## Российская академия наук

## Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

УДК 537.5; 539.17

№ госрегистрации 01201369842 Инв. № 2013-ГЭП-1



## ОТЧЕТ

# О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ (ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ)

«Изучение стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов на уникальных установках ФИАН»

Государственный контракт №14.518.11.7075 от 18 июня 2013 г. в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы», мероприятие 1.8.

Шифр «2013-1.8-14-518-0001-006»

Этап 1. Выбор направления исследований и проведение экспериментов

Обобщение и оценка результатов исследований

Руководитель работ по контракту, руководитель Отделения ядерной физики и астрофизики О.Д.Далькаров

Москва – 2013

## Список исполнителей

## Руководитель работы:

руководитель ОЯФА ФИАН, д.ф.-м.н.

О.Д. Далькаров (введение, разделы 9, 10, 12, заключение)

## Исполнители:

в.н.с., к.ф.-м.н.

г.н.с., д.ф.-м.н.

в.н.с., к.ф.-м.н.

г.н.с., д.ф.-м.н.

г.н.с., д.ф.-м.н.

в.н.с., к.ф.-м.н.

в.н.с., к.ф.-м.н.

в.н.с., к.ф.-м.н.

г.н.с., д.ф.-м.н.

с.н.с., к.ф.-м.н.

с.н.с., к.ф.-м.н.



А.С. Русецкий (введение, разделы 1-4, 6, 9, 10, 12, заключение)

М.А. Негодаев (разделы 3, 4, 6, 7, 10)

.А.В. Багуля (разделы 4, 6, 7)



В.А. Рябов (введение, разделы 9, 10, 12, заключение)



A.B. Агафонов (разделы 10, 12)

А.В. Огинов (разделы 1,3-4, 6-7, 10, 13)

А.И. Львов (разделы 1-8, 11, 13)

Е.И. Малиновский (разделы 7-8,11)

В.И. Сергиенко (разделы 4,7-8,11)

В.И. Алексеев (разделы 2,4-8,11)

B.А. Басков (разделы 3-8,11)

с.н.с., к.ф-м.н.

н.с.

H.C.

H.C.

стажер-исслед.

стажер-исслед.

главный специалист синхротрона

вед. инженер-электр.

вед. инженер-электр.

Trac

ropolell

2 Е.В. Ржанов (раздел 5)

инженер

А.Е. Колбасин (разделы 4, 6,7)

А.С. Кубанкин (разделы 4,8)

В.В. Полянский (разделы 3-

Л.Н. Павлюченко (разделы 3-

К.В. Шпаков (раздел 3-4,6-7)

И.Н. Тиликин (раздел 4, 6)

Г.Г. Субботин (разделы 4,6-

С.А. Ралко (разделы 4,6-8,11)

М.В. Егоров (раздел 3)

8,11)

8,11)

March 16 8,11)

инженер

A.А. Родионов (разделы 3-4, 6)

Нормоконтроллер ученый секретарь ОЯФА ФИАН, к.ф.-м.н.

Moul Н.П. Топчиев

## Реферат

Отчет содержит 173 с., 58 рис., 3 табл., 54 источника, 3 приложения.

Ключевые слова: ядерные реакции, ионные пучки, взаимодействие излучения с веществом, ускоритель ионов, высоковольтный разряд, детекторы излучений, распознавание треков частиц.

Цель работы – проведение исследований в области физики элементарных частиц и горячей плазмы с использованием крупных уникальных установок и комплексов и получение значимых научных результатов.

Содержание работы – изучение ядерных процессов, вызываемых частицами низких энергий, присутствующих в высоковольтном разряде или создаваемых ускорителями ионов и электронов, и оценка возможности использования таких процессов для термоядерной энергетики, а также в астрофизических и иных применениях.

## В результате выполнения НИР получены следующие результаты:

1. Выполнен аналитический обзор современной научнотехнической, нормативной, методической литературы по теме механизмов стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов. Обоснован выбор развиваемого направления исследований на уникальных установках ФИАН. Обоснована необходимость использования УСУ в целях изучения ядерных процессов, вызываемых частицами низких энергий, присутствующих в высоковольтном разряде или создаваемых ускорителями ионов и электронов, и оценка возможности использования таких процессов для термоядерной энергетики, а также в астрофизических и иных применениях. Изложены методики стимулирования ядерных реакций и

излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов и обосновано их использование;

2. Проведены патентные исследования в целях обеспечения высокого уровня проводимых работ и создаваемой научной продукции, а также выявления результатов интеллектуальной деятельности, способных к правовой охране;

3. Разработаны эффективные методы измерения выхода продуктов ядерных реакций и излучений из твердотельных мишеней при воздействии на них пучками ионов, электронов и высоковольтного разряда;

4. Проведены подготовительные работы для проведения экспериментов по исследованию стимулирования ядерных реакций. В результате работ: изготовлены мишени на основе гетероструктур Pd, Ti и CVD-алмаза; проведена адаптация узлов установок ЭРГ, ГЕЛИС и C-25P к работе с исследуемыми мишенями; проведена калибровка детекторов с помощью источников и продуктов DD-реакции на установке ГЕЛИС; проведены тестовые измерения выходов ядерных реакций на установке C-25P;

5. Создан нейтронный детектор для время-пролетных измерений, включающий в себя блок нейтронных счетчиков, свинцовую защиту, стартовую систему на основе протонного счетчика, мишенную станцию, вакуумную систему и систему электроники для сбора и обработки информации;

6. Проведены исследования использованием уникальных С установок ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и С-25Р, расположенных на территории Российской Федерации. Показана возможность стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком ионов инертных газов. Измерены выходы ядерных реакций в образцах CVD-алмаза и углерода при облучении дейтерия. Показана ИХ пучком ионов возможность стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком релятивистских электронов. Измерены выходы продуктов ядерных

реакций в процессе высоковольтного разряда и исследована зависимость от формы и материала электродов. Показано, что проведенные исследования обеспечивают получение новых знаний и результатов в области новых перспективных материалов, нанотехнологий с использованием методов активного физического воздействия (высоковольтного разряда, а также пучков ионов и электронов).

7. Проведены мероприятия по модернизации уникальных установок ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и C-25P;

 Обеспечено проведение исследований для сторонних организаций с использованием уникальных установок ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и С-25Р;

9. Проанализированы полученные результаты. Показано, что результаты, полученные в ходе выполнения проекта, будут важны для решения как фундаментальных, так и прикладных проблем в различных областях науки. В области термоядерной энергетики результаты актуальны: при создании систем накопления и хранения изотопов водорода (дейтерия, трития); при поиске путей снижения температур, необходимых для осуществления термоядерных реакций; в исследованиях радиационной стойкости материалов, которые применяются в термоядерных установках. В области астрофизики результаты НИР связаны с измерением и уточнением вкладов в сечения термоядерных процессов, ответственных за энергетику звезд. В области ядерной физики результаты НИР связаны с измерением дополнительных вкладов в сечения ядерных реакций при низких энергиях. На основании полученных результатов подготовлены 3 статьи, которые приняты в печать и будут опубликованы в журнале «Краткие сообщения по физике ФИАН» в 2013 г.

10. Проведена оценка возможности применения полученных результатов. Показано, что результаты НИР могут иметь целый ряд практически важных применений, касающихся создания источников энергии на новых принципах (ядерный синтез при низких энергиях, безнейтронный

синтез), синтезе новых материалов (локальное комбинированное воздействие жесткими излучениями и током высоковольтного разряда), выработки норм радиационной безопасности в высотной атмосфере и стратосфере (процессы генерации нейтронного И гаммаизлучения В атмосфере), помехоустойчивости низкоорбитальной и стратосферной техники (радио-, рентгеновское и гамма-излучение так называемых гигантских и высотных атмосферных разрядов в стратосфере и ионосфере). Сделаны рекомендации и предложения по использованию результатов НИР. Результаты проведенных исследований будут способствовать развитию приоритетных направлений Российской технологий техники Федерации, науки, И таких как. энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика. Результаты проведенных исследований можно использовать в критических технологиях Российской Федерации, таких как, водородная энергетика, технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы;

11. Проведена технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов. Показано, что полученные в ходе выполнения НИР результаты имеют не только фундаментальный характер, но и способствуют развитию новых подходов К организации и проведению научных исследований различных областях современной Развитие В науки. направления исследования низкоэнергетических ядерных реакций требует государственных инвестиций, имеет экономическую привлекательность для частных инвесторов. Новые подходы к стимулированию ядерных реакций высоковольтными разрядами и пучками частиц от различных источников могут быть востребованы на международном рынке новых наукоёмких технологий.

12. Разработан и реализован комплекс мероприятий, направленных на увеличение количества пользователей УСУ. Мероприятия, направленные на увеличение количества пользователей УСУ, разработаны и реализованы в тесном соответствии с утвержденными планами научно-исследовательской работы ФИАН, с планами модернизации УСУ, со сложившимися научно-

техническими связями с другими организациями, с учетом возможного проведения на УСУ новых перспективных работ;

13. Проведено обобщение и сделаны выводы по результатам НИР;

14. Разработана отчетная документация в соответствии с требованиями технического задания, календарного плана и нормативными актами Заказчика.

#### Область применения:

Результаты НИР могут быть использованы для решения как фундаментальных, так и прикладных проблем в областях:

(1) Термоядерная энергетика: (а) создание систем накопления и хранения изотопов водорода (дейтерия, трития); (б) поиск путей снижения температур, необходимых для осуществления термоядерных реакций; (в) исследование радиационной стойкости материалов, могущих найти применение в термоядерных установках;

(2) Астрофизика: измерение сечений термоядерных процессов, ответственных за энергетику звезд;

(3) Ядерная физика: измерение сечений ядерных реакций при низких энергиях.

## Экономическая значимость работы

Реализация данного проекта позволяет осуществлять поиск материалов с высоким потенциалом экранирования для использования их в качестве мишеней в будущих установках ядерного синтеза.

Результаты НИР могут иметь практическую значимость в областях, касающихся создания источников энергии на новых принципах (ядерный синтез при низких энергиях, безнейтронный синтез), синтезе новых материалов (локальное комбинированное воздействие жесткими разряда), выработки излучениями током высоковольтного норм И

радиационной безопасности в высотной атмосфере и стратосфере (процессы генерации нейтронного и гамма- излучения в атмосфере), помехоустойчивости низкоорбитальной и стратосферной техники (радио-, рентгеновское и гамма-излучение так называемых гигантских и высотных атмосферных разрядов в стратосфере и ионосфере).

# Содержание

стр.
Определения
Обозначения и сокращения14
Введение15
Основная часть
1. Аналитический обзор и анализ современной научно-технической,
нормативной, методической литературы. Обоснование выбора
развиваемого направления исследований; обоснование
необходимости использования УСУ для достижения целей работы;
изложение методик проведения исследований и обоснование их
использования
2. Проведение патентных исследований
3. Разработка методов измерений выхода продуктов ядерных реакций
и излучений из твердотельных мишеней при воздействии на них
пучками ионов, электронов и высоковольтного разряда
3.1. Разработка методов измерений выхода продуктов ядерных
реакций и излучений из твердотельных мишеней при воздействии
на них пучками ионов на установке ГЕЛИС
3.2. Разработка методов измерений выхода продуктов ядерных
реакций и излучений из твердотельных мишеней при воздействии
высоковольтного разряда на установке ЭРГ31
3.3. Разработка методов измерений выхода продуктов ядерных
реакций из твердотельных мишеней при воздействии на них
пучками электронов на установке С- 25Р
4. Проведение подготовительных работ для проведения
экспериментов по исследованию стимулирования ядерных реакций39
4.1. Изготовление мишеней на основе гетероструктур Pd, Ti и
СVD-алмаза
4.1.1. Изготовление мишеней на основе гетероструктур Pd
4.1.2. Изготовление мишеней на основе гетероструктур Ті41

4.1.3. Изготовление мишеней на основе CVD-алмаза и карбала42
4.2. Работы по адаптации узлов установок ЭРГ, ГЕЛИС и
С-25Р к работе с исследуемыми мишенями
4.2.1. Работы по адаптации узлов установки ГЕЛИС к работе
с исследуемыми мишенями
4.2.2. Работы по адаптации узлов установки ЭРГ к работе с
трековыми детекторами и мишенями46
4.2.3. Работы по адаптации узлов установки С-25Р к работе с
исследуемыми мишенями
4.3. Калибровка детекторов с помощью источников и продуктов DD-
реакции на установке ГЕЛИС54
4.3.1. Калибровка детекторов Не-3 установки ГЕЛИС54
4.3.2. Калибровка трековых детекторов54
4.3.3. Калибровка сцинтилляционных детекторов источником <sup>252</sup> Cf57
4.3.4. Калибровка сцинтилляционных детекторов нейтронами DD-
реакции на установке ГЕЛИС60
4.4. Проведение тестовых измерений выходов ядерных реакций на
установке С-25Р
5. Создание нейтронного детектора для время-пролетных измерений65
6. Проведение исследований с использованием УСУ75
6.1. Исследование стимулирования ядерных реакций в
дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком ионов инертных газов
6.1.1. Измерение выходов DD-реакции из мишени Pd/PdO:D <sub>x</sub> при
облучении пучком Ne <sup>+</sup> 75
6.1.2. Измерение выходов DD-реакции из мишени Ti/TiO <sub>2</sub> :D <sub>x</sub> при
облучении пучком Ne <sup>+</sup> 76
6.2. Исследование выходов ядерных реакций в образцах CVD-алмаза
и углерода при их облучении пучком ионов дейтерия
6.3. Исследование стимулирования ядерных реакций в
дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком релятивистских электронов84

