

На правах рукописи



**Чукбар Борис Константинович**

**РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММЫ MSU ДЛЯ  
РАСЧЁТОВ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ЯДЕРНО-  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Национальном Исследовательском Центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

Научный руководитель: *Гуревич Михаил Исаевич,*  
Доктор физико-математических наук, Институт перспективных энергетических технологий (КЦЯТ, НИЦ «Курчатовский институт»), главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты *Щукин Николай Васильевич,* д.ф.-м.н., профессор НИЯУ МИФИ;  
*Сухарёв Юрий Петрович,* д.т.н., ОКБМ.

Ведущая организация: *ВНИИАЭС*

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г. в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 520.009.06 при НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте [www.nrcki.ru](http://www.nrcki.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



В.Г. Мадеев

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Развитие энергетики требует разработки новых типов ядерно-энергетических установок (ЯЭУ), по многим параметрам существенно отличающихся от эксплуатируемых в настоящее время. Поэтому в различных организациях ведутся работы по проектированию перспективных вариантов подобных устройств. Для анализа безопасности проектируемых аппаратов, для оптимизации их параметров необходима совокупность экспериментальных, теоретических и расчетных исследований. При этом последние, как наиболее дешевые, начинают играть большую роль уже на этапах эскизного проектирования. Важное место среди них занимают нейтронно-физические расчеты.

В числе перспективных ЯЭУ рассматриваются ядерные реакторы с микротопливом, которое является незаменимым компонентом высокотемпературных реакторов (ВТГР). Уже давно был создан ряд критических сборок с микротопливом (АСТРА, ГРОГ, PROTEUS, HTR-10), ведутся разработки новых ЯЭУ, основанных на его использовании. Оно может оказаться перспективным и для других типов ЯЭУ.

Еще одним важным направлением исследований является проектирование термоядерных источников нейтронов для наработки топлива или сжигания минорных актинидов из отработанного топлива ядерных реакторов. Одна из решаемых при этом задач заключается в создании бланкетов для утилизации термоядерных нейтронов, в первую очередь 14 Мэвных D+T нейтронов. Для этого необходимы, в том числе, и расчеты переноса этих нейтронов, а также вызванных ими вторичных нейтронов. Представляют также интерес скорости протекающих при этом ядерных реакций, оценки изменений нуклидных составов и активаций материалов.

При разработке новых типов ЯЭУ большую роль играют прецизионные нейтронно-физические расчеты. Их значение для оценки параметров проектируемых аппаратов заметно выше, чем для существующих, для которых успешно применяются инженерные методы расчета, имеющие ограниченную область применения, но прекрасно приспособленные, за счет большого количества экспериментальных данных, к соответствующему типу реактора.

Современные прецизионные программы для нейтронно-физических расчетов обладают возможностями описания устройств очень разнообразной геометрии и материального состава. Большая часть из них, применяемая для расчета скоростей реакций, в том числе в активной зоне реактора, основана на методе Монте-Карло. В мире используется несколько таких универсальных программ, самой распространенной является американская программа MCNP. В нашей стране широко используется созданная в РНЦ (на сегодняшний день НИЦ) «Курчатовский институт» программа MSU, аттестованная Ростехнадзором для оценки

безопасности всех российских энергетических реакторов, а также и для ряда других ЯЭУ. Эта программа широко используется и при проектировании новых аппаратов. Поэтому актуальны анализ ее возможностей для расчета систем с микротопливом и бланкетов термоядерных установок, определение пределов применимости, создание необходимых дополнительных возможностей.

### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы была оценка применимости программного пакета MCU для случаев высоких энергий нейтронов ( $>14$  МэВ) и случаев высокого содержания зёрен делящегося материала в шаровых твэлах (более  $170 \text{ см}^3$ ), а также внесение по результатам этой оценки необходимых изменений, расширяющих возможности геометрического, транспортного и физического модулей. В ходе работы были поставлены и решены следующие задачи:

- Верификация алгоритма CORN пакета MCU, моделирующего микротопливо, на примере параметров двух установок: АСТРА с кольцевой активной зоной и PROTEUS. Анализ моделирования микротоплива регулярными и возмущёнными регулярными решётками. Сравнение результатов алгоритма CORN и расчетов с применением регулярных и возмущённых решеток.
- Моделирование разрабатываемого Термоядерного Источника Нейтронов (ТИН) с применением пакета MCU. Определение и реализация необходимых изменений физического модуля для учёта пороговых реакций, появляющихся при больших энергиях нейтронов.
- Внесение изменений в геометрический модуль, позволяющих создать древовидную иерархию сетей.

### **Научная новизна работы**

В ходе работы впервые внесён следующий ряд изменений в пакет MCU:

- Внесены изменения в геометрический и транспортный модули программы MCU, обеспечивающие возможности создавать иерархию сетей, очереди частиц, ожидающих моделирования, с элементами различной длины, задаваемой при постановке элементов в очередь. Реализована возможность ссылок на картограммы атрибутов, находящихся на любом уровне иерархии. Обеспечена автоматическая генерация подобных ссылок.
- Модифицирован один из подмодулей физического модуля программы MCU, что позволяет регистрировать более широкий набор ядерных реакций, в том числе  $n \rightarrow 3n$ ,  $n \rightarrow \alpha$ ,  $n \rightarrow p$ ,  $n \rightarrow n+\alpha$ ,  $n \rightarrow n+p$ ,  $n \rightarrow T$ .

Впервые проведена углублённая верификация работы алгоритма CORN пакета MCU для высоких концентраций зёрен, достигающих до  $1000 \text{ см}^{-3}$ .

В ходе работы выполнены следующие исследования:

- Проведена верификация расчётами пакетом MCU результатов расчётов на MCNP модели критического стенда PROTEUS. Подтверждено наличие ошибки в численной модели, используемой в публикации [*Bess John D., Sterbentz James W., Snoj Luka, Lengar Igor, Köberl Oliver. HTR-Proteus Pebble Bed Experimental Program Cores 9 & 10: Columnar Hexagonal Point-on-Point Packing with a 1:1 Moderator-to-Fuel Pebble Ratio NEA/NSC/DOC (2006)1, INL/EXT-12-27057, Idaho National Laboratory (INL), March 2013*], превышающей  $K_{эф}$  на ~2%.
- Проведены исследования методов генерации загрузки активной зоны шаровыми элементами (9840 элементов) на примере PROTEUS, выявлено серьёзное влияние подхода к генерации загрузки на конечный результат расчётов (до долей процента в оценке  $K_{эф}$ ).
- Проведена серия расчётов разрабатываемого в НИЦ “Курчатовский Институт” Термоядерного Источника Нейтронов (ТИН). Проанализированы различные компоненты установки с позиции нейтронного моделирования: экран между бланкетом и термоядерным источником, различные варианты состава бланкета, общая эффективность ТИН с позиции эффективности наработки  $^{233}\text{U}$  из  $^{232}\text{Th}$ . На основе результатов расчётов сделаны рекомендации по составу бланкета, а также составу и толщине экрана между бланкетом и термоядерным источником нейтронов. Дана оценка общей эффективности работы установки.

### **Практическая значимость работы**

Изменения программного пакета MCU, сделанные в ходе работы, позволяют расширить его применимость в следующих областях:

- Для случаев нейтронов высоких энергий ( $>14 \text{ МэВ}$ ) введён учёт возникающих пороговых реакций. Это позволит использовать пакет MCU в дальнейшем для более точных расчётов перспективных вариантов термоядерных реакторов наработчиков топлива, гибридных термоядерных-ядерных систем и моделировать иные установки, использующие нейтроны подобных энергий.
- Введение иерархии сетей позволяет серьёзно упростить моделирование установок, имеющих значительное количество уровней геометрии конструкции. До введения данных изменений существовали серьёзные ограничения возможности последовательного вложения регулярных

решёток/сетей элементов друг в друга. Это создавало проблемы при попытках моделирования, например, установок, использующих компакты.

Обнаруженная проблема заметного влияния на результат расчётов генерации загрузки активной зоны, состоящей из случайной засыпки 10 и более тысячами шаровых элементов, имеет важное значение для моделирования ВТГР с шаровыми элементами с микротопливом. Её решение необходимо для дальнейшего развития моделирования данного типа установок.

### **Личный вклад автора**

Все основные результаты диссертационной работы получены лично автором.

- Верификация алгоритма CORN пакета MCU для случаев повышенного содержания зёрен делящегося материала в шаровых твэлах с графитовой матрицей и с топливом из оксида урана для плотностей микротоплива порядка  $1000 \text{ см}^{-3}$ .
- Исследование методов моделирования микротоплива с применением регулярных и возмущённых регулярных решёток, а также вопроса допустимости гомогенизации покрытия зёрен делящегося материала с графитовой матрицей.
- Проведен анализ геометрических приближений, используемых в алгоритме CORN, и предложена модификация этого алгоритма, учитывающая конечность размеров зёрен топливных частиц. Для плотности  $350 \text{ ед./см}^3$  возникают различия в основных геометрических характеристиках в модели CORN и в модели, учитывающей конечность размеров зёрен и парные взаимодействия между ними.
- Показано, что описание стенда PROTEUS содержит неточности, так как расчеты по программе MCU дают ту же завышенную оценку, что и проведенные ранее во Франции расчеты по программе MCNP-5. Обнаружено, что при моделировании случайной засыпки шаровых твэлов вместе с замедлительными графитовыми шаровыми элементами случайности в реализации могут приводить к колебаниям критичности порядка 0.5%. Наиболее существенным является получающиеся изменения высоты засыпки при сохранении числа шаров.
- Проведена модификация геометрического модуля программы MCU, состоящая в обеспечении возможности создавать иерархию сетей, допускаются ссылки на картограммы атрибутов, находящихся на любом уровне иерархии. Обеспечена автоматическая генерация подобных ссылок.

