

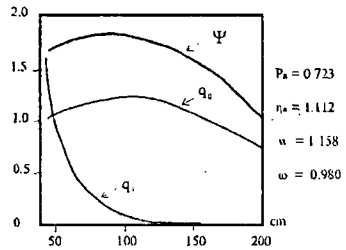


Рис. 2.
Водоохлаждаемая твердосвинцовая мишень
в Zr-корпусе.

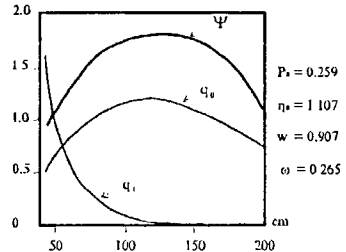


Рис. 3
Жидкосвинцовая мишень в Fe-корпусе.

размещена внутри Zr-корпуса, внутренним диаметром 50.0 см и 0.5 см толщиной. В расчетах на Рис.3 жидкосвинцовая мишень размещена внутри стального корпуса толщиной 5.0см и внутренним диаметром 50.0 см.

Другим возможным путем повышения величины P_a является повышение сечения поглощения топливной зоны бланкета, что снижает длину диффузии тепловых нейтронов и, соответственно, эффект отражения замедлившихся в бланкете нейтронов мишени обратно в мишень. Этот эффект анализируется на Рис.4 для случая жидкосвинцовой мишени.

Величина w может быть повышена за счет применения двухзонной компоновки топливной зоны бланкета с более высокой реактивностью зоны, примыкающей к мишени, где рождается основная часть нейтронов первого поколения, что заметно повышает их ценность.

Однако, при таком подходе неизбежно существенно возрастает неравномерность энерговыделения. Анализ этого эффекта представлен на Рис.5, где параметр w_2 есть нейтронная мощность второй подзоны, нормированная на один нейтрон внешнего источника.

Результаты проведенного качественного анализа показывают, что при фиксированной подкритичности системы наиболее эффективным путем повышения умножения в системах с традиционной компоновкой является применение слабопоглощающих материалов на пути от рождения нейтрона источника до его поглощения в топливной зоне бланкета, включая первичный материал мишени, конструкционные материалы мишени, корпус мишени, внутренний корпус бланкета и т.д.

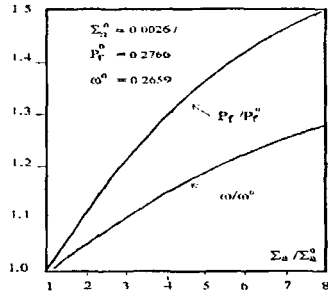


Рис.4.

Влияние сечения поглощения в топливной зоне бланкета

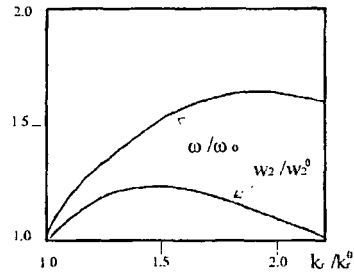


Рис.5

Характеристики двухзонной компоновки как функции неравномерности энерговыделения

Хотя повышение сечения поглощения топливной зоны приводит к заметному повышению P_f , увеличение умножения достаточно незначительно, поскольку соответствующее снижение длины диффузии смещает область основного рождения нейтронов первого поколения в сторону мишени, т.е. в область с подавленной функцией ценности. Кроме этого, повышение сечения поглощения сопровождается пропорциональным снижением величины потока и повышением загрузки топлива.

Двухзонная компоновка заметно повышает умножение, однако, выигрыш в умножении обусловлен, в основном, повышением умножения в первой подзоне, приводя таким образом к резкому повышению неравномерности энерговыделения и делая бессмысленной компоновку, где первая подзона используется только как умножитель и не содержит полезного поглотителя.

В целом можно заключить, что для традиционных компоновок возможно получение ценности нейтронов источника ~ 1 при разумной величине неравномерности энерговыделения.