6.4. Измерение выходов продуктов ядерных реакций в процессе
высоковольтного разряда и их зависимость от формы и материала
электродов
6.4.1. Измерение выходов продуктов ядерных реакций в
высоковольтном разряде на установке ЭРГ
6.4.2 Выход продуктов ядерных реакций в высоковольтном разряде
с дейтерированным заостренным катодом на установке ЭРГ99
7. Проведение мероприятий по модернизации УСУ103
7.1. Модернизация ГЕЛИС103
7.2. Модернизация ЭРГ104
7.3. Модернизация С-25Р105
8. Обеспечение проведения исследований для сторонних организаций с
использованием УСУ107
9. Анализ полученных результатов, подготовка публикаций110
10. Оценка возможности применения полученных результатов.
Рекомендации и предложения по использованию результатов НИР111
11. Технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных
результатов 118
12. Разработка и реализация комплекса мероприятий, направленных на
увеличение количества пользователей УСУ121
13. Обобщение и выводы по результатам НИР125
14. Разработка отчетной документации в соответствии с нормативными
актами заказчика126
Заключение
Список использованных источников
Приложение А. Сведения о закупках оборудования для модернизации
установки ГЕЛИС
Приложение Б. Сведения о закупках оборудования для модернизации
установки ЭРГ 156
Приложение В. Сведения о закупках оборудования для модернизации
установки С-25Р 161

## Определения

В настоящем отчете о НИР применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Апертура – геометрическая характеристика прибора, описывающая его способность регистрировать излучение;

**Гетероструктура** – выращенная на подложке слоистая структура из различных полупроводников;

Дейтрон – связанная стабильная система из протона и нейтрона;

Детектор ионизирующего излучения – устройство для обнаружения и измерения параметров элементарных частиц высокой энергии;

Карбал – композиционный материал, полностью состоящий из углерода, включающего алмазные частицы размером 3 – 5 мкм и графитоподобный углерод;

Микротрон – тип резонансного циклического ускорителя электронов;

**Термоядерный синтез** – реакция слияния легких атомных ядер в более тяжелые, сопровождающаяся выделением огромной энергии;

**Фотоядерные реакции** – ядерные реакции, происходящие при поглощении гамма-квантов ядрами атомов;

**Ядерные реакции** – процессы взаимодействия атомных ядер с другими ядрами или элементарными частицаями, сопровождающиеся изменением состава и структуры ядра с выделением большого количества энергии.

## Обозначения и сокращения

- DD-реакции реакции слияния ядер дейтерия;
- ГИН генератор импульсного напряжения;
- МэВ мегаэлектронвольт;
- ПК персональный компьютер;
- ППД полупроводниковый детектор;
- НИР научно-исследовательская работа;
- РИ рентгеновское излучение;
- СВЧ- излучение сверхвысокочастотное излучение;
- ФЭУ фотоэлектронный умножитель;
- УСУ уникальные стенды и установки;

#### Введение

## Современное состояние решаемой научно-технической проблемы

После кратковременного бурного интереса к проблеме взаимодействия легких ядер при низких энергиях в 1989 - 1991 годах, этот интерес ослаб. Но в последние годы (1998 – 2012) он возродился в более спокойной обстановке, при осознании необходимости более глубокого изучения явлений имеющих большое значение как в фундаментальной науке (астрофизика, ядерная физика), так и в ее прикладных применениях (термоядерная энергетика, водородная энергетика, топливные элементы)

Во многих странах мира (США, Япония, Италия, Китай, Индия и др.) проводятся исследования, имеющие своей целью создание экологически чистых источников энергии на основе использования низкоэнергетических ядерных процессов в системах металл-водород. Получен ряд интересных свидетельствующих о возможности понижения результатов, энергии инициирования ядерных реакций за счет эффектов взаимодействия водорода с кристаллической решеткой. Вместе с тем, некоторые принципиальные вопросы все еще остаются нерешенными. Прежде всего, это относится к пониманию роли различных динамических механизмов взаимодействия решетки и внедренных в нее изотопов водорода. Отсутствие ясности в этом дальнейшему вопросе препятствует прогрессу В данной области исследований.

Известно, что водород образует с металлами соединения с различными типами связи. Гидриды наиболее активных щелочных и щелочноземельных металлов построены по типу галогенидов и характеризуются ионной связью. Редкоземельные металлы образуют с водородом соединения с ковалентной и металлической связью, тогда как для переходных металлов преобладает металлический тип связи. Эти последние соединения часто рассматриваются как растворы внедрения, где атомы водорода, имеющие относительно малые

размеры, занимают пустоты в решетке между атомами металла. При этом существенным образом меняются свойства, как металла, так и водорода, т. е. имеет место химическое взаимодействие. Основным объектом исследований в данном проекте будут системы, содержащие переходные металлы (Pd, Ti, Ni, Re, Rh) и гетеростуктуры таких металлов, способные поглощать большое количество водорода и его изотопов. Именно для систем «переходный металл—изотопы водорода» были получены экспериментальные указания на возможность увеличения вероятности инициирования ядерных реакций при низких энергиях.

## Основание и исходные данные для разработки темы, обоснование необходимости проведения НИР

Изучение влияния различных материалов на протекание в них реакций синтеза легких ядер и объяснение механизмов подобного влияния представляет большой научный интерес для фундаментальных исследований в области физики твердого тела, ядерной физики и астрофизики.

В рамках создания будущих энергетических установок базирующихся на альтернативных видах топлива (водород, дейтерий, гелий ...) изучение синтеза легких ядер в кристаллических структурах представляет также безусловный практический интерес. Поиск (и создание) материалов с аномально высокими потенциалами экранирования будет содействовать, в конечном счете, решению актуальной задачи создания новых экологически чистых водородных источников энергии. С другой стороны, исследование влияния различных факторов внешнего воздействия (пучки ионов и электронов, рентгеновское излучение, электрический разряд и др.) на выходы продуктов ядерных реакций из твердотельных структур позволит определить оптимальные методы влияния на процессы синтеза. Таким образом, это даст

возможность получить инструменты позволяющие сделать процессы синтеза управляемыми.

Важными факторами, влияющими на усиление протекания ядерных реакций в твердом теле, могут быть различные внешние излучения (электроны, ионы, рентгеновские кванты и др.). В этой связи представляет большой интерес исследование процессов стимулирования ядерных реакций в дейтеридах металлов при повышенной энергии и токе электронного пучка. Такие исследования можно проводить на ускорительном комплексе ФИАН «Пахра», где имеется удобная возможность облучать мишени электронным пучком с током несколько мкА при энергии 7-11 МэВ и детектировать продукты ядерных реакций В радиационно-защищенной зоне В низкофоновых условиях.

Возможность осуществления условий, необходимых для протекания реакций ядерного синтеза при низких энергиях в твердотельных структурах может иметь далеко идущие фундаментальные и прикладные следствия и требует дальнейшей, тщательной экспериментальной проверки и теоретического осмысления. Исследование влияния различных факторов внешнего воздействия (пучки ионов и электрический разряд) на выходы продуктов ядерных реакций из твердотельных структур, будет проведена в рамках предлагаемого проекта. Это позволит сделать вывод о возможности инициирования ядерных реакций и эффективности их усиления.

Исследование материалов, в которых процессы усиления ядерных реакций более ярко выражены, даст возможность определить перспективность их применения в будущих установках управляемого ядерного синтеза.

В работах, проведенных на установке ЭРГ, установлено, что в процессе высоковольтного разряда (средняя напряженность поля ~1 МВ/м) в воздухе эмитируются нейтроны в широком диапазоне энергий (от тепловых до энергий больше 10 МэВ) с интенсивностью >10<sup>6</sup> нейтронов за выстрел в  $4\pi$ 

ср. Таким образом, получены серьезные указания на стимулирование ядерных реакций высоковольтным разрядом. Для объяснения механизма наблюдаемой эмиссии нейтронов и уточнения местоположения их источника необходимы дополнительные исследования.

Основанием для проведения НИР являлось важность изучения ядерных процессов, вызываемых частицами низких энергий, присутствующими в высоковольтном разряде или создаваемых ускорителями ионов и электронов, а также необходимость оценки возможности использования таких процессов для термоядерной энергетики, в астрофизических и иных применениях.

#### Сведения о научно-техническом уровне разработки

Научно-технический уровень, полученных в ходе проведения НИР результатов, соответствует мировому.

Научная значимость, полученных в ходе проведения НИР результатов, определяется важностью доказательства стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti и др.) пучком ионов инертных газов и релятивистских электронов, измерением выходов ядерных реакций в образцах CVD-алмаза и углерода при их облучении пучком ионов дейтерия, реакций измерением выходов продуктов ядерных В процессе высоковольтного разряда, определением зависимости выходов продуктов реакций формы материала ядерных OT И электродов В процессе высоковольтного разряда.

Полученные результаты способствуют завоеванию РФ лидирующих позиций в мире в области изучения стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов.

#### Актуальность и новизна темы

Исследование процессов стимулирования ядерных реакций в дейтеридах металлов при повышенной энергии и токе электронного пучка представляет большой интерес. Такие исследования проведены на установке C-25P (ускорительном комплексе ФИАН «Пахра»), где имеется возможность облучать мишени электронным пучком с током несколько мкА при энергии 7 или 11 МэВ и детектировать продукты ядерных реакций в радиационнозащищенной зоне в низкофоновых условиях.

В экспериментах на электронном пучке с энергий несколько МэВ может изучаться процесс электрорасщепления дейтронов с наблюдением вылетающих нейтронов и/или протонов. Сейчас, когда появились убедительные свидетельства протекания ядерных реакций с генерацией нейтронов в грозах и в высоковольтных разрядах, становится актуальным раздельное исследование роли ионных, электронных и фотонных потоков в генерации нейтронов.

На первый взгляд, сечения взаимодействия электронов и фотонов малых энергий с ядрами, присутствующими в газе и в твердых мишенях, которые ведут к образованию нейтронов, могут быть теоретически оценены на основании надежных ядерных моделей. Вообще говоря, в условиях реальных высоковольтных разрядов, когда ускоряемые заряженные частицы не успевают, как правило, набрать большую энергию из-за столкновений в газе, величина этих сечений ожидается довольно малой. Однако в условиях, когда сечения DD-реакций в некоторых веществах неожиданно оказываются значительно выше теоретических предсказаний, представляется необходимым иметь прямые экспериментальные данные для сечений ядерных превращений веществ под действием сформированных пучков заряженных частиц с известной энергией. Такие данные могут оказаться полезными оценки гипотезы 0 возможном присутствии ДЛЯ В высоковольтных разрядах некоторого количества ускоряемых заряженных

частиц больших энергий, а также фотонов, которые в принципе могут быть ответственными за наблюдаемую генерацию нейтронов.

Примечательно, что к настоящему времени имеется много измерений сечений фоторасщепления дейтронов при низких энергиях. Но в то же время экспериментальные данные по электрорасщеплению дейтрона (и вообще легких ядер) электронами малых (околопороговых) энергий отсутствуют, практическими трудностями что, вероятно, связано С регистрации заряженных частиц малых энергий (в частности, протонов), быстро теряющих энергию при прохождении даже тонких слоев вещества. Важным результатом настоящей НИР является получение первых прямых данных по образованию нейтронов В процессе электрорасщепления дейтронов, содержащихся в дейтерированных мишенях и облучаемых электронами малых энергий.

Исследования, проводимые в рамках проекта, обеспечивают получение новых знаний и результатов в области новых перспективных материалов, нанотехнологий с использованием методов активного физического воздействия (пучков ионов и синхротронного излучения).

#### Основная часть

1. Аналитический обзор и анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы. Обоснование выбора развиваемого направления исследований; обоснование необходимости использования УСУ для достижения целей работы; изложение методик проведения исследований и обоснование их использования

Реакции слияния (синтеза) легких ядер, которые будут в первую очередь исследоваться в данной работе, приведены в Таблице 1.

Реакция	Энерговыделение	Число реакций,
	(МэВ)	дающих 1 Вт
		мощности (х10 <sup>12</sup> )
$p + D \rightarrow {}^{3}He + \gamma(5.5)$	5.5	1.1
$D + D \rightarrow {}^{3}\text{He} + n(2.45)$	3.27	1.9
$D + D \rightarrow T + p(3.02)$	4.03	1.6
$D + D \rightarrow {}^{4}\text{He} + \gamma (23.8)$	23.8	0.26
$D + T \rightarrow {}^{4}He + n(14.1)$	17.6	0.36

Таблица 1. Характеристики реакций синтеза легких ядер.