- Модифицирован один из подмодулей физического модуля программы MCU, что позволяет регистрировать более широкий набор ядерных реакций, в том числе  $n \rightarrow 3n$ ,  $n \rightarrow \alpha$ ,  $n \rightarrow p$ ,  $n \rightarrow n+\alpha$ ,  $n \rightarrow n+p$ ,  $n \rightarrow T$ . Расчеты бланкета термоядерного источника нейтронов на основе тетрафторида  $^{232}\text{Th}$  в расплаве FLiNaK, и оптимизация скоростей ядерных реакций. Предложен свинцовый экран, дающий дополнительные нейтроны и смягчающий энергию нейтронов подпороговых нежелательных реакций. Найдена оптимальная толщина этого экрана.

### **Достоверность и обоснованность результатов работы**

Расчётные результаты, полученные в ходе работы, подтверждены путём:

- В случае расчётов PROTEUS и АСТРА - параллельного расчёта моделей как с использованием алгоритма CORN пакета MCU, так и метода регулярных решёток. Последний является самым распространённым и применяемым методом моделирования микро топлива, и верифицирован многочисленными экспериментальными данными.
- В случае завышенного  $K_{эф}$  при расчёте полноразмерной модели PROTEUS – полученными до этого результатами независимых расчётов пакетом MCNP.
- В случае расчётов ТИН – независимыми расчётами с использованием MCNP.

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

- Верификация алгоритма CORN на основе расчётов с использованием параметров установок PROTEUS и АСТРА, а также для случаев повышенного содержания микро топлива.
- Расчёты Термоядерного Источника Нейтронов (ТИН) и сделанные из их результатов рекомендации по его конструкции.
- Внесение изменений в геометрический, транспортный и физический модули программного пакета MCU, расширяющие его применимость.

### **Апробация работы и публикации**

Основные материалы диссертации опубликованы в российских рецензируемых научных журналах, включённых в перечень ВАК, [1,2]:

1. Б.В. Кутеев, А.В. Жиркин, **Б.К. Чукбар**, В.Ф. Батяев, Ю.Е. Титаренко, К.В. Павлов, А.Ю. Титаренко, С.Н. Юлдашев, В. Гудовски Нейтронно-физические исследования термоядерного источника нейтронов для получения максимального потока тепловых нейтронов / ВАНТ “Термоядерный синтез”. 2013. В.1. С. 64-78.
2. **Б.К. Чукбар** Верификация статистического метода CORN моделирования микро топлива для случаев повышенного содержания зёрен / ВАНТ «Физика Ядерных Реакторов». 2014. В. 1-2. С. 15-21.

Доложены и опубликованы в материалах российских [3] и международных [4,5] конференций.:

3. Б.В. Кутеев, А.В. Жиркин, М.И. Гуревич, **Б.К. Чукбар**, Ю.Е. Титаренко, В.Ф. Батяев, В. Гудовски Расчётный анализ нейтронно-физических характеристик термоядерного источника в трёхмерной геометрии / 4-ое международное совещание по нейтронным источникам в Звенигороде. Июнь 2011.

4. B.V. Kuteev, A.V. Spitsyn, A.V. Golubeva, V.I. Khripunov, M.I. Gurevich, **В.К. Chukbar**, A.V. Zhirkin, A.B. Sivak, V.M. Chernov, D.A. Blokhin, M.V. Leontieva-Smirnova, M.M. Potapenko Materials for Fusion Neutron Source / 15th International Conferences on Fusion Reactor Materials (ICFRM-15). Charlesstone. October 2011.

5. **Б.К. Чукбар**, М.И. Гуревич Выбор конфигурации жидко-солевого ториевого blankets термоядерного источника нейтронов / SCVRT2011 Труды Международных научных конференций “Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i”. Москва-Протвино. 2011.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературных источников из 55 наименований, изложена на 109 страницах и содержит 27 рисунков, 14 таблиц.

## **Краткое содержание работы**

Во введении обоснована актуальность проделанной работы, сформулированы её цели, указаны научная новизна работы, её практическая значимость и достоверность полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведено краткое описание микротоплива, представляющего графитовую матрицу, которая включает в себя тысячи топливных частиц, далее называемых зёрнами. Зерно состоит из внутреннего шарика – керна из делящегося материала и многослойного сферического покрытия. Характерный размер зерна 1 мм, керна 0.5 мм. Расположение зёрен в матрице случайно, но равномерно по объёму. Типичной компоновкой являются шаровые твэлы диаметром 6 см, имеющие графитовое покрытие и внутренний шар из микротоплива порядка 5 см диаметра.

Описаны основные методы моделирования установок, использующих микротопливо – расположение зёрен в виде регулярных и возмущённых регулярных решёток, а также алгоритм CORN программного пакета MCU. Этот алгоритм основан на пренебрежении размерами зерна при движении нейтрона по матрице, возможность входа в зерно моделируется эффективной добавкой к макроскопическому сечению  $\pi r^2 N$ , где  $r$  радиус керна, а  $N$  - объёмная плотность зёрен в матрице. Блуждание внутри керна моделируется точно, покрытие гомогенизируется с матрицей.



Несмотря на широкую распространённость моделирования микротоплива с помощью регулярных решёток и верифицированность алгоритма CORN пакета MCU для ряда российских вариантов установок, возможное влияние случайного распределения зёрен внутри твэлов и степень влияния метода генерации загрузки активной зоны шаровыми элементами исследовано недостаточно.

Для рассмотрения первой проблемы (степени влияния случайности положения зёрен микротоплива) приведены результаты расчётов с использованием полячейки, созданной по параметрам шаровых твэлов российского критического стенда АСТРА. В этих расчетах  $K_{эф}$  превышает единицу (из всей установки воспроизводится только твэл), но целью является исследование относительных отклонений результатов друг от друга. В большинстве моделей использовано разделение на 4x4x4 кубика-микроячейки, каждый из которых содержал одно зерно делящегося материала. Рассматривались модели как с обычными зёрнами, так и с гомогенизацией покрытия зёрен с графитовой матрицей.

Результаты проведённых расчётов приведены в таблице 1. Для удобства, жирным шрифтом выделены отклонения, заведомо лежащие за пределами погрешности расчётов.

**Таблица 1 - Результаты расчётов по полячке**

№	Кэф	ΔК	Примечание
1.1.1	1.733	0.09	Обычные зёрна по центрам ячеек
1.2.1	1.732	0.05	Зёрна с гомогенизацией покрытия по центрам ячеек
2.1.1	1.737	0.09	Обычные зёрна в кластерах, касание
2.2.1	1.736	0.1	Гомогенизация покрытия, расположение зёрен как в 2.1.1
<b>2.3.1</b>	<b>1.756</b>	<b>0.09</b>	<b>Зёрна с гомогенизацией покрытия в кластерах, касание</b>
3.1.1	1.734	0.1	Обычные зёрна случайно смещённые в ячейках
3.1.2	1.734	0.1	
3.1.3	1.735	0.09	
3.1.4	1.736	0.09	
3.1.5	1.735	0.09	
3.2.1	1.737	0.09	Зёрна с гомогенизацией покрытия случайно смещённые
3.2.2	1.734	0.1	
3.2.3	1.736	0.1	
3.2.4	1.735	0.11	
3.2.5	1.736	0.09	
4.1.1	1.733	0.09	Обычные зёрна случайно в кубе (вписанная)
4.1.2	1.735	0.08	
4.1.3	1.733	0.08	
4.1.4	1.732	0.1	
4.1.5	1.734	0.1	
4.2.1	1.733	0.09	Зёрна с гомогенизацией покрытия случайно в кубе (вписанная)
4.2.2	1.733	0.08	
4.2.3	1.734	0.1	
4.2.4	1.734	0.09	
4.2.5	1.733	0.09	
5.1.1	1.734	0.1	Обычные зёрна случайно в кубе (трансляция)
5.1.2	1.733	0.1	
5.1.3	1.733	0.1	
5.1.4	1.735	0.08	
5.1.5	1.734	0.1	
5.2.1	1.731	0.1	Зёрна с гомогенизацией покрытия случайно в кубе (трансляция)
5.2.2	1.733	0.09	
5.2.3	1.733	0.09	
5.2.4	1.735	0.1	
5.2.5	1.733	0.09	
<b>6.2.1</b>	<b>1.617</b>	<b>0.1</b>	<b>Полная гомогенизация</b>
7.2.1	1.735	0.1	Статистическая модель CORN

В первой колонке указан номер варианта, состоящий из индексов “А.В.С”, соответствующим моделям расчёта. Индекс А соответствует общему типу рассматриваемой модели. Индекс В принимает следующие значения:

1. Сохранение покрытия микротоплива
2. Гомогенизация покрытия микротоплива
3. Гомогенизация покрытия; соприкосновение зёрен делящегося материала в кластерах из 8 ячеек.