Анализ секционированных систем с односторонней нейтронной связью.

Основным преимуществом секционированных систем с точки зрения умножения является то, что нейтроны внешнего источника умножаются сначала в быстром подкритическом бланкете, повышая таким образом полное число нейтронов, поступающих в тепловой бланкет и умножаемых в нем. В соотношении для ценности нейтронов источника (11), умножение нейтронов в быстром бланкете учитывается сомножителем ω^1 , представляющим полное число нейтронов деления в быстром бланкете на один внешний нейтрон. Сомножитель ω^2 есть прямая ценность нейтронов быстрого бланкета по отношению к умножению в тепловом бланкете, и является полным аналогом ценности в традиционных системах, рассмотренных выше. Сомножитель ω^3 учитывает отличие коэффициента размножения теплового бланкета от $k_{3\phi}$ системы. Сомножитель ω^4 отражает эффект взаимонаведенного (быстрый-тепловой бланкет) повышения скоростей реакций деления, повышающего мощность теплового бланкета.

Эффективным путем повышения параметров ω^1 и ω^3 при фиксированном значении $k_{3\phi}$ системы является применение односторонней нейтронной связи, т.е. конфигурирование системы таким образом, чтобы нейтроны деления теплового бланкета не инициировали нейтронов деления в быстром бланкете (параметр ω_{21} близок к нулю). Согласно соотношению (10), это приведет к повышению коэффициентов размножения обоих

бланкетов и к соответствующему повышению параметров ω^1 и ω^3 . Это может достигаться либо применением порогового делящегося материала в быстром бланкете, либо размещением между бланкетами слоя эффективного теплового поглотителя, что снижает число делений в быстром бланкете за счет тепловых нейтронов, пришедших из теплового бланкета.

Повышение умножения быстрого бланкета требует концентраций делящихся изотопов, приводящих к большой величине сечения поглощения быстрых нейтронов, поскольку достаточно высокое значение $k_{3\phi}$ быстрого бланкета ($\sim 0.90-0.95$) должно достигаться при сравнительно низких значениях k_{∞} его топливной зоны, обусловленных разумной с практической точки зрения конфигурацией ($k_{\infty} \sim 1.5$ для 20%-обогащенной двуокиси урана и ~ 1.15 для ^{237}Np двуокиси). Поскольку все делящиеся материалы (как пороговые, так и непороговые) являются сильными тепловыми поглотителями, быстрый бланкет будет также и сильным поглотителем тепловых нейтронов. Учитывая наличие слоя сильного теплового поглотителя между бланкетами, любая компоновка секционированной системы вступает в противоречие с отмеченной ранее необходимостью отсутствия сильных поглотителей между нейтронами источника (в данном случае нейтронами внешнего источника для теплового бланкета являются нейтроны деления быстрого бланкета) и топливной зоной теплового бланкета, что приводит к заметному снижению ценности внешних нейтронов по отношению к умножению в тепловом бланкете (сомножитель ω^2).

Таким образом, секционированные системы, характеризуясь наличием двойного умножения, неизбежно обладают и существенным двойным паразитным поглощением на пути от рождения внешнего нейтрона до его поглощения в тепловом бланкете. Это двойное поглощение представляет - поглощение внешних нейтронов в быстрой области до их выхода из быстрого бланкета и, затем, поглощение в тепловой области нейтронов источника, сначала вышедших в тепловой бланкет и замедлившихся в нем, но затем отраженных обратно в область быстрого бланкета. Таким образом, возможность получения существенного выигрыша в умножении за счет применения секционированных систем, обладающих разумной с точки зрения трансмутации компоновкой, не является столь очевидной. Вполне очевидно, однако, что выигрыш возрастает с повышением $k_{3\phi}$ системы, за счет соответствующего повышения эффекта двойного умножения, в то время как вклад двойного поглощения при повышении $k_{3\phi}$ остается неизменным.