Измерение сечений этих реакций при низких энергиях представляет значительный интерес, как для создания энергетических установок нового поколения, так и для понимания процессов, протекающих внутри звезд (обзор раннего периода исследований в этой области можно найти, например, в [1—4]). Напомним, что прямое измерение сечений при малых энергиях затруднено в связи с проблемами обеспечения устойчивости ускорительных пучков низких энергий. Поэтому сечения ядерных реакций при низких энергиях (≤ 100 кэВ) обычно находят с помощью экстраполяции

из области высоких энергий, где эти сечения могут быть измерены в экспериментах на ускорителях (это является, конечно, неудовлетворительным и требует нового теоретического рассмотрения вопроса). При этом используется соотношение:

$$\sigma = \sigma_n G; \sigma_n = S(E) / E; \tag{1}$$

Здесь  $\sigma$  - сечение синтеза;  $\sigma_n$  – ядерное сечение; S(E) – медленно меняющаяся функция («астрофизический фактор»); обычно полагают S(E)  $\approx$  const = S<sub>0</sub>; G – «фактор Гамова», определяющий вероятность прохождения через кулоновский барьер, который при низких энергиях можно записать в виде:

G = exp(- 
$$\alpha$$
);  $\alpha = 2 \int_{r_0}^{R} k(r) dr$ ;  $k(r) = [2\mu(V(r) - E)]^{1/2}$ . (2)

В случае взаимодействия двух «голых» ядер с зарядами Z<sub>1</sub>e и Z<sub>2</sub>e, находящихся на расстоянии r, потенциал взаимодействия V(r) имеет хорошо известный вид:

$$V_0(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r.$$
 (3)

В молекуле D<sub>2</sub> электронные оболочки атомов приводят к модификации кулоновского потенциала:

$$V_0(r) \rightarrow V(r) = V_0(r) - U_e \tag{4}$$

Где U<sub>e</sub> - «потенциал экранирования», который составляет для молекулы D<sub>2</sub> величину  $\approx 25$  эВ. Минимум V(r) соответствует равновесному расстоянию между ядрами R(D<sub>2</sub>)  $\approx 0,74$  A.

При внедрении ионов водорода или его изотопов в кристаллическую решетку металла, их электронные оболочки должны также приводить к экранированию кулоновского барьера и, вообще говоря, способствовать взаимному сближению ядер внедренных атомов. Поэтому можно было бы ожидать увеличения вероятности синтеза ядер в кристаллической матрице по сравнению с синтезом в газовой фазе, что открывало бы заманчивые перспективы осуществления реакций синтеза при меньших энергиях. Но до недавнего времени существовало широко распространенное убеждение, основанное на ряде упрощенных оценок [6—10], что эффекты экранирования в кристаллах могут быть лишь весьма незначительными.

Однако, в последнее время были получены экспериментальные данные по реакциям синтеза в кристаллах при низких энергиях ( $\geq 2,5$  kэB), которые при тех же методах определения значения U<sub>e</sub> ставят под сомнение приведенные выше оценки и указывают на возможность очень сильных эффектов экранирования в кристаллических решетках [11—19].

Для большинства металлов и некоторых оксидов металлов [16-19] найденное в экспериментах увеличение скорости DD-реакции и потенциала экранирования оказалось значительно большим, чем предсказывается при экстраполяции из области высоких энергий [20]. Так в [18] при бомбардировке PdO-мишени дейтеронами. с энергиями  $E_{lab} \ge 2,5$  кэВ экспериментальный выход реакции D(d,p)T соответствовал потенциалу экранирования U<sub>e</sub> = 600 эВ, что в 50 раз выше, чем предсказано для сечения DD-реакции вычисленного из экспериментальных данных по (весьма ненадежному, но широко применяемому) методу экстраполяции Боша-Халле при энергии  $E_{lab} = 2,5$  кэВ [20]. Заметим также, что ненадежен и другой используемый метод, опирающийся на работы [33].

В работах Райола и др. [16, 17] выходы DD-реакции и потенциалы экранирования изучались систематически для почти 30-ти элементов Периодической системы, включая металлы и неметаллы. Было обнаружено, что большинство изученных металлов имеют «большой» потенциал экранирования,  $U_e \ge 100$  эB, за исключением металлов 4 группы (Ti, Zr, Hf) и 11 группы (Cu, Ag, Au). Авторы не нашли каких-либо специфических экспериментальных условий и свойств мишеней (включая плотность тока ускорителя, кристаллическую и электронную структуру, зарядовое число, а также подвижность дейтерия в мишени), которые влияют на усиление DD-реакции и рост потенциала экранирования. В то же время, следует отметить,

что ускоритель, использованный в [16, 17], позволял достигать токов дейтеронов лишь от 1 до 54 мкА и, поэтому, измерения выходов DD-реакции были возможны лишь при относительно высокой энергии (Е ≥ 5 кэВ).

Касаги и др. [18, 19], используя сильноточный низкоэнергетический ускоритель (ток ионов – 60 – 400 мкА), измеряли выходы реакции D(d,p)Т в некоторых металлах и оксидах металлов при энергиях E<sub>lab</sub> ≥ 2,5 кэВ. Было обнаружено, что величина потенциала экранирования при ланной интенсивности пучка сильно зависит от подвижности дейтерия в металлах. В случае металлов с малой подвижностью дейтерия и высокой энергией активации диффузии дейтеронов (Ti, Au) потенциалы экранирования были низкими,  $65 \pm 15$  эВ и  $70 \pm 10$  эВ, соответственно. Эти потенциалы экранирования U<sub>e</sub> лишь в 2 раза выше величины для газовой (D<sub>2</sub>) мишени. Напротив, для мишеней Pd и PdO с высокой подвижностью дейтерия U<sub>e</sub> = 310 и 600 эВ, соответственно [19]. Таким образом, экспериментальные данные показывают, что протекание процессов синтеза ядер дейтерия в твердотельных и газовых мишенях сильно различаются. При этом наибольшее усиление DD-реакции продемонстрировали материалы с большой степенью подвижности водорода (Pd и PdO). Это обстоятельство, возможно, является указанием на роль динамических эффектов (связанных с движением водорода в решетке), ранее обсуждавшихся в [21, 22].

До настоящего времени выходы DD-реакции в металлических мишенях изучались, в основном, только с использованием ускорителей с  $E_{lab} \ge 2,5$  кэВ. Желательное дальнейшее уменьшение ускоряющего напряжения приводит к серьезным проблемам, связанным с поддержанием тока, которые делает невозможным измерения продуктов DD-реакции за приемлемое время эксперимента из-за чрезвычайно малого выхода. В то же время, изучение поведения выхода/сечения DD-реакции при низких энергиях дейтронов (ниже 1 кэВ) представляет большой интерес в рамках изучения астрофизических процессов и эффектов экранирования в конденсированных

средах, приводящих к возможному усилению ядерного взаимодействия изотопов водорода в металлах.

показали [28], что импульсный тлеющий разряд Эксперименты способен генерировать ионы с энергиями 0,8 – 2,5 кэВ и плотностями тока 300 - 600 мА/см<sup>2</sup> при давлении дейтерия в диапазоне 2-10 мм Hg. Плотность тока, используемая при бомбардировке поверхности катода (мишени) в тлеющем разряде почти на 3 порядка величины выше, чем достигаемая с использованием ускорителей. Предварительные оценки показывают, что сильноточная бомбардировка дейтерием катода в тлеющем разряде позволит детектировать продукты DD-реакции даже при E  $\leq$  1 кэВ за время экспозиции не превышающее несколько десятков часов (в предположении экспоненциального роста коэффициента усиления DD-реакции при низких энергиях). При этом достигается значительное усиление выхода DD-реакции по сравнению с относительно слаботочными ускорителями заряженных частиц. Недавно полученные данные показали, что при E<sub>d</sub> = 1.0 кэВ в Ti мишенях, бомбардируемых дейтронами при токе разряда I ~ 300 мА, коэффициент усиления реакции d(d,p)t составил 10<sup>9</sup> по отношению к значениям выхода определяемым стандартным сечением DD-реакции (приближение Боша-Халле).

Многочисленные эксперименты, проведенные во многих лабораториях мира, дают некоторые указания на возможность протекания (с малой интенсивностью) реакций ядерного синтеза в дейтерированных твердых телах при малых энергиях в неравновесных условиях (сорбция и десорбция дейтерия, термо-, крио-, электро-удары, разрушение) (смотри, например, [1— 4]). В основе этих явлений могут лежать как отмеченные выше эффекты экранирования, так и нестационарные квантово-механические эффекты. Действительно, как было показано в [29], довольно общей причиной, приводящей к увеличению проницаемости кулоновского барьера, может быть возникновение высоко-импульсной компоненты в волновой функции

дейтеронов, кристаллических ячейках, находящихся В вызванное процессами переходными при внезапном изменении потенциала В кристаллической решетке. Необходимая для этого «перестройка» потенциала могла бы возникать, например, при растрескивании пересыщенных гидридов или при других нестационарных условиях. Заметим, что растрескивание является хорошо известным явлением, возникающим в металлах при высоких концентрациях растворенного в них водорода (или его изотопов). Оно может сопровождаться возникновением электрических полей на свежеобразованных поверхностях трещин. Ускорение в этих полях изотопов водорода, внедренных в кристаллическую решетку, могло бы также обеспечивать условия ДЛЯ преодоления кулоновского барьера И приводить К инициированию ядерных реакций в твердых телах.

Важными факторами, влияющими на усиление протекания ядерных реакций в твердом теле, могут быть различные внешние излучения (электроны, ионы, рентгеновские кванты и др.). Так в [34] было показано, что воздействие пучка электронов с энергией 30 кэВ и рентгеновского пучка с энергией квантов до 120 кэВ инициирует в системах Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> синтез ядер дейтерия с выходом 3 МэВ протонов.

Анализ экспериментальных данных по измерению сечения DDреакции при бомбардировке различных металлических мишеней дейтронами низких энергиях на ускорителях [16-19] и в тлеющем разряде [10], показывает, что краевые эффекты в материалах первой стенки термоядерного реактора типа ITER могут приводить к, игнорировавшимся ранее, процессам эрозии приповерхностного слоя за счет генерации избыточных альфа-частиц (атомов гелия-4), в результате значительного усиления выхода реакции d(t, n)α [31,32].

В работах [35,36] на установке ГЕЛИС показано, что потенциал экранирования для структур Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> сильно зависит от внешних условий (силы тока, температуры мишени) и может достигать

значений намного больших, чем в случае работ [16, 17]. Также получены указания на возможность стимулирования реакций DD-синтеза в структурах Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> путем облучения пучками протонов [37].

Планируется продолжить исследование возможности стимулирования DD- реакции в структурах Pd/PdO: $D_x$  и Ti/TiO<sub>2</sub>: $D_x$  пучками тяжелых ионов (Ne+, Ar+ и др.). Это позволит исключить возможность влияния примесных ионов дейтерия в пучке протонов на результаты измерения выхода продуктов DD- реакции.

В работе [38] высказано предположение об увеличении вероятности протекания DD- реакции в твердом теле за счет коллективного взаимодействия дейтронов в гиперканалах, расположенных вдоль главных кристаллических осей.

В этой связи представляется важным проведение экспериментов с материалами с ярко выраженным проявлением структуры гиперканалов с повышенным содержанием дейтерия. В качестве одного из таких материалов рассматривается поликристаллический CVD-алмаз, предварительно насыщенный дейтерием. Ожидается, что измерение угловой зависимости выхода продуктов DD- реакции из такой структуры покажет наличие влияние коллективных эффектов взаимодействия дейтронов на вероятность DD- синтеза.

С другой стороны, в высоковольтных атмосферных разрядах со средним полем ~1МВ/м наблюдается генерация жесткого рентгеновского и гаммаизлучения [39-45], связанная с пробоем на убегающих электронах. Высокоэнергетичный хвост распределения энергии квантов простирается до единиц МэВ и выше. Пороги фотоядерных реакций (1.65 МэВ для Ве, 2.25 МэВ для D и т.д.) позволяют ожидать генерацию нейтронов при наличии дейтерированных материалов вблизи источников гамма-квантов. Наличие вблизи концов стримеров растущего канала разряда сильных (до 200 кВ/см) электрических полей может привести к дополнительному воздействию на

электроды-мишени ускоренных заряженных частиц. Такое комбинированное воздействие позволит исследовать стимулированные ядерные реакции в материале мишени. Исследование высоковольтного разряда в атмосфере естественного состава и влажности позволит прояснить механизм генерации нейтронов в грозовой атмосфере [46].

В работе [47] на установке ЭРГ установлено, что в процессе высоковольтного разряда (средняя напряженность поля ~1 МВ/м) в воздухе эмитируются нейтроны в широком диапазоне энергий (от тепловых до энергий больше 10 МэВ) с интенсивностью  $>10^6$  нейтронов за выстрел в  $4\pi$ ср. Полученные данные позволяют предположить, что в процессе разряда образуются быстрые нейтроны, причем их генерация происходит в начальной фазе разряда и коррелирована с генерацией квантов жесткого рентгеновского излучения. Источником нейтронов, вероятно, являются высоковольтных электродов, которые поверхности подвергаются воздействию сильных электрических полей и ионной бомбардировке в процессе разряда. Таким образом, получены четкие указания на стимулирование ядерных реакций Для высоковольтным разрядом. объяснения механизма наблюдаемой эмиссии нейтронов и уточнения местоположения их источника планируется проведение дополнительных экспериментов.