Индекс С соответствует номеру рассматриваемого варианта в случае, если применялось несколько реализаций случайного распределения.

Во второй колонке полученное значение  $K_{эф}$ , в третьей стандартное отклонение, в четвёртой краткое описание варианта.

В полученных результатах имеются 2 значительных выброса от среднего значения.

Первый соответствует модели с кластерами из 8 зёрен с гомогенизированными покрытиями. На практике такой случай невозможен, так как касанию зёрен мешает их покрытие. Результат ожидаем: при такой близости зёрен большую роль начинает играть экранирование резонансного поглощения. 8 зёрен практически слеплены в один шар.

Второй соответствует полной гомогенизации. Оно также ожидаемо: полностью пропадает эффект экранирования резонансного поглощения.

За исключением этих двух легко объяснимых отклонений результаты совпадают, с учётом погрешностей вычисления.

Далее изучается верхняя граница применимости алгоритма CORN пакета MCU относительно концентрации зёрен делящегося материала в шаровом твэле. При анализе рассматривался один шаровой твэл, с граничным условием частичного отражения нейтрона. Альбедо выбиралось так, чтобы поток был достаточно неравномерно распределён, поэтому коэффициент размножения модели мал. Рассматривались концентрации зёрен как соответствующие PROTEUS ( $172.806 \text{ см}^{-3}$  или 9394 зёрен на шаровой твэл), так и во много раз превышающие его паспортные значения. Последние задавались с целью нахождения верхнего предела применимости метода CORN и приближения с гомогенизацией покрытий. Графы таблицы 2 несут следующую информацию:

- Вариант расчёта – определяет на сколь мелкую кубическую решётку дробилась графитовая матрица. Для разбиения считается, что шар вписан в куб, который делится на сетку. Также указывается какое число зёрен размещалось в твэле в данном варианте. В случае решётки  $52 \times 52 \times 52$  и числе зёрен ниже 66758 использовалось последовательное изъятие зёрен с использованием генератора случайных чисел до требуемого уровня.

- $Corn - K_{эф}$ , полученное для данного расчёта с использованием метода CORN и с гомогенизацией покрытия. В скобках указано стандартное отклонение для данного расчёта.
- Регулярная решётка -  $K_{эф}$ , полученное для данного расчёта с использованием кубической объемцентрированной решётки зёрен в твэле и без гомогенизации покрытия.
- Относительное отклонение – вычислялось по формуле  $\delta=C/R-1$ , где  $C$  – результат, полученный методом CORN и с гомогенизацией покрытия, а  $R$  – результат, полученный регулярной решёткой зёрен без гомогенизации покрытия.
- Отражение – вероятность отражения нейтрона при пересечении границы модели (твэла).

**Таблица 2 - Результаты анализа верхней границы применимости метода CORN**

Вариант расчёта	$K_{эф}$ , CORN	$K_{эф}$ , Регулярная решётка	Относительное отклонение	Отражение
35x35x35, 21247 зёрен	0.211810 (0.000169)	0.211392 (0.000168)	0.001977369	97%
40x40x40, 31408 зёрен	0.234133 (0.000171)	0.233838 (0.000172)	0.001261557	97%
45x45x45, 45025 зёрен	0.256761 (0.000173)	0.257325 (0.000171)	-0.002191781	97%
52x52x52, 55000 зёрен	0.270850 (0.000177)	0.272033 (0.000180)	-0.004348737	97%
52x52x52, 60000 зёрен	0.277959 (0.000176)	0.278661 (0.000176)	-0.00251919	97%
52x52x52, 66758 зёрен	0.286344 (0.000178)	0.287435 (0.000176)	0.035845678	97%
52x52x52, 21247 зёрен	0.731818 (0.000318)	0.731469 (0.000307)	0.000477122	99%
52x52x52, 66758 зёрен	0.711382 (0.000292)	0.714428 (0.000293)	-0.004263551	99%

Как можно видеть из результатов, CORN сохраняет высокую степень точности (до долей процента), пока речь не заходит об исключительно высоких концентрациях зёрен (от 50000 и выше на шаровой твэл, т.е. концентрации 920 зёрен/см<sup>3</sup>).

Далее приведен анализ приближений алгоритма CORN. Показано, что пренебрежение размером зерна при блуждании по матрице для резонансных нейтронов дает увеличение среднего расстояния от случайной точки матрицы до точки столкновения в керне, в случае CORN - на  $1/(N\pi r^2)$ , где  $r$  – радиус керна. При больших плотностях отклонение может быть существенным. Средний оптический путь от керна до керна алгоритма CORN совпадает с тем, который соответствует точному описанию структуры микротоплива. Этот путь может быть получен, исходя из того, что для случайного отрезка в микротопливе отношение математического ожидания длин пересечений с кернами к длине отрезка должно быть равным отношению объема кернов к общему объему, а средняя длина пересечения с керном есть  $(4/3)r$ . Совпадение оптических путей

достигается коррекцией плотности вещества матрицы, из-за чего при потоках близких к изотропным указанное расхождение, как показал численный эксперимент несущественно. Для отличных от используемых на данный момент сред предложена модификация алгоритма CORN.

Далее рассмотрена модель, учитывающая невозможность пересечения двух зёрен с учетом их покрытия. Вводится понятие сечения входа в ядро, зависящее от угла выхода нейтрона из предыдущего ядра  $\lambda$  и пройденного от точки выхода расстояния  $s$ . Это сечение имеет вид  $S(\lambda, s/r, c)N_k \pi r^2$ , где  $N_k$  – эффективная плотность зёрен,  $c$  – отношение размера зерна к размеру ядра, а  $S(\lambda, t, c)$  функция, не зависящая от плотности и размеров зёрен. Выведены (довольно громоздкие) формулы для  $S(\lambda, t, c)$ . Также даны алгоритмы для численного расчета эффективной плотности, основанные на равенстве истинного отношения средних расстояний между ядрами и соответствующей величины в модели. Средняя величина отношения этих расстояний в модели получается как предел функции  $w$ , являющейся решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dw}{dt} = tr^2 N_k S(\lambda, t) \text{Exp}(-r^2 N_k \tau(t)); \quad \frac{d\tau}{dt} = S(\lambda, t). \quad (1)$$

Дана оценка предела интегрирования для получения необходимой точности.

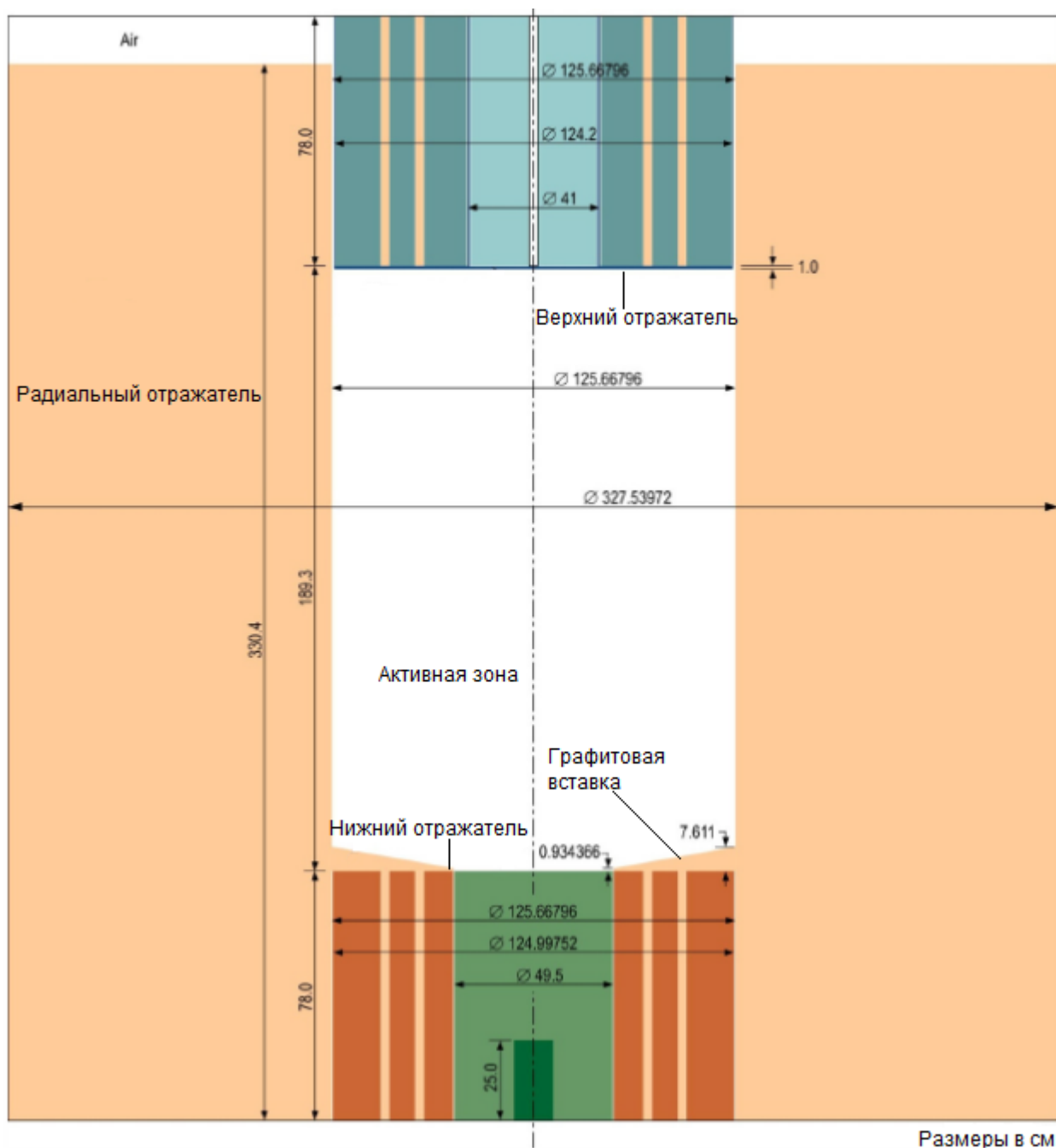
Приведены численные расчеты для размеров зёрен и ядер установки PROTEUS, и показано, что по чисто геометрическим характеристикам для существующих плотностей зёрен алгоритм CORN удовлетворителен, но для иных материалов матрицы и зёрен существенные расхождения могут возникнуть уже при плотности  $350 \text{ см}^{-3}$ , для которой численное моделирование дает прекрасное совпадение результатов, полученных с помощью CORN и решеток.