В Табл. 1 и 2 представлены результаты расчета задач с источником и без для систем с тепловым бланкетом типа MSBR, $k_{эф} = 0.95$, и двумя типами быстрого бланкета - непороговый из 20% двуокиси урана и пороговый из ^{237}Np -двуокиси, и внутренним диаметром ~ 60 см. Вариант 0 соответствует компоновке с прямым контактом топливных зон быстрого и теплового бланкетов. В варианте 1 добавлены 10 см W-корпус быстрого бланкета и 5-см корпус из Хаstellоя теплового бланкета. В вариантах 2,3,4 добавляется внутренний графитовый отражатель толщиной 10, 20, и 40 см, соответственно. В Табл.3 представлены основные результаты расчетов варианта 3 как функции $k_{эф}$ системы.

Из Табл. 1 видно, что преимущество пороговой мишени в разрыве обратной связи заметно проявляется только в гипотетическом варианте 0. Даже в отсутствие внутреннего отражателя (Вариант 1) в непороговой мишени практически отсутствуют деления, вызванные тепловыми нейтронами из бланкета. Это обусловлено, главным образом, сильным поглощением в корпусах теплового и быстрого бланкета. Таким образом, для секционированных систем с разумной для целей трансмутации компоновкой пороговые мишени не имеют заметного преимущества над непороговыми.

Из приведенных результатов для секционированных бланкетов, предназначенных для целей трансмутации, можно сделать основные выводы.

1. Применение в качестве делящегося материала быстрого бланкета ^{237}Np -двуокиси, почти вдвое менее эффективно, чем 20% U -двуокиси, за счет более низкого $k_{эф}$ топливной зоны из Np, что приводит к более низкой утечке. Принципиально возможным путем повышения утечки является применение металлического нептуния, охлаждаемого газом. Однако, при типичных для трансмутации мощностях бланкета выше ~ 500 МВт возможность практической реализации такого способа представляется достаточно маловероятной.

2. При $k_{эф} = 0.95$ ценность нейтронов источника секционированных систем составляет ~ 2 и отношение мощности теплового бланкета к мощности быстрого ~ 2.5 . Учитывая, что мощность быстрого бланкета разумной компоновки будет не выше ~ 70 МВт, это соответствует верхней предельной мощности теплового бланкета $\sim 150-200$ МВт, что, очевидно, недостаточно для целей трансмутации.

3. При $k_{эф} = 0.99$ ценность нейтрона источника может достигать ~ 6 , и верхний предел мощности теплового бланкета ~ 500 МВт.

Таблица 1. Основные физические параметры задачи без источника.

Вариант	0	1	2	3	4
DR(cm)	0	0	10.0	20.0	40.0
Непороговая мишень					
$k_{3\beta}$	0.95				
$k_{1,2}$	0.845	0.930	0.935	0.938	0.945
w_{12}	0.352	0.173	0.164	0.154	0.106
w_{21}	0.0435	0.00255	0.00175	0.00106	0.000237
$1 + \sqrt{\omega_{11} \omega_{21}}$	1.124	1.021	1.016	1.0128	1.005
Q_2/Q_1	2.84	8.22	8.98	12.04	21.14
Пороговая мишень					
$k_{3\beta}$	0.95				
$k_{1,2}$	0.932	0.941	0.943	0.945	0.948
w_{12}	0.143	0.0765	0.0750	0.0685	0.0553
w_{21}	0.00261	0.00111	0.00083	0.00040	0.00009
$1 + \sqrt{\omega_{12} \omega_{21}}$	1.019	1.0092	1.0079	1.0053	1.0021
Q_2/Q_1	7.40	8.28	9.52	13.02	25.3

Таблица 2. Основные физические параметры задачи с источником.