В настоящее время исследованием низкоэнергетических реакций синтеза легких элементов активно занимается коллаборация LUNA в подземной лаборатории Гран-Сассо в Италии [48]. С использованием пучков ионов легких элементов и различных мишеней сотрудники коллаборации получили ряд интересных результатов для термоядерных реакций, протекающих на Солнце [49 - 51]. Аналогичные исследования могут быть проведены на установке ГЕЛИС при повышенных токах пучка, что позволит исследовать влияние коллективных процессов в плазме на выходы термоядерных реакций, протекающих в ядрах звезд, что крайне важно для решения проблем современной астрофизики.

## 2. Проведение патентных исследований

С целью выявления и анализа новых разработок и новых направлений в области изучения влияния среды на протекание в ней реакций синтеза легких ядер, стимулирования низкоэнергетических ядерных реакций синтеза на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов, были проведены соответствующие патентные исследования. Поиск технических решений, защищенных патентами, осуществлялся поисковой системой «МІМОЅА» Всероссийской патентно-технической библиотеки. По разделам G (физика) и H (электричество) Международной патентной классификации и конкретно его подразделам:

G 01 N 23/00 – исследование и анализ материалов радиационными методами, G 01 T 3/00 – измерение нейтронного излучения,

G 01 T 7/00 – конструктивные элементы приборов, измеряющих излучение,

G21 В 1/00, 1/02 – термоядерные реакторы,

Н05 Н 6/00 – мишени для проведения ядерных реакций.

Были первоначально отобраны и исследованы 652 патента, из которых для последующего анализа отобраны 15. Кроме того, из базы данных были отобраны 13 научно-технических документов – публикации в научных журналах, в том числе публикации авторов, входящих в состав исполнителей настоящего госконтракта.

Анализ отобранных документов показал отсутствие на сегодняшний день технических решений, основанных на стимулировании ядерных реакций синтеза на границе твердого тела и плазмы. В процессе поиска было обнаружено много технических решений, защищенных патентами, которые содержат другие технические решения стимулирования ядерных реакций синтеза легких ядер. Аналогов решений, развиваемых в настоящей НИР, обнаружено не было, что подтверждает их новизну и оригинальность.

Более полные сведения излагаются в «Отчете о патентных исследованиях», который входит в состав отчетных документов по выполненной работе, предусмотренной госконтрактом.

# 3. Разработка методов измерений выхода продуктов ядерных реакций и излучений из твердотельных мишеней при воздействии на них пучками ионов, электронов и высоковольтного разряда

3.1. Разработка методов измерений выхода продуктов ядерных реакций и излучений из твердотельных мишеней при воздействии на них пучками ионов на установке ГЕЛИС

Для детектирования продуктов DD-реакций  $d+d \rightarrow p (3 \text{ MeV}) + T (1 \text{ MeV})$  (5)  $d+d \rightarrow n(2.45 \text{ MeV}) + {}^{3}\text{He} (0.8 \text{ MeV})$  (6)

использовались многоканальный детектор нейтронов на основе счетчиков с наполнением He-3 и трековый детектор CR-39.

Схемы расположения детекторов и мишени на установке ГЕЛИС показаны на Рисунке 1.



Рисунок 1. (а) Схема расположения Не-3 детектора на установке ГЕЛИС. 1 и 2 – первая и вторая группы счетчиков Не-3 детектора (R1 = 85 см, R2 = 38 см), 3 – место расположения мишени, 4 – контуры установки ГЕЛИС.

(б) Схема расположения мишени и трековых детекторов в пучке ионов в установке ГЕЛИС. 1, 2, 3 – трековые детекторы CR-39 с различными покрытиями; 4 – мишень; 5 – манипулятор; 6 – пучок ионов; 7 – стальная подложка; 8 – диафрагма.

Первая группа счетчиков (с радиаторами 5 см парафина и 3 см оргстекла) Не-3 детектора, расположенная в положении 1 (R1 = 85 см), предназначена для регистрации нейтронов, испущенных из мишени в направлении по пучку. Вторая группа счетчиков (с радиатором 3 см оргстекла) Не-3 детектора, расположенная в положении 2 (R2 = 38 см) предназначена для регистрации нейтронов, испущенных из мишени в направлении поперек пучка.

Три детектора CR-39 (1, 2, 3) (см. Рисунок 1б) устанавливаются с трех сторон исследуемого образца (4) в держателе с манипулятором, который позволяет перемещать образец поперек пучка ионов (6). Детекторы 1 и 2, расположенные над образцом, имеют покрытия 11 (или 22) и 55 (или 66) мкм Al, соответственно. Они предназначены для регистрации заряженных частиц и нейтронов, вылетевших с облученной поверхности образца против направления пучка. Детектор 3, расположенный под образцом, имеет покрытие 11 (или 33) мкм Al. Он предназначен для регистрации нейтронов, вылетевших с облученной поверхности образца против направления пучка. Детектор 3, расположенный под образцом, имеет покрытие 11 (или 33) мкм Al. Он предназначен для регистрации нейтронов, вылетевших с облученной поверхности образца в направлении пучка. Покрытия разной толщины позволяют не только защитить поверхность детектора от прямого попадания распыленных частиц образца, но и получить смещение энергетического спектра заряженных частиц на известную величину потерь энергии в соответствующем фильтре.

# 3.2. Разработка методов измерений выхода продуктов ядерных реакций и излучений из твердотельных мишеней при воздействии высоковольтного разряда на установке ЭРГ

Для детектирования импульсного нейтронного излучения с энергией более 1 МэВ использовались детекторы нейтронов на основе пластиковых сцинтилляторов (полистирол с РОРОР) с ФЭУ, трековые детекторы CR-39 и дозиметр с блоком детектирования нейтронов на основе ZnS.

Схемы расположения детекторов и мишени на установке ЭРГ показаны на Рисунке 2.



Рисунок 2. Схема расположения диагностик на установке ЭРГ: 1– емкостный делитель, 2 – активный делитель, 3 – ввод от ГИН, 4, 13 – магнитные зонды, 5 – трековые детекторы, 6 – анодный шунт, 7 – пояс Роговского, 8 – нейтронная измерительная головка дозиметра ДКС-6, 9 – интегральные фотокамеры, 10 – свинцовый кожух, 11 – пластиковый сцинтиллятор РОРОР, 12 – ФЭУ-30, 14 – катод и 15 – анод с установленными трековыми детекторами CR-39.

Сцинтиллятор на основе полистирола с добавкой РОРОР, чувствительный к быстрым нейтронам, имеет форму параллелепипеда 150x150x55 мм<sup>3</sup>. Сцинтиллятор своей боковой гранью соединен с плексигласовым световодом в виде четырехгранной усеченной пирамиды со входным окном ФЭУ.

Собственная эффективность детектора к быстрым нейтронам, измеренная с помощью источника <sup>252</sup>Cf, оказалась равной  $\eta_{int} = 0.17$  (см. п.4.3.2). Детекторы располагались на расстоянии ~150 см от зоны разряда. Один детектор имеет покрытие из 50 мкм Al фольги и может регистрировать импульсы от рентгеновских гамма-квантов ( $E_{\gamma} > 10$  кэB) и нейтронов ( $E_n > 1$ МэB). Другой имеет дополнительный защитный кожух из свинца толщиной

10 см. Такая схема позволяет в первом приближении реализовать метод времени пролета для оценки энергии нейтрона. Начало сигнала (предположительно, от быстрых нейтронов) на втором детекторе с защитой из 10 см Рь должно быть задержано относительно сигнала первого детектора (от гамма-квантов) на время, определяемой базой и энергией быстрого нейтрона. Для условий установки ЭРГ это время составляет десятки наносекунд (энергия нейтронов E<sub>n</sub> ~ 1–10 МэВ). Геометрический фактор, определяемый размерами сцинтиллятора и расстоянием ОТ разряда, составляет  $\approx 8 \times 10^{-4}$ .

Для регистрации интегрального потока нейтронов использовались трековые детекторы CR-39 производства японской фирмы Fukuvi Chemical Industry, нечувствительные к сильным электромагнитным полям. Трековые детекторы CR-39 располагались вблизи зоны разряда как показано на Рисунке 2. Используется детектор с радиатором из 120 мкм полиэтилена (детекторы PE на Рисунке 2). Быстрые нейтроны от источника испытывают упругое рассеяние на атомах водорода в радиаторе и в самом детекторе, при этом образуются протоны отдачи, которые регистрируются детектором. Диаметры треков протонов отдачи расположены в диапазоне 4 – 8 мкм.

Для регистрации тепловых нейтронов по реакции

$${}^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow {}^{7}\text{Li} (0.8 \text{ M} \Im \text{B}) + {}^{4}\text{He} (2 \text{ M} \Im \text{B})$$
(7)

детекторы помещались в 20% раствор тетрабората Na в глицерине (детекторы В на Рисунке 2). Регистрация нейтронов проводилась путем подсчета треков альфа-частиц с E<sub>α</sub> ≤ 2 MэB, которые, согласно калибровке, имеют диаметры 10 – 12 мкм.

Регистрация быстрых нейтронов с энергией E<sub>n</sub> >10 МэВ проводилась по реакции

$$^{12}C + n \rightarrow 3\alpha + n$$
, (8)

которая имеет порог около 10 МэВ. Характерная сигнатура распада ядра <sup>12</sup>С представляет собой три альфа-частицы, треки которых исходят из одной точки.



Рисунок 3. Схема расположения трековых детекторов CR-39 в установке ЭРГ (детектор 1 расположен внутри анода, детектор 2 – внутри катода, детекторы 3, 4 и 5 размещены в воде, детекторы 6, 7, 8 – за стальным уголком на разных расстояниях от разряда, фоновые детекторы располагались в ~10 м от зоны разряда).

# 3.3. Разработка методов измерений выхода продуктов ядерных реакций из твердотельных мишеней при воздействии на них пучками электронов на установке C-25P

Регистрация нейтронов с помощью трековых детекторов CR-39, описанных выше, может применяться и в экспериментах на электронном пучке с энергией 7 МэВ от микротрона-инжектора установки C-25P. Трековые детекторы позволяют достоверно определить интегральный выход нейтронов из мишени, однако они не дают точной информации о времени прихода нейтрона, а значит об их скорости и энергии. Поэтому вместе с трековыми детекторами в данной НИР был апробирован метод регистрации нейтронов с помощью быстрых сцинтилляционных счетчиков, ранее успешно применяемых группой ФИАН для время-пролетных измерений скоростей частиц.

Непременным определения скорости условием регистрируемого нейтрона по времени пролета некоторой известной базы (длины) является наличие стартового сигнала, привязанного ко времени вылета нейтрона из мишени. В качестве такого сигнала было выбрано попадание в стартовый испускаемого одновременно нейтроном детектор протона, с при электрорасщеплении дейтрона в реакции  $e + d \rightarrow e' + n + p$ .

В приближении эквивалентных фотонов реакция электрорасщепления протекает через подпроцесс фоторасщепления  $\gamma^* + d \rightarrow n + p$ , в котором вылетающие нуклоны имеют угловое распределение  $\sim \sin^2\theta$ . Для наиболее вероятных поперечных углов разлета  $\theta \approx 90^\circ$  энергии нейтрона и протона одинаковы и составляют  $E_p = E_n = (E_{\gamma} - E_b)/2$ , где  $E_b = 2.2$  МэВ – энергия связи дейтрона.

Количество эквивалентных фотонов, испускаемых на один электрон (с заданной максимальной виртуальностью  $Q^2_{max}$ ) показано на Рис. 4 слева. Вместе с теоретическим и экспериментально известным сечением фоторасщепления дейтрона, показанным на Рис. 4 справа, это позволяет теоретически оценить сечение и спектр испускаемых нейтронов и протонов в процессе электрорасщепления дейтрона (повторим, что экспериментальных данных для сечения электрорасщепления при низких энергиях пока нет).



Рисунок 4. Слева: теоретический спектр эквивалентных фотонов при энергии электронного пучка 7 МэВ. Справа: теоретическое сечение фоторасщепления дейтрона.

Вылетающие поперек пучка нейтрон и протон типично имеют энергию около 1 МэВ, и они жестко коррелированны по углам. В системе центра масс  $\gamma^*$  + d угол разлета частиц составляет 180°. В лабораторной системе это 174°. приблизительно соответствует углу разлета что определяет расстановку детекторов, регистрирующих нейтроны и оптимальную протоны. Для тонких дейтерированных титановых мишеней с поверхностной ~2.5x10<sup>19</sup> см<sup>-2</sup> ожидаемый выход поперечных плотностью дейтерия коррелированных нуклонов в телесный угол ~0.01 ср при среднем токе электронного пучка 10 мкА составляет приблизительно 13 частиц/сек. Такой выход вполне доступен для наблюдения, но при непременном условии сильного подавления фона.