Во второй главе рассматривается вторая проблема, состоящая в возможном влиянии способа генерации загрузки активной зоны из 9840 шаровых элементов на нейтронно-физические характеристики. Излагается общая концепция ВТГР с шаровыми твэлами, включая плотность упаковки. Она рассчитывается следующим образом:

$$f_i = \frac{N_E \cdot V_E}{V_{AZ}}. \quad (2)$$

Для многих ВТГР плотность упаковки составляет  $\sim 0.6$ , несмотря на применение различных методов повышения этого параметра. В активной зоне остаётся достаточно свободного места, чтобы каждая реальная загрузка была уникальной по своей структуре. Особо осложняет дело то, что в реальных условиях засыпка твэлов имеет неравномерную плотность упаковки по высоте, из-за давления верхних слоёв засыпки на нижние. На данный момент проблема моделирования такой неравномерности является нерешённой

задачей. В качестве примеров установок, использующих шаровые твэлы с микротопливом, рассмотрены критические стенды АСТРА и PROTEUS. Особое внимание уделяется второму стенду, и именно его параметры используются в дальнейших расчётах второй главы.



**Рисунок 1.** Вертикальный разрез стенда PROTEUS [4]

Активная зона PROTEUS занимает центральную цилиндрическую секцию высотой 151 см и диаметром 125.5 см, ограниченную снизу графитовой заглушкой в форме усечённого конуса, с отверстием в центре для изъятия выгоревших шаровых твэлов. Полная загрузка данной зоны составляет 9840 шаровых элементов, из которых одну

половину составляют твэлы, а другую - замедлительные графитовые шары того же размера. Содержание зёрен в шаровых твэлах PROTEUS составляет 9394 на один элемент. При диаметре шарового элемента в 6 см, из которых 4.7 – диаметр графитовой матрицы с микротопливом, это даёт концентрацию микротоплива  $172.806 \text{ см}^{-3}$ .

Далее приводятся используемые на данный момент методы моделирования загрузок активной зоны. Можно выделить два основных метода. Первый - наложение регулярной решётки, с соответствующей плотностью упаковки, на активную зону установки, с последующим удалением частей шаров, лежащих вне активной зоны. Второй – наложение максимально плотной регулярной решётки из шаровых элементов (в данной работе используется гранецентрированная кубическая решётка) на активную зону, ликвидация пересекающих границы шаровых элементов и последовательное случайное изъятие шаров до необходимого количества элементов. И в первом, и во втором случае возникают неестественные «простреливаемых» направлений, по которым почти нет шаровых элементов. Это приводит к нереалистично большим длинам пробега нейтронов в определённых ситуациях, что практически невозможно в реальной загрузке активной зоны.

Приводятся результаты расчётов с использованием плотной гранецентрированной кубической решётки с последующим изъятием шаровых элементов. Рассматривалось влияние следующих факторов:

1. Небольших геометрических сдвигов регулярной решётки по трём основным направлениям
2. Варьирование количества слоёв, то есть высоты загрузки, при сохранении общего количества шаровых элементов
3. Введение неравномерной зависимости вероятности выборки изъятия шарового элемента при извлечении лишнего по высоте, а именно повышенная вероятность изъятия шаровых элементов в верхней части активной зоны и пониженная в нижней.

Результаты расчётов по первому фактору приведены в таблице 3. “Смещение” обозначает смещение в сантиметрах гранецентрированной кубической решётки шаров относительно начала координат по осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ . “Вариант” обозначает вариант рассматриваемого расчёта, подразумевая использование новой генерации данного типа загрузки активной зоны.  $K_{эф}$  обозначает эффективный коэффициент размножения нейтронов, полученный при расчёте данной модели. Отдельного внимания заслуживают варианты 14а, 14б и 14с, в которых была удалена коническая графитовая часть в нижней части активной зоны. Активная зона при генерации загрузки была соответствующим образом расширена до полноценного цилиндра.

**Таблица 3 - Результаты расчётов с геометрическими сдвигами**

Вариант расчёта	$k_{эф}$	стандартное отклонение
2/2/2 смещение, вариант 10a	1.017843	0.000331
2/2/2 смещение, вариант 10b	1.019217	0.000328
2/2/2 смещение, вариант 10c	1.018339	0.00033
2/2/2 смещение, вариант 10d	1.019080	0.000325
2/2/2 смещение, вариант 10e	1.019248	0.000335
0/0/2 смещение, вариант 11a	1.019768	0.000331
0/0/2 смещение, вариант 11b	1.019748	0.000331
0/0/2 смещение, вариант 11c	1.019588	0.000332
0/0/2 смещение, вариант 11d	1.019849	0.00032
0/0/2 смещение, вариант 11e	1.018356	0.000331
2/2/0 смещение, вариант 12a	1.022601	0.000342
2/2/0 смещение, вариант 12b	1.021921	0.000329
2/2/0 смещение, вариант 12c	1.022114	0.000329
2/2/0 смещение, вариант 12d	1.021938	0.000324
2/2/0 смещение, вариант 12e	1.021854	0.000326
2/2/0 смещение, вариант 14a	1.027466	0.000331
2/2/2 смещение, вариант 14b	1.021083	0.000330
0/0/2 смещение, вариант 14c	1.022165	0.000339

$K_{эф}$  значительно превышает 1. Это связано с несовершенством используемой модели, как следует из независимых расчётов на основе той же модели стенда с использованием MCNP5 (погрешность указана в виде стандартного отклонения):

$$K_{эф} = 1.01736 \pm 0.00007$$

Хотя значение, полученное экспериментально для данного типа загрузки стенда PROTEUS соответствует следующему:

$$K_{эф} = 1.0039 \pm 0.0036,$$

для цели нашего исследования наличие абсолютной систематической ошибки не несёт серьёзных последствий, поскольку исследуется относительное влияние факторов на конечный результат.

Далее приводятся расчёты по второму фактору. Стандартная загрузка состоит из 34 горизонтальных слоёв шаров:



**Таблица 4 - Результаты расчётов с варьированием числа слоёв**

Вариант расчёта	$K_{эф}$	стандартное отклонение
2/2/2 смещение, вариант 15a (35 слоёв)	1.011375	0.000327
2/2/2 смещение, вариант 15b (33 слоя)	1.026020	0.000326
2/2/2 смещение, вариант 15c (32 слоя)	1.035575	0.000332
2/2/2 смещение, вариант 15d (34 слоя, стандартная загрузка)	1.017158	0.000334

Для исследования третьего фактора, был введён “вес”, определяющий вероятность выбора слоя для дальнейшего случайного изъятия одного шара из него. Снизу-вверх, для первых 15 слоёв был введён вес = 10, для следующих 10 вес = 12, для оставшихся 9 слоёв вес = 15. Результаты приведены в таблице:

**Таблица 5 - Результаты расчётов с неравномерной по высоте упаковкой**

Вариант расчёта	$K_{эф}$	стандартное отклонение
2/2/2 смещение, вариант 16a	1.017857	0.000324
2/2/2 смещение, вариант 16b	1.018894	0.000327
2/2/2 смещение, вариант 16c	1.020250	0.000331
2/2/2 смещение, вариант 16d	1.018894	0.000327
2/2/2 смещение, вариант 16e	1.020692	0.000319

Из результатов расчётов были сделаны следующие выводы:

- Использованная модель установки PROTEUS содержит неточности, приводящие к систематической ошибке, завышающей результат на ~2%. Данный вывод подтверждается независимыми расчётами по этой модели с использованием программного кода MCNP5.

- Сдвиги регулярной гранецентрированной кубической решётки имеют заметное влияние на результат вычислений. Различия в результатах доходят до ~0.5%, что необходимо учитывать при расчётах подобных систем. Варианты 14a, 14b, 14c продемонстрировали серьёзное изменение  $K_{эф}$ . На основе этого было выдвинуто предположение, что главную роль сыграла смещённость самой активной части зоны вниз относительно центра всей активной зоны.