Вариант	0	1	2	3	4
DR(cm)	0	0	10.0	20.0	40.0
Непороговая мишень					
$k_{3\beta}$	0.95				
w_1	7.66	14.40	15.39	16.16	18.21
w_2	0.292	0.165	0.161	0.148	0.118
w_3	0.287	0.704	0.760	0.796	0.909
w_4	2.086	1.135	1.122	1.053	1.021
w	1.339	1.901	2.011	2.001	2.204
Q_2/Q_1	1.994	2.427	2.557	2.441	2.204
Пороговая мишень					
$k_{3\beta}$	0.95				
w_1	13.00	16.36	16.66	17.39	18.35
w_2	0.148	0.074	0.073	0.066	0.053
w_3	0.721	0.844	0.864	0.905	0.958
w	1.555	1.061	1.074	1.056	0.930
Q_2/Q_1	2.04	1.273	1.276	1.215	1.021

Таблица 3. Влияние критичности на параметры варианта 3.

$k_{3\beta}$	0.93	0.95	0.96	0.98	0.99
Непороговая мишень					
$k_{1,2}$	0.920	0.938	0.950	0.969	0.979
w	1.63	2.00	2.44	3.69	5.72
Q_2/Q_1	1.90	2.44	3.08	5.12	7.30
Пороговая мишень					
$k_{1,2}$	0.925	0.945	0.954	0.975	0.985
w	0.817	1.05	1.24	2.16	3.26
Q_2/Q_1	0.91	1.22	1.81	2.77	4.71

Сравнение традиционных и секционированных систем.

Критерием сравнения является величина умножения при фиксированной, одинаковой для обеих систем, подкритичности, или, что то же самое, величина ценности нейтрона источника.

В первую очередь, если в системах с неразмножающимися мишенями ценность нейтрона источника практически не зависит от подкритичности (т.е. $k_{3\phi}$) системы, то в системах с размножающимися мишенями ценность нейтрона источника заметно возрастает с понижением подкритичности (повышением $k_{3\phi}$) системы. Соответственно, сравнительная эффективность умножения будет различной при различной величине подкритичности системы. Чем ниже подкритичность, тем выше эффективность умножения систем с размножающимися мишенями, по сравнению с неразмножающимися.

Главным преимуществом систем с размножающимися мишенями является наличие двойного умножения нейтронов источника, сначала в мишени, затем в бланкете, что заметно повышает общее умножение. Эффект двойного умножения тем выше, чем выше $k_{3\phi}$ системы. Однако, нейтроны деления мишени, до их поглощения в топливной зоне бланкета, испытывают значительное паразитное поглощение в центральной полости бланкета, ограниченной снаружи внутренним радиусом топливной зоны бланкета. Этот эффект полностью аналогичен эффекту паразитного поглощения нейтронов источника в системах с неразмножающимися мишенями, если под нейтронами источника для бланкета рассматривать не только нейтроны внешнего источника, рождаемые в мишени, но и нейтроны деления в мишени. Как показано в работе, для трансмутационных установок, с учетом необходимого уровня их мощности и требований безопасности, единственным эффективным способом снижения паразитного поглощения является применение в центральной полости материалов с малым сечением поглощения тепловых и быстрых нейтронов. В системах с неразмножающимися мишенями это может достигаться применением слабопоглощающего активного материала мишени, например свинца, и слабопоглощающих конструкционных материалов мишени и внутренней стенки корпуса бланкета, например циркония или пирографита. В системах с размножающимися мишенями эта возможность исключена, в первую очередь потому, что сам делящийся материал мишени является сильным поглотителем как быстрых, так и тепловых нейтронов. Кроме этого, в случае непорогового материала мишени, для обрыва обратной связи необходимо наличие сильнопоглощающего слоя между мишенью и бланкетом, что значительно повышает паразитное поглощение отраженных из бланкета нейтронов

мишени. Величина эффекта паразитного поглощения практически не зависит от $k_{зф}$ системы.