Микротрон и выходная магнитная оптика канала обеспечивают в области мишени практически моноэнергетический ( $\Delta E/E = 0,001$ ) 7-МэВ электронный пучок с максимальной интенсивностью до 40 мкА, размером в поперечнике около 1,5 см (FWHM) и начальной расходимостью примерно  $\Delta \theta \sim 47$  мрад,  $\sigma_{\theta} \sim 20$  мрад.

Временная структура пучка микротрона характеризуется импульсами тока электронов средней длительностью 4 мкс с паузой примерно 20 мсек (частота 50 Гц). Внутри отдельных импульсов также существует тонкая банчировка с периодом ~ 0.33 нс, соответствующим частоте ускоряющего поля в резонаторе 3 ГГц. Для подавления фона от полей СВЧ, генерируемых системой импульсного питания микротрона в первые ~0.5 мкс импульса, окно для регистрации сигналов от плеч установки не включало эти первые 0.5 мкс.

Максимальная интенсивность, выраженная в числе частиц в секунду — составляет порядка ~ 2,4x10<sup>14</sup> e<sup>-/</sup>сек. Такая интенсивность потока электронов создаёт мощный электромагнитный фон (электроны, гамма-кванты, позитроны) с энергетическим спектром практически от нуля вплоть до 7 МэВ в зоне, непосредственно прилегающей к микротрону. Так как, плоскость, перпендикулярная оси электронного пучка, менее загружена
фоновыми частицами и излучениями, это (а также условия ограниченного пространства вблизи микротрона и синхротрона) предопределяет общую конфигурацию расположения протонного и нейтронного плеч установки примерно на одной вертикали – как показано на рис. 5.



Рисунок 5. Схема расположения элементов установки.

Серьезным фоном, препятствующим измерениям с пластиковыми детекторами, является электромагнитный фон, создаваемый в зале работающим микротроном, и фон от излучения электронов, попадающих на вещество. Тестовые измерения фоновых условий, выполненные на начальной стадии работы, позволили подобрать место между микротроном-инжектором и кольцом синхротрона, где этот фон минимален. Однако и там оказалось необходимым дополнительно экранировать все сигнальные кабели от мощных электромагнитных наводок. Кроме того, в течение первых ~0.5 мкс каждого импульса микротрона, когда электромагнитное поле в микротроне было максимальным, сигналы детекторов не регистрировались.

Другим мощным фоном, препятствующим измерениям, является фон, создаваемый 7 МэВ электронами, рассеиваемыми в мишени на большие углы. Для борьбы с этим фоном использовалась свинцовая защита, закрывающая счетчики, а также поле постоянных магнитов силой около 520 Гс, разводящее электроны и протоны в разные стороны.

Из-за сильного торможения протонов низких энергий даже в тонких слоях вещества оказалось невозможным закрывать протонный сцинтилляционный счетчик от случайных фотонов обычно применяемыми толстыми фильтрами (черной бумагой) или фольгами. Один из примененных вариантов подавления этого фона состоял в напылении на пластик тонкого (около 1 мкм) слоя серебра или алюминия.

Для реализации время-пролетных измерений предусматривалась разная длина протонного и нейтронного плеч (около 1 м и 1.7 м, соответственно). При условии одинаковости энергий протона и нейтрона, одновременно вылетающих из мишени в процессе электрорасщеплении дейтрона, измеряемая разность времен прохождения частицами этих плеч может служить информацией об энергии частиц. Например, для энергии нуклонов 1 МэВ, которая соответствует импульсу 43 МэВ/с и скорости  $\beta = 0.046$ , время запаздывания нейтронов относительно протонов на разнице длин пробега 0.7м составляет 53 нс.

### 4. Проведение подготовительных работ для проведения экспериментов по исследованию стимулирования ядерных реакций

## 4.1. Изготовление мишеней на основе гетероструктур Pd, Ti и CVD-алмаза

#### 4.1.1. Изготовление мишеней на основе гетероструктур Рd

Для подготовки матрицы гетероструктуры Pd/PdO осуществляли холодную прокатку толстой Pd фольги (чистота 99.95%, производство компании Nilaco, Япония) до необходимой толщины (50 мкм). Затем образом фольги полученные таким подвергались травлению В концентрированной азотной кислоте при комнатной температуре в течение 20 мин с последующим отжигом в вакууме (р ~  $10^{-6}$  Top) при t =  $800^{\circ}$  С в течение 3 часов с охлаждением до комнатной температуры со скоростью 1 К/мин. Отожженные в вакууме фольги подвергались короткому нагреву в пламени кислородной/пропановой горелки при температуре t = 1000° C с медленным выводом образца из пламени, с тем чтобы охлаждение осуществлялось со скоростью не более 20 К/мин. Данная процедура нагрева повторялась 4-5 раз до появления гладкой пленки серого цвета. Полученный на поверхности Pd фольги оксид Pd является абсолютно устойчивым по отношению к его восстановлению водородом, например при электролизе. Это объясняется, по-видимому, стабилизирующей ролью атомов углерода на поверхности соединения PdO<sub>v</sub>.

Результаты по концентрации атомов в поверхностном слое Pd/PdO были получены методом резерфордовского обратного рассеяния альфачастиц с энергией  $E_{\alpha} = 2.2$  МэВ (см. Рисунок 6). Видно, что эффективная толщина слоя PdO составляет около 50 нм. В этом же слое концентрируются и атомы углерода.



Рисунок 6. Профиль концентрации атомов в поверхностном слое Pd/PdO, полученный методом резерфордовского обратного рассеяния альфа-частиц с энергией  $E_{\alpha} = 2.2$  МэВ (слева). Фотография изготовленной мишени Pd/PdO:D<sub>x</sub> (справа).

Образцы Pd/PdO:D<sub>x</sub> размером 2,5×1 см<sup>2</sup> готовились путем термического окисления Pd фольги (99,95 % чистоты, толщиной 50 мкм) по методике, описанной выше. В результате на поверхности фольги окисная плёнка PdO толщиной ~ 50 нм. Затем образцы образуется насыщались дейтерием с помощью электролиза в 0.3М растворе LiOD в  $D_2O$  с Pt анодом при плотности тока j = 10 мA/см<sup>2</sup> и температуре ~ 279 К в ячейке с разделенными катодным и анодным пространствами. После 40 мин. насыщения дейтерием до степени x = D/Pd ~ 0.73 образцы промывались В тяжёлой воде, охлаждались жидким азотом до температуры Т =77 К, в течение 1 мин устанавливались в держатель, CR-39, напротив закрепленных детекторов И помещались В экспериментальную вакуумную камеру для последующих исследований. Охлаждение образца до температуры жидкого азота необходимо для замедления выхода дейтерия, чтобы исследовать влияние ионизирующего излучения на процесс десорбции.

#### 4.1.2. Изготовление мишеней на основе гетероструктур Ті

Образцы Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> размером  $3x1 \text{ cm}^2$  были изготовлены из титановой фольги, толщиной 30, 55 и 300 мкм и окисным слоем TiO<sub>2</sub> ~ 100-150 нм, путем электролитического насыщения дейтерием из 0.3 M раствора D<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в D<sub>2</sub>O при плотности тока 30 мA/см<sup>2</sup> в ячейке с разделенными катодным и анодным пространствами. Образцы использовались в качестве катода (анод – Pt). Последующее взвешивание показало, что за время электролиза в течение 24 часов в каждый образец входило в среднем 0.25 мг дейтерия. Это обеспечивало среднюю степень насыщения x = D/Ti = 0.1 на глубину до 1 мкм.

Исследование профиля концентрации атомов в Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> до и после проводилось облучения электронами методом резерфордовского обратного рассеяния альфа-частиц с энергией  $E_{\alpha} = 2.2$  МэВ (см. Рисунок 7). насыщения дейтерием Видно. что после его максимальная концентрация достигается в тонком поверхностном слое 100-150 нм, сравнимым по величине со слоем TiO<sub>2</sub>.

Следует отметить, что образцы  $Ti/TiO_2:D_x$  остаются практически стабильными при температуре T = 300 К, и они могут быть насыщены дейтерием задолго до облучения.



Рисунок 7. Профили концентрации атомов в поверхностном слое  $Ti/TiO_2:D_x$ , полученный методом резерфордовского обратного рассеяния альфа-частиц с энергией  $E_{\alpha} = 2.2$  МэВ(слева). Фотография изготовленной мишени  $Ti/TiO_2:D_x$  (справа).

#### 4.1.3. Изготовление мишеней на основе CVD-алмаза и карбала

Образцы CVD-алмаза диаметром 20 мм и толщиной 300 мкм были изготовлены по следующей технологии.

Выращивание пластин поликристаллического алмаза проводили в специализированном плазмохимическом реакторе с СВЧ разрядом УПСА-100 (частота 2,45 ГГц, СВЧ мощность до 5 кВт).

В качестве подложек использовали полированные с одной стороны пластины кремния толщиной 3 мм и диаметром 57 мм. Процесс роста проводили в смесях в смесях CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> при следующих параметрах:

- СВЧ мощность 3,3 кВт;

- давление в камере 90 Торр;

- температура подложки 920°С;

- общий расход газа 0,5 л/мин;

- концентрация метана 10% (в смесях CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>), концентрация кислорода 0,9%.

Некоторые сведения о процессе синтеза алмаза на установке УПСА-100 приведены в работе [52].

В выбранных условиях синтезируемые алмазные пленки имеют черный цвет из-за многочисленных структурных дефектов в кристаллитах, таких как двойники и аморфизованные области размером порядка 1 нм. [52]. В литературе для подобного материала принято обозначение black diamond. Толщина выращенной пластины «черного» алмаза составила 400 мкм (Рисунок 8).



Рисунок 8. Фотография выращенной алмазной пленки на подложке кремния диаметром 57 мм (слева). Фотография изготовленной мишени из CVD-алмаза без кремниевой подложки (справа).

Алмазная пленка была отделена от подложки травлением кремния в смеси плавиковой, азотной и уксусной кислот. Алмаз стоек в этих кислотах, тогда как подложка кремния полностью стравливалась. Далее из освобожденной от подложки алмазной пластины лазером Nd:YAG (импульсы длительностью около 10 нм, частота повторения 10 кГц) были вырезаны пластины диаметром 18 мм.

Для удаления графита, образующегося на торце алмазного диска в процессе резки проводили окисление диска проводили в воздушной среде в электропечи «Стоматерм С-90» при температурах 500-650°С в течении 30-60 мин. В этих условиях графит удалялся избирательно (переходя в CO<sub>2</sub>), а полиалмаз еще не подвергался травлению.

Структура полиалмаза существенно неоднородна и анизотропна (Рисунок 9) Кристаллиты растут в виде колонн, ориентированных перпендикулярно поверхности, причем с увеличением толщины пленки «диаметр» колонн увеличивается. Размеров кристаллитов возрастают от ~1 мкм в сильно дефектном слое вблизи подложки до десятков и даже сотен микрометров на противоположной, более совершенной ростовой стороне.



Рисунок 9. Строение поликристаллической алмазной пленки в поперечном сечении.

Основные примеси в черном CVD алмазе:

- водород (наблюдается по колебаниям С-Н в ИК спектрах поглощения в области 2700-2900 см<sup>-1</sup>). Концентрация С-Н связей может составлять порядка 1000 ppm;

- азот, концентрация порядка 10-20 ppm;

- кремний (в основном содержится в слое, примыкающем к подложке, концентрация на уровне1-10 ppm.

Карбал - композиционный материал, полностью состоящий из углерода, включающего алмазные частицы размером 3 – 5 мкм и графитоподобный углерод. Содержание последнего составляет 10 мас.%. Этот материал использовался для создания полевых электронных эммитеров [53].

Для получения мишени в экспериментах на ГЕЛИСе использовался порошок синтетического алмаза с размером частиц от 3 до 5 мкм (ACM 5/3 по ГОСТ 9206 – 80). Порошок алмаза смешивался с временным связующим (25% спиртовой раствор фенольной смолы) в количестве 4 % от массы алмаза. Полученную смесь формовали путем прессования в пресс-форме. Сформированную заготовку выдерживали при температуре 160°С в течение 3

часов для отвержения временного связующего. Затем заготовку помещали в кварцевый реактор и обрабатывали при температуре 850°C в среде природного газа до изменения содержания массы графитоподобного углерода на 11% от массы алмазного порошка в заготовке. Протекание образования графитоподобного углерода всем объеме процесса BO алмазосодержащей заготовки обеспечивает получение однородного по составу (алмаз + графитоподобный углерод) материала изделия. Полученный таким образом диск Ø 20 мм и толщиной 1.4 мм выполнен из композиционного материала, полностью состоящего ИЗ углерода, включающего алмазные частицы размером 3 – 5 мкм и графитоподобный углерод. Содержание последнего составляет 10 мас.%.

Насыщение образцов CVD алмаза и карбала дейтерием проводилось путем электролиза в 0.3М растворе LiOD в  $D_2O$  с Pt анодом. Образцы использовались в качестве катода. Условия электролиза: напряжение - 50 В, плотность тока - 20-30 мА/см<sup>2</sup>. Измерения по току электролиза и по приращению массы образца показали, что в образцы CVD алмаза и карбала за время электролиза входило до ~10<sup>20</sup> атомов дейтерия.