- Варьирование высоты загрузки активной зоны при сохранении общего количества шаров продемонстрировало ожидаемый эффект снижения  $K_{эф}$  при увеличении количества слоёв и повышения в обратном случае.

- Результаты по неравномерному изъятию шаров из слоёв, с увеличением вероятности снизу-вверх, позволили в первом приближении оценить возможные эффекты неравномерного уплотнения загрузки активной зоны в реальных условиях. Средние отклонения составили до  $\sim 0.1\%$ .

В третьей главе описаны изменения геометрического и транспортного модуля программы MCU, сделанные для упрощения моделирования высокотемпературных реакторов.

Геометрия ВТГР имеет несколько уровней иерархии, к которым добавляется еще один уровень при моделировании микротоплива с помощью решётки. Описание ЯЭУ с шаровыми твэлами требует, по крайней мере, трех уровней геометрии: вся установка; решётка шаровых твэлов; решётки топливных микрочастиц. В реакторе НТ-MGR геометрия имеет 4 уровня иерархии: весь реактор; решётка тепловыделяющих сборок; решётки шестиугольных ячеек, соответствующих топливным компактам или трубам для теплоносителя; решётки топливных микрочастиц.

В программе MCU существует 2 способа представления повторяющихся структур. Конструкция «сеть» (NET) - в процессе моделирования траекторий нейтронов, сохраняет иерархическую структуру. Раньше «сеть» не могла быть вложена в «сеть». Для конструкции «решётка» (LATT) - все внутренние объекты прототипа элемента повторяются столько раз в глобальных координатах рассчитываемой системы, сколько используется этот прототип. Это требует значительного расхода памяти и может существенно снизить быстродействие. Поэтому в программу была добавлена возможность вкладывать сети в сети.

Расчет движения в ячейке сети ведется в ее локальных координатах. Ввиду наличия ячеек, перерезанных границей текущей зоны, требуется контролировать пересечения границ зон предыдущих уровней иерархии и делать геометрические вычисления в соответствующих системах координат. Частица характеризуется последовательностью координат, номеров, содержащих ее зон, индексов ячеек в сетях. Эта последовательность имеет разную длину в зависимости от положения частицы. Постоянный пересчет всех этих локальных координат достаточно трудоемкий процесс.

Одной из основных программных компонент пакета MCU является так называемый «банкир». Этот подмодуль транспортного модуля поддерживает ведение очередей с различными приоритетами частиц, ожидающих моделирования. Неопределенность длины характеристики частицы вызвали модификацию подмодуля «банкир», позволившую иметь очереди с элементами произвольной длины. Реализация основана на блочном принципе.

Каждый элемент представляет список из блоков одинаковой длины. Головные блоки также образуют список – очередь со ссылками вперед и назад. Выделение и освобождение памяти осуществляется с помощью списка свободного места.

Дискретизация пространства в методе Монте-Карло состоит в его разбиении на конечное число непересекающихся (с точностью до множеств меры нуль) геометрических зон, снабженных целочисленными атрибутами – номерами материалов, областей интегрирования и т.п.

Необходима возможность удобного назначения атрибутов в иерархических системах, причем это назначение может зависеть от индексов в сетях. Например, две одинаковых полости трубок теплоносителя в одной ТВС реактора НТ-MGR могут иметь разные атрибуты. Эта возможность принципиальна, так как значения физических величин (например, потоков) могут различаться в одинаковых деталях. Проблема решается с помощью указателей атрибутов, ссылающихся на картограммы. Каждая картограмма принадлежит некой сети и является целочисленным массивом, любой явно допустимой совокупности индексов соответствует элемент массива, служащий значением атрибута.

Соотношения между сетями и прототипами ячеек можно представить в виде двудольного ориентированного графа без циклов: вершины – это сети и прототипы ячеек. Дуга – это или использование «сетью» прототипа или включение «сети» в прототип. В графе есть выделенная вершина, соответствующая основной геометрии. Это есть единственная вершина, в которую не входит никакая дуга, так что граф связный.

В созданной реализации требуется, чтобы длина любого пути от основной геометрии до данного объекта была бы одинакова. Подобное ограничение вместе с двудольностью графа позволяет ввести уровни объектов по следующему правилу. Основная геометрия имеет уровень 0. Сети, которые она содержит, имеют уровень 0. Сети уровня 0 состоят из ячеек, прототипы которых имеют уровень 1. Сети уровня  $m$  состоят из ячеек, прототипы которых имеют уровень  $m+1$ ; прототип ячейки уровня  $m$  может содержать сети уровня  $m$ . Это ограничение практически не мешает пользователю, но сильно упрощает программу.

Указатели атрибутов могут ссылаться не только на картограмму сети, непосредственно содержащей ячейку, но и на картограммы сетей вышестоящего уровня. Для этого в указателе предусмотрено абсолютное или относительное определение используемого уровня сети. Элементом картограммы может быть указатель на картограмму высшего уровня, он закодирован в виде отрицательного числа. В этом случае происходит вторая подстановка и т.д.

В главе подробно дан синтаксис указателей атрибутов как в описаниях зон так и в картограммах.

При использовании конструкции «решётка», вложенной в прототип ячейки сети, допускается автоматическая генерация указателей атрибутов. Для этого введено понятие помеченных указателей. Сгенерированные указатели могут быть одинаковыми только при явном задании этого свойства пользователем. Без этого задания результат работы алгоритма генерации номеров удовлетворяет следующим правилам:

- 1) в одном элементе «решётки» зоны, имевшие в прототипе одинаковые помеченные указатели, имеют одинаковые указатели (или абсолютные номера);
- 2) все эти зоны имеют указатель отличный от зон любого другого элемента той же «решётки»;
- 3) все они имеют указатель, отличный от зон того же элемента, которые в прототипе имеют иной помеченный указатель;
- 4) все эти зоны имеют указатель, отличный от зоны носителя, заданной помимо данной «решётки».

Сложная система иерархии требует проверки ее корректности при вводе данных. Проверяется, что структура есть двудольный ациклический граф, допускающий разбиение на уровни. Затем проверяется, что наличных картограмм достаточно для определения значения любого указателя атрибута. В главе подробно описан алгоритм этой проверки.

Наконец, в главе изложено как созданная иерархия сетей подходит для реализации улучшенного алгоритма CORN. Для этого достаточно введения понятия специальной сети – микротоплива с единственной ячейкой-зерном. Такая «сеть» не имеет корневого вектора, зато снабжена значением объемной плотности зёрен. Зерно имеет сферический контейнер, внутри которого может быть любая структура как в обычной ячейке.

При попадании нейтрона в специальную «сеть» не происходит немедленного входа в ячейку, но к полному микросечению добавляется эффективная добавка. Событие входа в зерно отрабатывается как розыгрыш положения его центра и переход к нижестоящей системе координат, как в обычной сети. Далее алгоритм работает с обычной «сетью», но также сохраняются координаты центра зерна, в том числе в очередях, например, нейтронов деления.

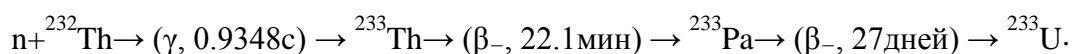
Только при выходе из сферического контейнера зерна происходят не стандартные действия – возврат на предыдущий уровень, но уже на место, скорректированное за счет блуждания внутри зерна.

Кроме учета размера зерна автоматически обеспечен контроль пересечений зоны с микротопливом, а также возможность внутренней структуры зерна.

В четвёртой главе описывается перспективность развития источников нейтронов высоких энергий для переработки ядерных отходов и наработки топлива для ЯЭУ. Наиболее продвинутыми по этому параметру являются термоядерные реакторы.

Несмотря на нерешённость проблемы стационарного термоядерного синтеза, существующие альтернативные источники нейтронов слишком ограничены в применимости и экономической эффективности. В связи с вышеописанной перспективностью, ставится вопрос необходимости изменений физического модуля пакета MCU для учёта пороговых реакций, свойственных нейтронам высоких энергий (>14 МэВ, энергии нейтронов D-T реакции синтеза).

В качестве одного из разрабатываемых вариантов установок данного класса, приводится российская установка ТИН (Термоядерный Источник Нейтронов), предложенная в НИЦ “Курчатовский Институт”. Главным планируемым направлением применения установки была наработка делящегося материала для ЯЭУ по следующей цепочке реакций, начиная с поглощения нейтрона:



Была поставлена задача моделирования нейтронных потоков различных предварительных вариантов установки. Целями моделирования было определение следующих параметров:

- Оценка сверху общей эффективности установки и потенциальной наработки  ${}^{233}\text{U}$ .
- Оценка компонент конструкции с позиции нейтронных потоков, оптимизация материалов для повышения эффективности работы установки. В том числе оценивалось защитное покрытие вакуумной камеры термоядерного источника.
- Оценка необходимости, эффективности и оптимизация экрана между термоядерным источником и бланкетом, содержащим расплав тетрафторида  ${}^{232}\text{Th}$ .