Таким образом, системы с размножающимися мишенями, обладая преимуществом двойного умножения, существенно проигрывают оптимальным образом спроектированным системам с неразмножающимися мишенями в эффекте паразитного поглощения. Эффект паразитного поглощения не зависит, а эффект двойного умножения возрастает с ростом $k_{зф}$ системы. На уровне $k_{зф} \sim 0.94-0.96$ в задачах трансмутации системы с размножающимися мишенями могут повысить умножение в ~ 2 раза, по сравнению с системами с неразмножающимися мишенями. При этом, правда, тепловая мощность blankets не превысит ~ 200 МВт. На уровне $k_{зф} \sim 0.98-0.99$ выигрыш систем с размножающимися мишенями может составлять $\sim 4-6$, при достижении тепловой мощности blankets $\sim 500-1000$ МВт.

Для систем с уровнем мощности существенно меньшим, чем в задачах трансмутации, , выигрыш систем с размножающимися мишенями может быть увеличен еще в $\sim 2-3$ раза путем, главным образом: снижения радиуса мишени до ~ 10 см, с соответствующим снижением радиуса центральной полости; применения металлического топлива в мишени, охлаждаемой газом; введения достаточно широкой пустотной полости между мишенью и топливной зоной blankets.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие основные выводы по возможности повышения эффективности систем.

Для традиционных систем с неразмножающимися мишенями наиболее эффективным путем повышения эффективности умножения является применение слабопоглощающих материалов в центральной полости blankets, ограниченной снаружи внутренним радиусом топливной зоны blankets. Другие возможные пути повышения эффективности умножения - снижение радиуса мишени, повышение сечения поглощения топливной зоны blankets, введение пустотной полости между мишенью и blanketом, применение многозонной компоновки топливной зоны, для трансмутационных систем менее эффективны, хотя являются весьма действенными для систем с малыми мощностями мишени и blankets.

Применение секционированных систем особенно эффективно на уровне $k_{зф} \sim 0.98-0.99$, где ценность нейтрона источника может достигать $\sim 5-10$. Возможные пути повышения эффективности: применение металлического топлива в мишени охлаждаемой газом, снижение радиуса мишени, введение пустотной полости между мишенью и топливной зоной blankets, повышение сечения поглощения в топливной зоне blankets, применение многозонной компоновки топливной зоны blankets, для

трансмутационных систем по видимому, являются неприменимыми с точки зрения достижения необходимого уровня мощности и требований безопасности. Однако, для систем малой мощности эти пути повышения размножения являются весьма эффективными.

Основные результаты работы:

- для подкритических систем с внешним источником предложены новые физические характеристики - реперный источник и ценность нейтронов внешнего источника;
- разработаны точные и приближенные методики определения оптимизируемого функционала системы - ценности нейтронов источника;
- для секционированных систем с односторонней нейтронной связью предложен новый метод точного решения задач с источником и без источника - метод связанных зон;
- для репрезентативных систем с размножающими и не размножающими мишенями проведен расчетный анализ зависимости эффективности умножения от принципа компоновки, геометрических размеров и физических свойств материалов систем;
- для проектирования подкритических систем с внешним источником предложены рекомендации по выбору оптимальных характеристик систем, примененных, в частности, в проекте МНТЦ №17, и при проектировании экспериментальной установки "Электроядерный генератор нейтронов".

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Селиверстов В.В. Умножение нейтронов внешнего источника в каскадных подкритических системах с односторонней нейтронной связью. Атомная энергия, т.81, вып.5, ноябрь 1996, С. 378-390.
2. Селиверстов В.В. Ценность нейтрона внешнего источника в подкритических системах. М. Препринт ИТЭФ, №37, 1996.
3. V.V.Seliverstov. Analysis of spallation neutron importance in accelerator-driven target-blanket systems, in Proceeding of Second International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, June 3-7, 1996, Kalmar, Sweden. P.891-897.
4. Селиверстов В.В. К теории подкритических систем. В материалах конференции "Усовершенствованные тяжеловодные реакторы" (Москва, 18-20 ноября 1997г.) - М. ИТЭФ, 1998. С.93-104
5. Селиверстов В.В. Методика определения подкритичности установки "Нейтронный источник" в установившемся режиме работы. М. Препринт ИТЭФ, №31, 1997.