# 4.2. Работы по адаптации узлов установок ЭРГ, ГЕЛИС и С-25Р к работе с исследуемыми мишенями 4.2.1. Работы по адаптации узлов установки ГЕЛИС к работе с исследуемыми мишенями

С целью адаптации узлов установки ГЕЛИС к работам по стимулированию ядерных реакций была произведена замена камеры экспонирования мишеней. Вместо камеры длиной 150 см были установлены 2 камеры длиной 50 см. В ближайшую к ионному источнику камеру было установлено поворотное устройство с охлаждаемым водой держателем мишеней (Рисунок 10), на котором монтировались твердотельные мишени совместно с системой крепления детекторов CR-39. Поворотное устройство,

на котором крепится держатель, позволяет в процессе облучения изменять угол, под которым ионный пучок бомбардирует мишень, что позволило провести измерения зависимости выходов нейтронов DD-реакции из образцов CVD алмаза, графита и карбала (композиционный материал, полностью состоящий из углерода) от угла падения пучка на мишень.



Рисунок 10. Фотография поворотного устройства с охлаждаемым водой держателем мишеней.

### 4.2.2. Работы по адаптации узлов установки ЭРГ к работе с трековыми детекторами и мишенями

Основной нагрузочной частью установки ЭРГ является атмосферный разрядный промежуток, который включает в себя: 1) проходной коаксиальный изолятор на 3 MB, 2) катодный узел с фланцем для монтажа сменных катодных сборок; 3) анодный узел со сменными анодными сборками и встроенными датчиками электрофизических измерений (шунт, коллектор); 4) Цилиндрический обратный токопровод-обечайка (см. Рисунок 11).



Рисунок 11. Установка ЭРГ: 1– маслонаполненный ГИН Аркадьева-Маркса, 2 –переходная секция, 3 – секция изолятора, 4 – обечайки воздушной секции (показаны прозрачными), 5 – проходной изолятор масло-воздух, 6 – анодная электродная система, 7 – катодная электродная система, 8 – основной разрядный промежуток.

Были проведены следующие работы по адаптации узлов уникальной установки ЭРГ к работе по теме. Для катодного и анодного узлов были изготовлены несколько вариантов полостных электродных сборок. Сменные электроды из разных материалов (медь, алюминий, сталь) с обращенными в разрядный промежуток радиусами скруглений от 10 до 125 мм моделировали различные варианты распределения электрического поля по разрядному промежутку (Рисунок 12). Полости в сборках позволяли размещать различные варианты компоновок трековых детекторов (с пластинчатым ПЭ тетраборатом радиатором, С натрия В глицериновом замедлителе) близко от области взаимодействия максимально канала разряда с поверхностью электрода. Для оценки влияния пучков заряженных частиц применялись также «полупрозрачные» – закрытые сеткой или тонкой фольгой – приосевые области электродов. Заземленный (анодный) узел изготовлен таким образом, чтобы была возможность продувать вдоль оси водо-воздушную капельную смесь с расходом 1–200 л/мин. Для катодного

узла были изготовлены варианты с держателем острийных катодов. При этом обеспечивалось плавное изменение электрического поля в окрестности иглы за счет дополнительного катода в виде обращенного конуса диаметром 25 см. Конструкция разрядного промежутка позволяет изменять среднюю напряженность поля (~1 МВ/м) и длину области поля выше порога убегания электронов за счет изменения межэлектродного расстояния, с помощью сменных сегментов и цангового механизма плавной подачи.



Рисунок 12. Распределения напряженности поля для различных вариантов электродов (1 MB).

#### 4.2.3 Работы по адаптации узлов установки C-25P к работе с исследуемыми мишенями

Для выполнения работ, предусмотренных госконтрактом, был выбран связанный c существенной перестройкой вариант, не установки. Электронный тракт, соединяющий микротрон-инжектор с ускорительным кольцом синхротрона, был частично разобран, и туда (после отсекающего вакуумного затвора) была вставлена мишенная станция, оборудованная устройством передвижения И фиксирования мишени. Рождающиеся нейтроны регистрировались нейтронным счетчиком, расположенным вверху на расстоянии 165 см. К станции снизу крепился вакуумный тракт для совпадение Дейтерировнная регистрируемых на протонов. мишень устанавливалась в вакууме внутри мишенной станции. Схема установки показана на Рис. 13, где использованы следующие обозначения:

1 — вакуум-провод высокого вакуума (10<sup>-6</sup> - 10<sup>-7</sup>) системы вывода электронного пучка из микротрона;

2 — квадрупольные магнитные линзы магнито-оптической системы
 (МОС) вывода и транспортировки пучка;

3 — поворотный магнит МОС;

4 — вентили высокого вакуума выбора рабочего канала микротрона;

5 — вакуумная камера мишенной станции установки;

6 — электромеханический блок перемещения рамки мишени;

7 — плечо протонного детектора в блоке свинцовой защиты;

8 — проекция (полупрозрачная) на горизонтальную плоскость блока свинцовой защиты и детектора нейтронного плеча установки;

9 — форвакуумный пост экспериментальной установки;

10 — вакуумная заглушка канала (Al 100 мкм);

11 — мониторный детектор электронного пучка микротрона.



Рисунок 13. Схема экспериментальной установки и необходимого вспомогательного оборудования.

Реальное исполнение установки показано на Рис. 14 -19.



Рисунок 14. Общий вид электронного тракта, ведущего от микротронаинжектора к мишенной станции. В нижней части фотографии виден снятый элемент тракта (с магнитной линзой), ведущего к кольцу синхротрона.



Рисунок 15. Монтаж мишенной станции на новом канале электронного пучка.



Рисунок 16. Нижняя часть экспериментальной установки в сборе. Виден горизонтальный электронный тракт; идущий вниз вакуумный тракт для регистрируемых протонов (в магнитном поле постоянных магнитов); свинцовая защита протонного детектора.



Рисунок 17. Общий вид установки вместе с нейтронным счетчиком (наверху).



Рисунок 18. Вскрытая мишенная станция с алюминиевой мишенью внутри.



Рисунок 19. Дейтерированная мишень на рамке, устанавливаемой внутрь мишенной станции. Сбоку от мишени в фольге установлены два трековых детектора CR-39.

## 4.3. Калибровка детекторов с помощью источников и продуктов DDреакции на установке ГЕЛИС

#### 4.3.1. Калибровка детекторов Не-3 установки ГЕЛИС

Для калибровки He-3 детектора использовался источник нейтронов Cf-252 с активностью 3  $10^4$  n/c в телесный угол  $4\pi$ , который помещался на место мишени.

Первая группа счетчиков (с радиаторами 5 см парафина и 3 см оргстекла) Не-3 детектора в положении 1 (R1 = 85 см) показала эффективность регистрации нейтронов  $\eta_{n1} = 0.13$  %. Вторая группа счетчиков (с радиатором 3 см оргстекла) Не-3 детектора в положении 2 (R2 = 38 см) показала эффективность регистрации нейтронов  $\eta_{n2} = 0.13$  %.

#### 4.3.2. Калибровка трековых детекторов

Калибровка детектора CR-39 была проведена с помощью протонного пучка ускорителя Ван-де-Граафа ( $E_p = 0.75 - 3.0$  МэВ), стандартных  $\alpha$ -источников ( $E_{\alpha} = 2 - 7.7$  МэВ) и пучка циклотрона ( $E_{\alpha} = 8 - 30$  МэВ) в НИИЯФ МГУ. После облучения детекторы травились в растворе 6М NaOH в H<sub>2</sub>O при 70°C в течение 7 ч. Измерение диаметров треков частиц проведено с помощью оптического микроскопа МБИ-9. На Рисунке 20 представлены результаты калибровки, т.е. зависимости диаметров треков протонов и  $\alpha$ -частиц от их энергии.



Рисунок 20. Зависимости диаметров треков α-частиц и протонов от их энергии. Трековый детектор CR-39 травился 7 ч в растворе NaOH в H<sub>2</sub>O при 70°C.

Измерения с источником Pu-239, помещенным на место образца показали, что детекторы 1 и 2 расположенные над образцом имеют эффективность детектирования заряженных частиц  $\eta_p = 0.026$ .

Облучение трекового детектора CR-39 нейтронами проводилось с помощью источника  $^{252}$ Cf с активностью 3 10<sup>4</sup> n/с в телесный угол 4 $\pi$  ср. Использовался детектор с радиатором 120 мкм полиэтилена.

Быстрые нейтроны от источника испытывают упругое рассеяние на атомах водорода в радиаторе и в самом детекторе, при этом образуются протоны отдачи, которые регистрируются детектором. Калибровочные измерения показали, что диаметры треков протонов отдачи после 7 ч травления детектора в 6М NaOH при t = 70 °C, расположены в диапазоне

4 – 8 мкм (см. рис. 21). Для построения распределений отбирались треки протонов круглой формы с углом падения близким к нормали. Средняя эффективность регистрации быстрых нейтронов трековым детектором оказалась равной  $\eta_{n1} = 6 \ 10^{-5}$ .



Рисунок 21. Распределения диаметров треков протонов отдачи после облучения трекового детектора CR-39 нейтронами от источника Cf-252. Трековый детектор CR-39 травился 7 ч в растворе NaOH в H<sub>2</sub>O при 70°C.

Для регистрации тепловых нейтронов детекторы CR-39 помещались в 20% раствор тетрабората Na в глицерине. Регистрация тепловых нейтронов по реакции

$${}^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow {}^{7}\text{Li} (0.8 \text{ M} \Rightarrow \text{B}) + {}^{4}\text{He} (2 \text{ M} \Rightarrow \text{B})$$
(9)

проводилось путем подсчета треков альфа-частиц с  $E_{\alpha} \leq 2$  МэВ, которые имеют диаметры 10 – 12 мкм. Средняя эффективность регистрации тепловых нейтронов трековым детектором, по реакции (1), оказалась равной  $\eta_{n2} = 1.4$   $10^{-6}$ .

Регистрация быстрых нейтронов с энергией E<sub>n</sub> >10 МэВ проводилась по реакции

$$^{12}C + n \rightarrow 3\alpha + n, \qquad (10)$$

которая имеет порог около 10 МэВ.

Характерная картина распада ядра  ${}^{12}$ C – три альфа-частицы, треки которых исходят из одной точки. Средняя эффективность регистрации быстрых нейтронов с энергией  $E_n > 10$  МэВ по реакции (2) трековым детектором с РЕ радиатором 120 мкм оказалась равной  $\eta_{n3} = 1.2 \ 10^{-6}$ .

### 4.3.3. Калибровка сцинтилляционных детекторов источником <sup>252</sup>Cf

Использовались пластические сцинтилляторы на основе полистирола с добавкой РОРОР, чувствительные к быстрым нейтронам, калибровались на собственную эффективность для разных энергий нейтронов с помощью источника <sup>252</sup>Cf (диапазон энергий 0–12.6 МэВ, с максимумом на 1.2 МэВ) и по DD-реакции в установке ГЕЛИС (2.45 МэВ). Схема калибровки сцинтилляционного детектора представлена на Рисунке 22.



Рисунок 22. Схема калибровки сцинтилляционного детектора источником <sup>252</sup>Cf: 1 – полистирол с РОРОР, 2 – световод на оптическом контакте, 3 – ФЭУ-30, 4 – Изотопный источник нейтронов <sup>252</sup>Cf в свинцовом цилиндрическом контейнере диаметром 4 см.



Рисунок 23. Калибровочные кривые скорости счета сцинтилляционного детектора в зависимости от расстояния от источника <sup>252</sup>Cf до рабочей грани сцинтиллятора: 1 – открытый сцинтиллятор, 2 – сцинтиллятор за свинцовой стенкой толщиной 10 см, bg – уровень фонового счета.

В случае максимального приближения контейнера с источником к центру лицевой грани сцинтиллятора, под поток нейтронов попадает сцинтиллятор в телесном угле примерно  $2\pi$ \*0,7 ср.

Тогда собственная эффективность детектора (intrinsic efficiency)  $\eta_{int}$  к быстрым нейтронам, измеренная с помощью источника <sup>252</sup>Cf, определяется отношением числа импульсов ФЭУ  $n_{pmt}$  к общему числу попавших в сцинтиллятор нейтронов  $n_{ins}$ :

$$\eta_{\text{int}} = n_{\text{pmt}} / n_{\text{ins}} = n_{\text{pmt}} / (n_{\text{o}} \cdot 2\pi^* 0, 7/(4\pi)) = (1900 - 125_{\phi_{\text{OH}}}) / (n_{\text{o}} \cdot 0, 35) =$$

$$= 1, 7 \cdot 10^{-3} / (3 \cdot 10^4 \cdot 0, 35) = 0, 17.$$
(11)

Как видно из Рисунка 23, свинец, применяющийся для защиты от рентгеновского и гамма излучения, существенно ослабляет поток быстрых нейтронов, так как имеет для них достаточно высокое сечение неупругого рассеяния. Пространственное распределение плотности потока нейтронов с хорошей степенью точности описывается экспоненциальной зависимостью

$$\varphi(d) = \varphi(0) \exp(-d/L), \tag{12}$$

где φ(0) – плотность потока или мощность дозы нейтронного облучения в точке детектирования при отсутствии защиты; L – длина релаксации нейтронов в среде, зависящая от энергии нейтронов, характеристик защиты и иных условий конкретной задачи; d – толщина защиты.