Для решения задачи моделирования ТИН средствами пакета MCU, было необходимо внести изменения в пакет MCU, позволяющие более точно включать в расчёты некоторые пороговые реакции, свойственные нейтронам высоких энергий. В исходном варианте пакета данные реакции учитывались приближённо или не учитывались вообще. Например, реакция  $(n, 3n)$  учитывалась вместе с реакцией  $(n, 2n)$ , приближённым образом, так как программа исходно предназначалась для расчётов поведения нейтронов в установках с энергиями нейтронов, характерными для ядерных

реакторов. В таком случае энергии нейтронов слишком малы, чтобы реакция ( $n, 3n$ ) могла вносить существенный вклад.

Рассматривались следующие варианты материалов для экрана:

- Природный Pb (свинец)
- Чистый изотоп  $^{204}\text{Pb}$
- Чистый изотоп  $^{206}\text{Pb}$
- Природный Li (литий)
- Чистый изотоп  $^7\text{Li}$
- Природный Be (бериллий)
- Расплав фторидов Li и Be (FLiBe) .

Рассматривались следующие варианты состава blankets:

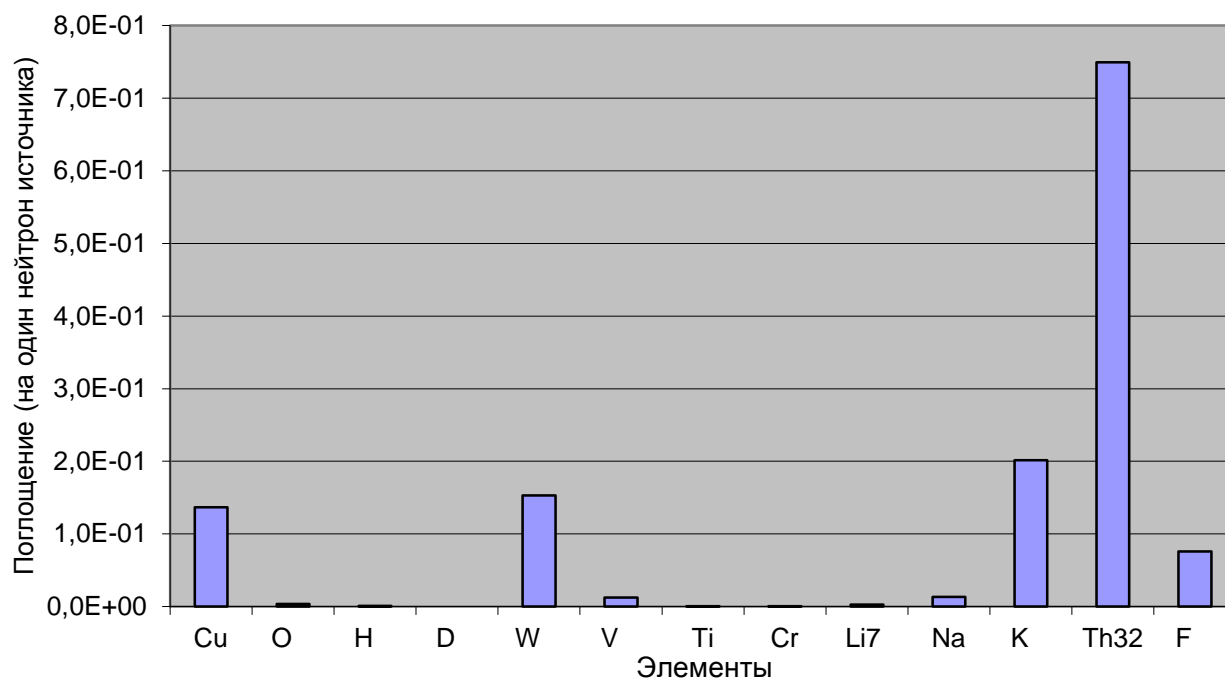
- FLiNaK с 15%-ой добавкой  $\text{ThF}_4$
- FLiNaK с 15%-ой добавкой  $\text{ThF}_4$  и 5% добавкой  $\text{BeF}_2$
- FLiBe с 15%-ой добавкой  $\text{ThF}_4$
- FLiBe с 15%-ой добавкой  $\text{ThF}_4$  и 5% добавкой  $\text{BeF}_2$
- FLiNaK с 30%-ой добавкой  $\text{ThF}_4$
- FLiBe с 30%-ой добавкой  $\text{ThF}_4$
- FLiNaK с 15%-ой добавкой  $^{238}\text{U F}_4$
- FLiNaK с 30%-ой добавкой  $^{238}\text{U F}_4$ .

Также в работе рассматривалось два варианта материалов для магнитных катушек термоядерного источника:

- природная Cu (медь)
- природный Be (бериллий).

Далее приведены результаты расчётов, нормированные на один нейтрон. На рисунке 2 приведены общие потери нейтронов, включая полезные реакции на  $^{232}\text{Th}$ .

## Поглощение по элементам

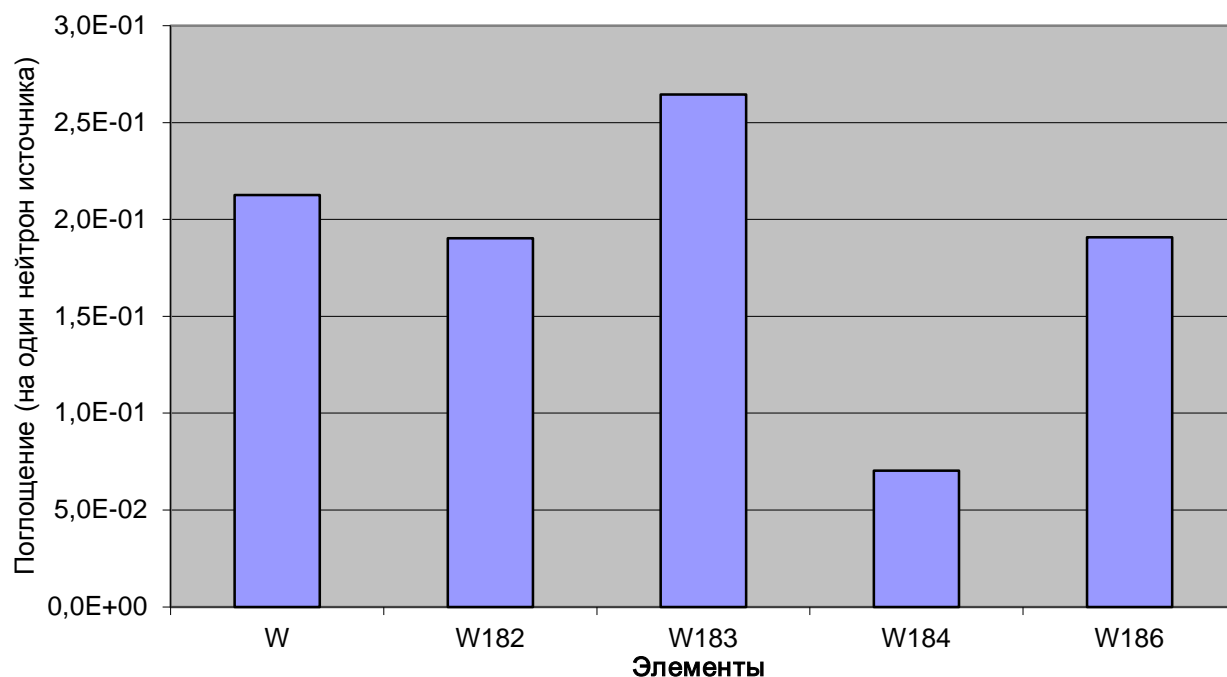


**Рисунок 2.** Поглощения, нормированные на один нейтрон источника

Видны значительные потери на меди (в основном входящей в состав магнитных катушек), вольфраме (защитное покрытие вакуумной камеры термоядерного источника), калии и фторе (присутствуют в значительных количествах в составе расплава в бланкете).

На следующем рисунке 3 приведены результаты использования различных изотопов вольфрама.

## Поглощение по элементам

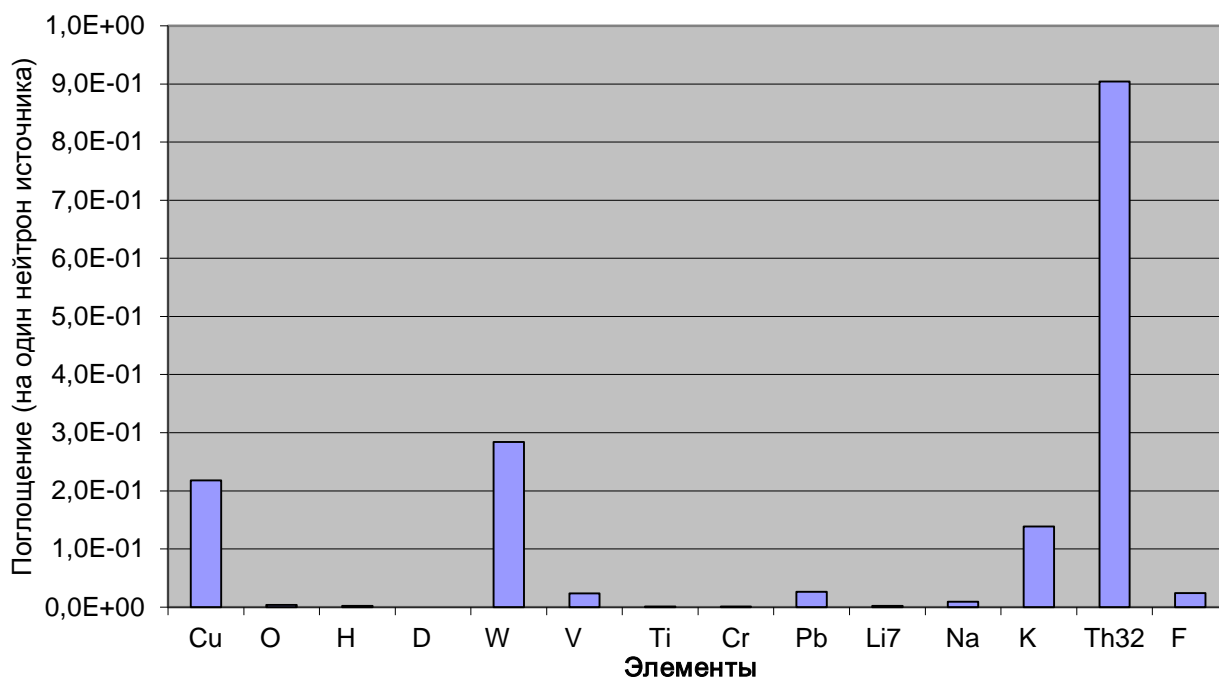


**Рисунок 3.** Различные варианты изотопного состава покрытия камеры

В связи с полученными результатами была сделана рекомендация к поиску технологических решений по производству изотопного вольфрама 184, что может дать прирост эффективности работы установки до нескольких процентов.