Для материалов с большими атомными номерами при энергиях нейтронов выше 2,3 МэВ сечение неупругого рассеяния слабо зависит от энергии. Данные для свинца приведены в Таблице 2.

Таблица 2. Длина релаксации плотности потока нейтронов.

Среда	<i>d</i> ,г/см <sup>2</sup>	Длина релаксации L (г/см <sup>2</sup> ) нейтронов с энергией МэВ				
		Более 0,33	Более 2	Более 3	Более 5	Более 7
	0-840	-	117	107	109	109
Свинец	11-565			<u>106</u>		<u>98,2*; 98,4*</u>

В случае барьера толщиной в X=10 см, ρ(Pb)=11,34 г/см<sup>3</sup>: d=ρ•X=113,4 г/см<sup>2</sup>. Тогда

$$\varphi(d) = \varphi(0) \exp(-113, 4/117...98, 2) = \varphi(0) \cdot 0,379...0,315.$$
(13)

Значит, в нашем случае происходит примерно трехкратное ослабление потока быстрых нейтронов за счет неупругого рассеяния в свинце.

На сцинтиллятор попадает, в предположении о точечном нейтронном источнике на аноде, только малая часть от излученного в 4π числа нейтронов. Для сцинтиллятора с гранью 150х150 мм<sup>2</sup>, обращенной к разряду и отстоящей от анода на расстояние 150 см геометрический фактор составляет:

$$S_{cumm}/S_{R=150cm} = 15^2/(4\pi \cdot 150^2) \approx 8 \cdot 10^{-4}.$$

(14)

Меньший размер 55 мм является толщиной, на которой происходит поглощение нейтронов, т.к. длина замедления МэВ-ного нейтрона до тепловой энергии ~5 см.

Анализ импульсов сцинтилляционных детекторов производится с учетом собственной эффективности детектора, геометрического фактора и неупругого поглощения в свинце. Например, амплитуда регистрируемого импульса ~20 В соответствует ~10<sup>6</sup> нейтронов с энергией 1.2 МэВ в одном выстреле в  $4\pi$  ср; ~  $4 \times 10^5$  нейтронов с энергией 2.5 МэВ, ~10<sup>5</sup> нейтронов с энергией 10 МэВ и т.д.

## 4.3.4. Калибровка сцинтилляционных детекторов нейтронами DDреакции на установке ГЕЛИС

Непрерывный режим работы установки ГЕЛИС позволяет прокалибровать сцинтилляционный детектор в счетном режиме, с регистрацией импульсов отдельных нейтронов известной энергии.

Регистрация нейтронов производилась в двух точках. В обоих случаях детектор располагался снаружи установки. В первой точке детектор располагался сбоку установки вплотную к фланцу, наиболее близко расположенному к области генерации DD нейтронов – мишени. Расстояние от центра области генерации нейтронов до поверхности сцинтиллятора составляла 55 см. Во второй точке детектор располагался вплотную к фланцу, расположенному в торце установки. Расстояние от центра области генерации нейтронов до поверхности генерации нейтронов до поверхности сцинтиллятора составляла 55 см. Во второй точке детектор располагался вплотную к фланцу, расположенному в торце установки. Расстояние от центра области генерации нейтронов до поверхности сцинтиллятора составляло 100 см. Угол между линиями источник-детектор в первом и во втором случаях составляет 90°.



Рисунок 24. Скорость счета на разных расстояниях в зависимости от порога триггера.

Квадратичная зависимость эффекта от расстояния (см. Рисунок 24) выполняется для импульсов с амплитудой с порогом выше 2 В. Увеличению скорости счета в 3,4 раза соответствует изменение расстояния в  $(100/55)\approx1.82$  раз  $(1.82^2\approx3.3)$  при уровне порога триггера осциллографа 2 В. Тогда как по уровню 3 В – зависимости почти нет, т.е. счет естественный фоновый. При пороге 1 В происходит насыщение счета. Исходя из калибровки сцинтилляционных детекторов по источнику <sup>252</sup>Cf, с которым нейтрон с наиболее вероятной энергией порядка 1 МэВ дает импульсы амплитудой от 500 мВ до 1 В, генерируемые в установке ГЕЛИС нейтроны имеют энергии в диапазоне 2-4 МэВ. Данный интервал хорошо согласуется с энергией DD-нейтронов (2.45 МэВ).

Собственная эффективность регистрации DD-нейтронов, оцененная по потоку DD-нейтронов  $\sim 10^4$  в  $4\pi$  установки ГЕЛИС и скорости счета по уровню, эквивалентному 2.45 МэВ (см. Рисунок 24), определена как

 $\eta_{int} = n_{pmt}/n_{ins} = n_{pmt}/(n_o \cdot 6 \cdot 10^{-3}) = (45 - 32_{\varphi_{OH}}) / (n_o \cdot 6 \cdot 10^{-3}) = 13/(10^4 \cdot 6 \cdot 10^{-3}) = 0,22.$ 

Собственная эффективность сцинтилляционного детектора к DDнейтронам на ~30% выше, чем к нейтронам наиболее вероятной энергии источника <sup>252</sup>Cf, что может объясняться большей эффективностью сцинтилляции из-за двукратной разницы по энергии.

### 4.4. Проведение тестовых измерений выходов ядерных реакций на установке C-25P

Тестирование нейтронных счетчиков выполнялось на космических лучах, а также на нейтронном источнике Cf-252, имеющим на момент испытаний интенсивность около  $2x10^4$  сек<sup>-1</sup>. На Рис. 25 показан амплитудный спектр сигналов от сборки нейтронных счетчиков 9x9x10 см<sup>3</sup> с двумя ФЭУ-85. На этом спектре виден большой пик, который появляется при приближении нейтронного источника к счетчикам, а также широкий пик от космических луч с максимумом в канале ~260.. Моделирование по GEANT показало, что максимум в этом канале соответствует энерговыделению космических мюонов в объеме детектора ~18 МэВ.



Рисунок 25. Панель вверху: амплитудный спектр от ФЭУ-85 нейтронного счетчика во время тестовых измерений. Пик слева – от источника Cf-252, расположенного рядом. Широкое распределении справа – от космических мюонов. Панель внизу: то же при удалении источника на 1.5 м.

Аналогичное тестирование проводилось при инсталляции сборки нейтронных счетчиков в свинцовую защиту над мишенной станцией, которое подтвердило чувствительность всех слоев сборки к нейтронным потокам.

Для тестирования способности установки регистрировать протоннейтронные совпадения были произведены измерения скорости регистрации совпадения сигналов от нейтронного и протонного плеч. В отсутствие мишени эта скорость была пренебрежимо мала, что доказывает достаточную степень защиты счетчиков от фонов, которые создает микротрон и гало электронного пучка. Затем измерения были выполнены с установленной дейтерированной углеродной мишенью (C:D<sub>x</sub>). Полученное распределение числа совпадений сигналов *n* и *p* плеч, регистрируемых установкой за 10 сек при токе пучка 5 мкА, показано на Рис. 26. Средняя скорость счета совпадений составляет ~44 события за 10 секунд, или ~4 события в секунду, что качественно соответствует теоретически ожидаемой скорости счета.



Рисунок 26. Распределение числа совпадений сигналов *n* и *p* плеч, регистрируемых с углеродной дейтерированной мишенью в течение 20 секунд.

Дополнительная с мишенью C:D<sub>x</sub> была изучена временная корреляции регистрируемых частиц в *n* и *p* плечах установки. Для этого в электронные каналы плеч вводились дополнительные задержки  $\tau_n$  и  $\tau_p$  и определялась зависимость скорости счета совпадений – при фиксированном размере временного окна схемы совпадений 10 нс – от разности  $\tau = \tau_p - \tau_n$ . Эта зависимость, измеренная с шагом 32 нс, показана на Рис. 27. Наблюдаемый максимум при  $\tau$  около 40-50 нс примерно соответствует теоретической разности времени пролета нейтронного и протонного плеча нуклонами с энергией около 1 МэВ, приведенной в разделе 3.3, что служит косвенным доказательством действительного наблюдения на созданной установке вылета *пр* пар.



Рисунок 27. Зависимость скорости счета совпадений в n- и p-плечах установки от дополнительной относительной задержки  $\tau = \tau_p - \tau_n$  для мишени C:D<sub>x</sub>.

#### 5. Создание нейтронного детектора для время-пролетных измерений

В фона идентификация условиях сильного электромагнитного нейтронов, рождающихся преимущественно в реакции электрорасщепления дейтрона ( $ed \rightarrow enp$ ), с помощью сцинтилляционных счетчиков становится возможной лишь при условии совпадения сигнала от нейтрона с иной временной меткой, в качестве которой была выбрана регистрация протона. Поэтому созданный нейтронный детектор для время-пролетных измерений фактически представляет собой физическую установку, состоящую из вакуумированной мишенной станции, собственно нейтронного плеча (нейтронного счетчика), стартового протонного плеча (протонного счетчика), защиты от электромагнитных фонов (гамма-квантов и электронов) - свинец и отклоняющее магнитное поле, а также электронной системы сбора и он-лайн обработки информации. На рисунках 28 – 38 показаны схемы этих основных элементов установки.

#### Мишенная станция



Рисунок 28. Мишенная станция - частичный разрез вакуумной камеры, навстречу пучку.



Рисунок 29. Мишенная станция - частичный разрез вакуумной камеры, справа.



Рисунок 30. Реальный вид мишенной станции.

### Протонный счетчик



Рисунок 31. Структура протонного счетчика (в установке он стоит в перевернутом на 180° положении – окном вверх):

1 - пластический сцинтиллятор протонного счетчика;

2 — слой зеркального (Ag) напылённого покрытия на внешнюю поверхность пластика толщиной ~ 1 мкм;

3 — фланцы вакуумной системы;

4 — цилиндрические световоды прямого света;

5 — ФЭУ-85 (4 шт.);

- 6 делители ФЭУ;
- 7 светоизолирующий кожух счетчика.

### Протонное плечо установки



Рисунок 32. Состав протонного плеча установки:

1 — протонный счетчик;

2 — составной вакуумпровод протонного плеча с гибкими (сильфоны) и жёстким элементами;

3 — магнитная система протонного плеча - постоянные

очистительные-анализирующие магниты;



Рисунок 33. Реальный вид гибкого (набранного из сильфонов) протонного плеча до и после установки очистных постоянных магнитов.

#### Нейтронный счетчик



Рисунок 34. Конфигурация установки для исследования временных характеристик прототипа нейтронного счетчика, 1 и 3 - стартовый и мониторный счетчики заряженных частиц, 2 - нейтронный счётчик.

Создание нейтронного счетчика началось с исследования свойств 8 представляющего собой сборку прототипа, ИЗ пластиковых светоизолированных пластин размера 80x10x1 см<sup>3</sup>, просматриваемую 8 фотоумножителями (ФЭУ-115 или ФЭУ-85) - см. Рис. 34. На этой сборке исследовались временные и координатные разрешения нейтронного лучей. Для счетчика, используя заряженные мюоны космических небольшие исследования временных характеристик использовались стартовый (1) и мониторный (3) счётчики.

Временное разрешение, даваемое такой сборкой в оптимальной (выбранной из нескольких возможных) конфигурации и измеренное на космических лучах, иллюстрируется Рис. 35. На нем показано распределение полусуммы времен поступления на ВЦП сигналов от стартового и мониторного счетчиков. Ширина (FWHM) этого распределения оказалась 0.8 нс.



Рисунок 35. Типичная конфигурация калибровки нейтронного счетчика и получаемого временного разрешения.

Для дальнейшей работы применялся аналогичный счетчик меньших размеров (в сборке – 9х9х10 см<sup>3</sup>) с ФЭУ-85, показанный на Рис. 36. Такой счетчик легче экранировать от фоновых излучений.



Рисунок 36. Одиночный нейтронный счётчик и сборка 4-х нейтронных счетчиков.
## Нейтронное плечо установки



Рисунок 37. Счетчики нейтронного плеча:

- 1 счетчики,
- 2 свинцовая оболочка (защита),
- 3 входная апертура нейтронного плеча.

## Схема установки



Рисунок 38. Схема установки в проекции на вертикальную плоскость, проходящую через центр мишени: 1 — нейтронный счетчик, 2 — свинцовая оболочка, 3 — деревянная подставка, 4 — вакуумная камера мишенной станции, 5 — протонное плечо установки, 6 — свинцовая оболочка протонного счетчика.

Создание описанного нейтронного детектора (установки) было зафиксировано специальным актом, входящим в состав отчетной документации.

### 6. Проведение исследований с использованием УСУ

# 6.1. Исследование стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком ионов инертных газов

# 6.1.1. Измерение выходов DD-реакции из мишени Pd/PdO:D<sub>x</sub> при облучении пучком Ne<sup>+</sup>

Исследовалась возможность стимулирования выходов DD-реакций из гетероструктуры Pd/PdO:D<sub>x</sub> пучком ионов Ne<sup>+</sup> в диапазоне энергий 10 – 20 кэВ на установке ГЕЛИС.