Далее в главе рассматривается проблема выбора экрана между термоядерным источником и бланкетом. Первые расчёты показали положительный эффект использования экрана, как представлено на рисунке 4 в случае свинцового экрана.

#### Поглощение по элементам



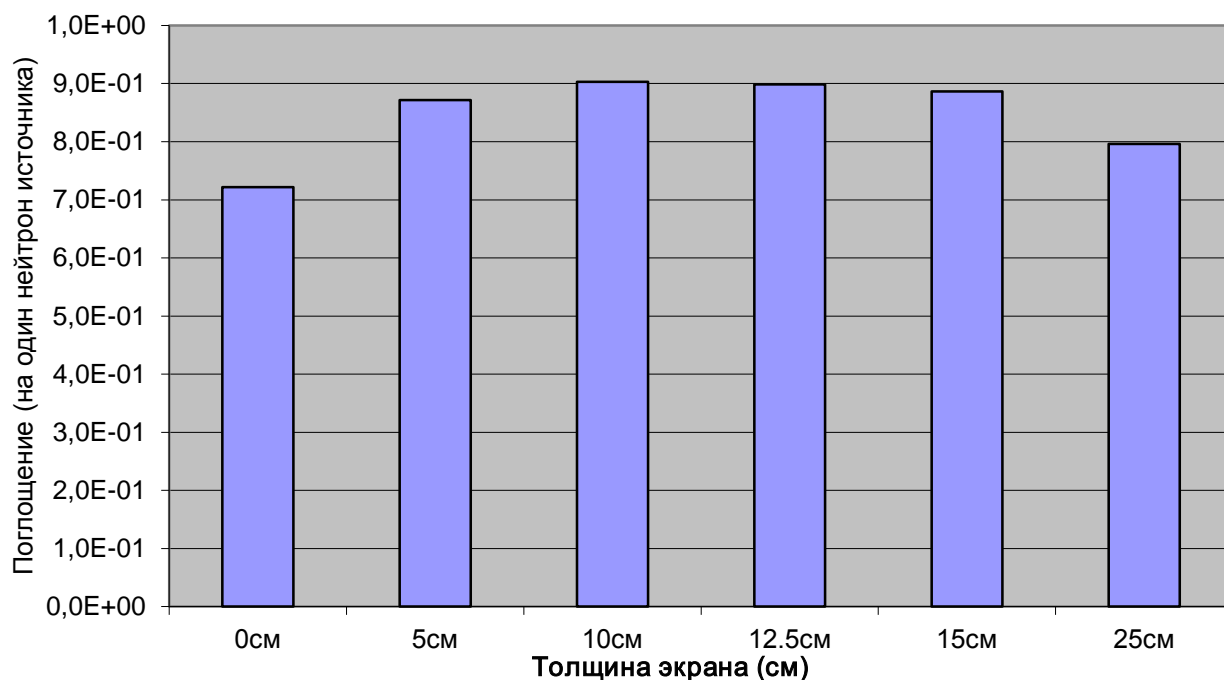
**Рисунок 4.** Поглощения в случае использования свинцового экрана

Несмотря на прирост эффективности поглощения на  $^{232}\text{Th}$  в  $\sim 10\%$ , также вырастают потери на медных катушках и вольфрамовом экране, за счёт отражения части нейтронов назад в секцию установки, где находится термоядерный источник. Снижение энергии нейтронов при взаимодействии со свинцом позволяет избежать таких пороговых реакций, как, например,  $(n,2n)$  на тории. Несмотря на то, что эта реакция производит два нейтрона, она приводит к запуску цепи трансмутации, приводящей к генерации  $^{232}\text{U}$ .

На рисунке 5 приводятся результаты расчётов с углублённой оценкой эффективности экранов. Рассматривался свинец, как дающий самый значительный вклад. Помимо смягчения спектра нейтронов большую роль играет реакция  $(n,2n)$  на свинце, дающая дополнительные нейтроны. Представлен вариант экрана не облегающего верхнюю и нижнюю часть вакуумной камеры, а расположенного лишь по боковой стороне. Конструктивно это выглядит предпочтительнее, так как в реальной установке сверху и снизу от вакуумной камеры будут располагаться такие элементы, как диверторы, занимающие основную часть пространства.



### Поглощение на Th (облегающий экран)



**Рисунок 5.** Поглощения на Th в зависимости от толщины экрана

Из гистограммы можно заключить нецелесообразность рассмотрения экранов из свинца толще 5-10 см. Следующая серия расчетов проводилась с другой геометрией blankets, обеспечивающей существенно меньшую утечку нейтронов. В таблице 6 показаны результаты относительного поглощения нейтронов  $^{232}\text{Th}$ , полученные в ходе расчетов с вариантом экрана из бериллия, который также рассматривался как перспективный вариант.

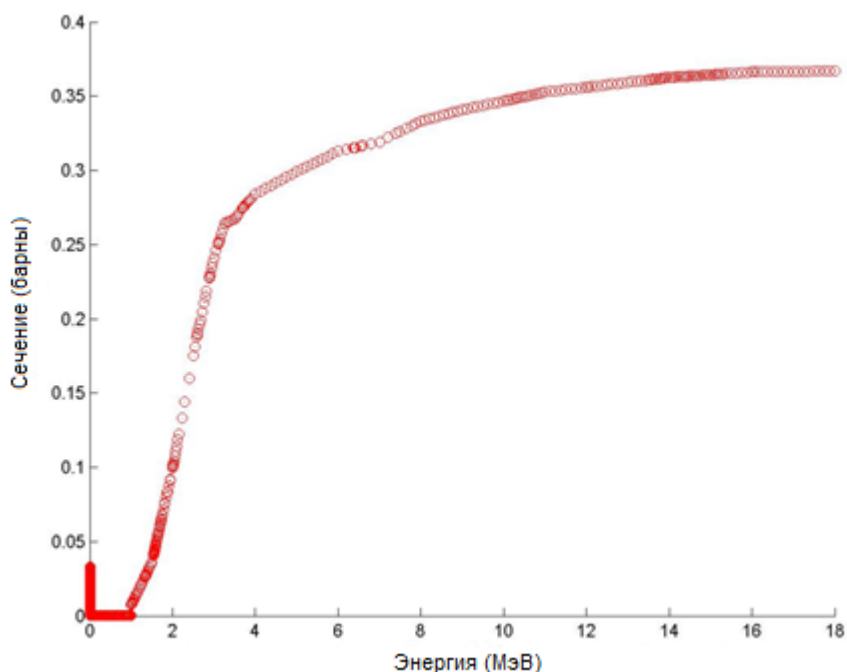
**Таблица 6 -** Бланкет  $\text{FLiBe}+30\% \text{ThF}_4$ , относительные поглощения нейтронов

Экран	Be - 1 см	Нет
Стенка	0.2 см	0.2 см
$^{232}\text{Th}$ (n,2n)	0.0467	0.106
$^{232}\text{Th}$ (n,3n)	0.0111	0.042
$^{232}\text{Th}$ (распад)	0.0168	3.73
$^{232}\text{Th}$ (захват)	0.994	0.987
Экран (n,2n)	0.626	
Никель (погл.)	0.101	0.0773
Никель (n,2n)	$6.53 \cdot 10^{-4}$	$2.51 \cdot 10^{-3}$
Бериллий (погл.)	0.212	0.0942
Бериллий (n,2n)	0.924	0.315

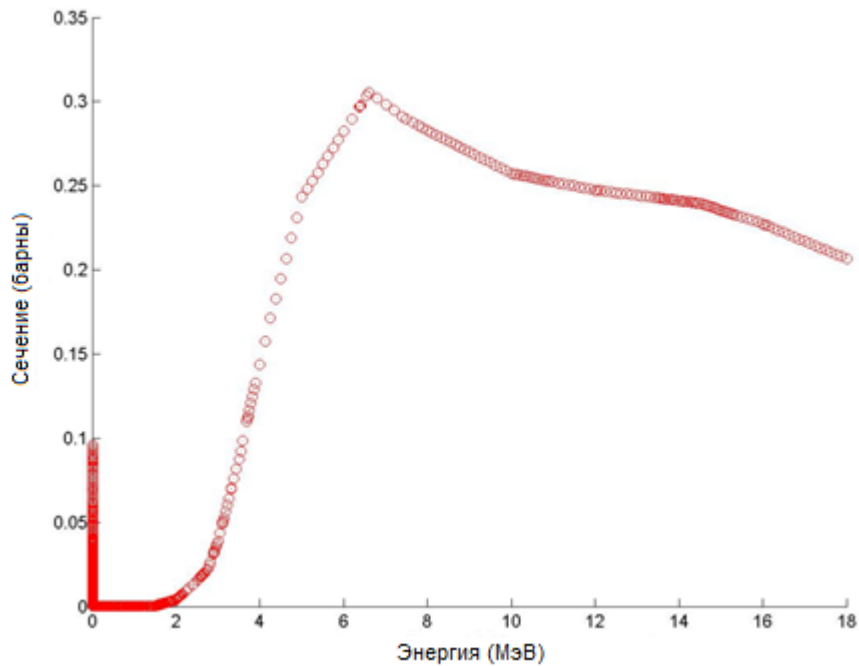
Самым многообещающим оказался вариант с бланкетом из FLiNaK без примесей и с экраном из Pb толщиной 0.5 см. Интегральный захват на  $^{232}\text{Th}$  составил 0.954 на один нейтрон источника, что выглядит очень перспективно даже для оценки сверху.

Несмотря на хорошие результаты использования экранов из свинца и бериллия, было рекомендовано рассматривать вариант бланкета без экрана как такового. Причиной тому послужил рост потерь, связанных как с угловой утечкой при доработке качественной модели, так и рост нежелательного поглощения на вольфрамовом покрытии нейтронов, отражённых экраном. Также стоит учитывать, что в случае «оголения» бланкета вырастут не только вредные реакции на быстрых нейтронах, но и размножение  $(n,2n)$  и  $(n,3n)$  реакциями на  $^{232}\text{Th}$ . Как показали расчёты, последнее способно компенсировать отсутствие размножения на экране, хотя и усложнит задачу очистки прокачиваемого расплава от нежелательных элементов, образовавшихся в ходе реакций.

В конце главы приводятся исследования пороговых реакций для нейтронов высоких энергий. Для изучения данной проблемы была написана специальная программа, представляющая сечения реакций из библиотеки ENDF/B7, использовавшейся в расчётах, в графическом формате. В качестве примеров полученных графиков можно привести рисунки 6 и 7.



**Рисунок 6.** Сечение  $(n,p)$  реакции на природном калии (K).



**Рисунок 7.** Сечение  $(n, \alpha)$  реакции на природном калии (K).

Как легко видеть из этих рисунков, данные реакции имеют довольно значительные сечения даже для сравнительно низких энергий нейтронов, порядка 4 МэВ. Влияние этих реакций на скорость загрязнения в ЯЭУ сравнительно мало, с чем и была связана приближённая их учёта в MCU на данный момент. В случае термоядерных энергий нейтронов данные реакции имеют куда более значительное влияние, особенно в связи с перспективами использования расплавов солей металлов и важности редокс-потенциала, проистекающей из этого. Изменения, внесённые в пакет MCU, позволившие более точно учитывать реакции  $n \rightarrow 3n$ ,  $n \rightarrow \alpha$ ,  $n \rightarrow p$ ,  $n \rightarrow n + \alpha$ ,  $n \rightarrow n + p$ ,  $n \rightarrow T$  дали видимый результат в дальнейших расчётах.

В заключении формулируются основные результаты работы.

## Основные результаты работы

Целью диссертационной работы была оценка применимости программного пакета MCU для случаев высоких энергий нейтронов ( $>14$  МэВ) и случаев высокого содержания зёрен делящегося материала в шаровых твэлах (более  $170 \text{ см}^{-3}$ ). Также была поставлена задача внедрения необходимых изменений, по результатам оценок применимости, и расширение функционала геометрического, транспортного и физического модулей. В ходе работы были поставлены и решены следующие задачи:

- Проведена верификация алгоритма CORN пакета MCU для случаев повышенного содержания зёрен делящегося материала в шаровых твэлах.

Показано, что для шаровых твэлов с графитовой матрицей и с топливом из оксида урана даже для плотностей микротоплива порядка  $850 \text{ см}^{-3}$ , что в пять раз превышает плотность в существующих установках, не наблюдается существенных разнотчений между результатами алгоритма CORN и результатами, полученными при моделировании регулярными решётками.

- Проведено исследование методов моделирования микротоплива с применением регулярных и возмущённых регулярных решёток. Исследован вопрос допустимости гомогенизации покрытия зёрен делящегося материала с графитовой матрицей. По результатам расчётов сделан вывод, что возмущённо регулярное положение зёрен в шаровых твэлах, которое ближе всего к реальности, не вызывает серьёзных отклонений как от регулярного расположения зёрен, так и при применении алгоритма CORN. Подтверждена состоятельность гомогенизации покрытий зёрен как допустимого приближения для концентраций зёрен до  $173 \text{ см}^{-3}$ .
- Проведен анализ геометрических приближений, используемых в алгоритме CORN. Предложена модификация этого алгоритма, учитывающая конечность размеров зёрен топливных частиц. Для плотности  $350 \text{ ед./см}^3$  возникают различия в основных геометрических характеристиках в модели CORN и в модели, учитывающей конечность размеров зёрен и парные взаимодействия между ними.
- Показано, что описание стенда PROTEUS содержит неточности, так как расчеты по программе MCU дают ту же завышенную оценку, что и проведенные ранее во Франции расчеты по программе MCNP-5. Обнаружено, что при моделировании случайной засыпки шаровых твэлов вместе с замедлительными графитовыми шаровыми элементами случайности в реализации могут приводить к колебаниям критичности порядка 0.5%. Наиболее существенным является получающиеся изменения высоты засыпки при сохранении числа шаров.
- Для моделирования высокотемпературных реакторов, геометрия которых представляет иерархию с числом уровней до 4, была проведена модификация геометрического модуля программы MCU, состоящая в обеспечении возможности создавать иерархию сетей. Реализованы очереди частиц, ожидающих моделирования, с элементами различной длины, задаваемой при постановке элементов в очередь. Проанализированы методы определения атрибутов зоны (номера материала, областей интегрирования и

т.д.) в системах с развитой иерархией и реализована возможность ссылок на картограммы атрибутов, находящихся на любом уровне иерархии. Обеспечена автоматическая генерация подобных ссылок.

- Модифицирован один из подмодулей физического модуля программы MSU, что позволяет регистрировать более широкий набор ядерных реакций, в том числе  $n \rightarrow 3n$ ,  $n \rightarrow \alpha$ ,  $n \rightarrow p$ ,  $n \rightarrow n+\alpha$ ,  $n \rightarrow n+p$ ,  $n \rightarrow T$ . С помощью этой модификации проведены расчеты blankets термоядерного источника нейтронов на основе тетрафторида  $^{232}\text{Th}$  в расплаве FLiNaK. Оптимизировался полезный радиационный захват в тории с ограничением как  $n \rightarrow n+n$  реакции на тории так и пороговых реакций на К и F. Предложен свинцовый экран, дающий дополнительные нейтроны и смягчающий энергию нейтронов подпороговых нежелательных реакций. Найдена оптимальная толщина этого экрана.

### **Основные положения диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

1. Б.В. Кутеев, А.В. Жиркин, **Б.К. Чукбар**, В.Ф. Батяев, Ю.Е. Титаренко, К.В. Павлов, А.Ю. Титаренко, С.Н. Юлдашев, В. Гудовски Нейтронно-физические исследования термоядерного источника нейтронов для получения максимального потока тепловых нейтронов / ВАНТ “Термоядерный синтез”. 2013. В.1. С. 64-78.
2. **Б.К. Чукбар** Верификация статистического метода CORN моделирования микротоплива для случаев повышенного содержания зёрен / ВАНТ «Физика Ядерных Реакторов». 2014. В. 1-2. С. 15-21.
3. Б.В. Кутеев, А.В. Жиркин, М.И. Гуревич, **Б.К. Чукбар**, Ю.Е. Титаренко, В.Ф. Батяев, В. Гудовски Расчётный анализ нейтронно-физических характеристик термоядерного источника в трёхмерной геометрии / 4-ое международное совещание по нейтронным источникам в Звенигороде. Июнь 2011.
4. B.V. Kuteev, A.V. Spitsyn, A.V. Golubeva, V.I. Khripunov, M.I. Gurevich, **B.K. Chukbar**, A.V. Zhirkin, A.B. Sivak, V.M. Chernov, D.A. Blokhin, M.V. Leontieva-Smirnova, M.M. Potapenko Materials for Fusion Neutron Source / 15th International Conferences on Fusion Reactor Materials (ICFRM-15). Charlesstone. October 2011.
5. **Б.К. Чукбар**, М.И. Гуревич Выбор конфигурации жидко-солевого ториевого blankets термоядерного источника нейтронов / SCVRT2011 Труды Международных научных конференций “Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i”. Москва-Протвино. 2011.