Измерялись потоки нейтронов (продуктов DD-реакций) с помощью нейтронного детектора на основе He-3.

На рис.39 показаны результаты измерения потока нейтронов детектором He-3 при воздействии пучка Ne<sup>+</sup> с энергией 10, 15 и 20 кэВ на мишень Pd/PdO:D<sub>x</sub>. Фоновые измерения проводились с аналогичными пучками на мишени Cu. Из рис.39 видно, что при воздействии пучка на мишень Pd/PdO:D<sub>x</sub> наблюдается превышение показаний нейтронного детектора над фоновыми значениями. Средний поток нейтронов испущенных из мишени в направлении пучка за время облучения зарегистрирован детектором He-3 на уровне  $\langle n_n \rangle = (3.2 \pm 0.4) 10^2 c^{-1}$ .



Рисунок 39. Счет нейтронного детектора He-3 ( $\blacksquare$ ). Мишень – Pd/PdO:D<sub>x</sub> 50 мкм, пучок - Ne<sup>+</sup> (10, 15, 20 кэВ). Средний фон ( $\bullet$ ) измерен с мишенью Си.

Для расчета выхода DD-реакции из мишени при облучении пучком ионов использовалась методика расчета, описанная в [34].

Чтобы оценить выходы DD-реакции из мишеней Pd/PdO: $D_x$  при облучении пучком ионов, мы использовали упрощенную модель процесса, принимая во внимание, что десорбция дейтерия, стимулированная излучением, приводит к току дейтронов, двигающихся к поверхности из образца. Такой ток дейтронов можно рассматривать как «пучок», а дейтерированную поверхность как «мишень».

Потенциал экранирования U<sub>e</sub> оценивался по полуэмпирической формуле [31]:

$$U_{e} = (T/T_{0})^{-1/2} [a \ln(y) + b]$$
(15)

где a = 145.3 и b=71.2 – численные константы и y = k×y<sub>0</sub>(J<sub>d</sub>/J<sub>0</sub>), (здесь k = exp(- $\epsilon_d \Delta T/k_B T T_0$ ),  $\epsilon_d = 0.086$  эВ – энергия активации дейтрона, y<sub>0</sub> = 6.7 Me/D – отношение концентраций атомов металла и дейтерия в мишени при T<sub>0</sub> = 290 K и J<sub>0</sub> = 0.03 mA/cm<sup>2</sup>), J<sub>d</sub> = 4.4 мA/см<sup>2</sup> – плотность тока дейтронов из мишени. Ток дейтронов определялся по скорости десорбции дейтерия из образца.

Потенциал экранирования для мишени Pd/PdO: $D_x$ , рассчитанный по формуле (1) оказался равен  $U_e = 897$  эВ.

Таким образом, впервые показано, что воздействие пучка ионов Ne<sup>+</sup> в диапазоне энергий 10 – 20 кэВ на дейтерированную гетероструктуру Pd/PdO:D<sub>x</sub> приводит к стимулированию выходов DD-реакции.

# 6.1.2. Измерение выходов DD-реакции из мишени Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> при облучении пучком Ne<sup>+</sup>

Облучение мишеней  $Ti/TiO_2:D_x$  пучком Ne<sup>+</sup> проводилось при энергиях 10, 15 и 20 кэВ. Фоновые измерения проводились с мишенями  $Ti/TiO_2:H_x$  и Cu. Измерения проводились трековыми детекторами CR-39 и нейтронным детектором на основе He-3 счетчиков.

При облучении мишени Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> толщиной 55 мкм пучком Ne<sup>+</sup> с энергией 10, 15 и 20 кэВ и током 0.02 – 0.2 мА, трековые детекторы расположенные над образцом показали эмиссию протонов с энергией 3 МэВ, испущенных из мишени против направления пучка на уровне  $n_p = 0.25 \text{ c}^{-1}$  (см. распределения на Рисунке 40). Детектор с покрытием 33 мкм Al, расположенный сзади образца зарегистрировал эмиссию нейтронов с энергией 2.45 МэВ, испущенных из мишени в направлении пучка на уровне  $n_n = 70 \text{ c}^{-1}$  (см. распределения на Рисунке 41). Фоновый образец Ti/TiO<sub>2</sub>:H<sub>x</sub> не показал при облучении какой либо протонной или нейтронной эмиссии.

Разница в потоках протонов и нейтронов объясняется тем, что DDреакции имели место в глубине мишени, и протоны с энергией 3 МэВ в В были В ней. тоже основном поглощены время нейтроны беспрепятственно вылетали из мишени И были зарегистрированы трековым детектором.

Увеличение числа треков на обратной стороне детектора по сравнению с передней (см. Рисунок 41) объясняется тем, что на передней стороне протоны отдачи образуются только в тонком стравленном слое детектора (9 мкм), а на обратной стороне детектируются протоны отдачи, образовавшиеся во всем детекторе.



Рисунок 40. Распределения диаметров треков на передней (темные столбцы) и задней (светлые столбцы) сторонах детекторов CR-39 с покрытием 11 мкм Al (а) и 25 мкм Cu (б), расположенных над образцом Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>, облученным пучком Ne<sup>+</sup> (10, 15, 20 кэВ).



Рисунок 41. Распределения диаметров треков на передней (темные столбцы) и задней (светлые столбцы) сторонах детектора с покрытием 33 мкм Al, расположенного под образцом, облученным пучком Ne<sup>+</sup> (10, 15, 20 кэВ). Образец Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> (a), фоновый образец Ti/TiO<sub>2</sub>:H<sub>x</sub> (б).

На Рисунке 42 показаны результаты измерения потока нейтронов детектором He-3 при воздействии пучка Ne<sup>+</sup> на мишень Ti/TiO:D<sub>x</sub>. Фоновые измерения проводились с аналогичными пучками на мишени Cu. Из Рисунка видно, что при воздействии пучка на мишень Ti/TiO:D<sub>x</sub> наблюдается превышение показаний нейтронного детектора над фоновыми значениями. Средний поток нейтронов испущенных из мишени в направлении пучка за время облучения зарегистрирован детектором He-3 на уровне  $\langle n_n \rangle = (1.7 \pm 0.4) 10^2 c^{-1}$ . Эта величина нейтронной эмиссии согласуется по порядку величины с потоком нейтронов, измеренным трековым детектором CR-39.



Рисунок 42. Счет нейтронного детектора He-3 (■). Мишень – Ti/TiO:D<sub>x</sub> 30 мкм пучок - Ne<sup>+</sup> (10, 15, 20 кэВ). Средний фон (●) измерен с мишенью Си.

Для расчета выхода DD-реакции из мишени Ti/TiO:D<sub>x</sub> при облучении пучком ионов использовалась методика расчета, описанная в [34].

Чтобы оценить выходы DD-реакции из мишеней  $Ti/TiO_2:D_x$  при облучении пучком ионов мы использовали упрощенную модель процесса, принимая во внимание, что десорбция дейтерия, стимулированная излучением, приводит к току дейтронов, двигающихся к поверхности из образца. Такой ток дейтронов можно рассматривать как «пучок», а дейтерированную поверхность как «мишень».

Потенциал экранирования U<sub>e</sub> оценивался по полуэмпирической формуле [31]:

$$U_{e} = (T/T_{0})^{-1/2} [a \ln(y) + b]$$
(16)

где a = 145.3 и b=71.2 – численные константы и y =  $k \times y_0(J_d/J_0)$ , (здесь k = exp(- $\epsilon_d \Delta T/k_B T T_0$ ),  $\epsilon_d = 0.04$  эВ – энергия активации дейтрона,  $y_0 = 10$  Me/D

– отношение концентраций атомов металла и дейтерия в мишени при  $T_0 = 290$  K и  $J_0 = 0.03$  mA/cm<sup>2</sup>),  $J_d = 1$  мA/cm<sup>2</sup> – плотность тока дейтронов из мишени. Ток дейтронов определялся по разности масс образца до и после облучения, поскольку скорость десорбции дейтерия из образца и определяет эту величину.

Потенциал экранирования для мишени  $Ti/TiO_2:D_x$ , рассчитанный по формуле (1) оказался равен U<sub>e</sub> = 796 эВ.

Таким образом, двумя независимыми методами (трековым детектором CR-39 и нейтронным детектором на основе He-3 счетчиков) впервые показано, что воздействие пучка ионов Ne<sup>+</sup> в диапазоне энергий 10 - 20 кэВ и токов 0.02 - 0.2 мА на дейтерированные гетероструктуры Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> и Pd/PdO:D<sub>x</sub> приводит к стимулированию в них выходов DD-реакции.

# 6.2. Исследование выходов ядерных реакций в образцах CVD-алмаза и углерода при их облучении пучком ионов дейтерия

Исследовалась зависимость выходов DD-реакций из образцов CVD алмаза, графита и карбала (технического углерода) от угла падения пучка на мишень на установке ГЕЛИС.

Измерялись потоки нейтронов (продуктов DD-реакций) направленных по пучку и поперек пучка ионов дейтерия с помощью нейтронного детектора на основе He-3 счетчиков. Относительный выход DD-реакции определялся по формуле

$$Y_{dd} = n_n / (S I_d) \tag{17}$$

где n<sub>n</sub> – поток нейтронов вдоль или поперек пучка, S – площадь мишени под пучком, I<sub>d</sub> – ток пучка ионов дейтерия.

На Рисунке 43 показана зависимость выхода нейтронов из образца CVD-алмаза от угла между пучком дейтронов и нормалью к плоскости мишени. Видно, что наблюдается значительное уменьшение выхода нейтронов при повороте мишени относительно пучка дейтронов. При нормальном падении пучка дейтронов на мишень выход нейтронов примерно в 3 раза больше, чем при угле поворота мишени  $\beta = \pm 45^{\circ}$ . Сильная зависимость выхода нейтронов от угла  $\beta$  может свидетельствовать о наличии узких каналов в образце CVD-алмаза, в которых сконцентрировано основное количество дейтерия попавшего туда в процессе электролиза. Большой выход нейтронов при  $\beta = 0^{\circ}$  может быть объяснен тем, что эффективный пробег ионов дейтерия в каналах значительно выше, чем в алмазе.



Рисунок 43. Зависимость выхода нейтронов из образца CVD-алмаза от угла между пучком дейтронов и нормалью к плоскости мишени (• - вдоль пучка, ● - поперек пучка). Энергия пучка – E<sub>d</sub> = 20 кэB, ток – 50-60 мкА.

На Рисунке 44 показана зависимость выхода нейтронов из образцов графита (а) и карбала (б) от угла между пучком дейтронов и нормалью к плоскости мишени. Видно, что наблюдается уменьшение выхода нейтронов при повороте мишени относительно пучка дейтронов. При нормальном падении пучка дейтронов на мишень выход нейтронов примерно в 2 раза больше, чем при угле поворота мишени  $\beta = \pm 45^{\circ}$ . Зависимость выхода нейтронов от угла  $\beta$  в образцах графита и карбала не такая сильная, как в образце CVD-алмаза, что может свидетельствовать о наличии широких каналов, в которых сконцентрировано основное количество дейтерия попавшего туда в процессе электролиза.

При исследовании выхода нейтронов (продуктов DD-реакций) из образцов CVD-алмаза и различных образцов углерода (графит, карбал) показано, что ориентация образца в пучке дейтронов оказывает влияние на величину выхода. Таким образом, показана возможность использования образцов CVD-алмаза для генерирования узконаправленных потоков нейтронов.



Рисунок 44. Зависимость выхода нейтронов из образцов графита (а) и карбала (б) от угла между пучком дейтронов и нормалью к плоскости мишени (• - вдоль пучка,• - поперек пучка). Энергия пучка –  $E_d = 25$  кэB, ток – 20 мкА.

# 6.3. Исследование стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком релятивистских электронов

На созданной установке при токе 5 мкА также облучались дейтерированные мишени  $Ti/TiO_2:D_x$  (толщиной 55 мкм), Pd/PdO:D<sub>x</sub> (толщиной 50 мкм) и – для сравнения – чистый титан Ti (той же толщины 55 мкм). Детектирование событий велось обеими плечами установки, а также двумя трековыми детекторами CR-39, установленными вблизи мишени.

Следует отметить, что трековые детекторы, по-видимому, оказались перегруженными потоками рассеянных электронов и сопровождающих их гамма-квантами, так что после травления они не смогли показать присутствие ожидаемых треков. Это обстоятельство следует учесть при планировании будущих экспериментов на установке.

Распределение числа совпадений сигналов *n* и *p* плеч, регистрируемых установкой за 10 сек при токе пучка 5 мкА, показано на Рис. 45 и 46 для всех трех исследуемых мишеней.



Рисунок 45. Распределение числа совпадений сигналов n и p плеч для чистого титана Ti/TiO<sub>2</sub> (панель слева) и дейтерированного Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> (панель справа).



Рисунок 46. Распределение числа совпадений сигналов *n* и *p* плеч для мишени Pd/PdO:D<sub>x</sub>.

Примечательна значительная разница в счете совпадений для чистого и дейтерированного титана, что является серьезным указанием на существенную роль присутствующего во второй мишени дейтерия.

Из сравнения двух распределений на Рис. 45, дающих среднюю скорость счета за 10 секунд ≈23 (фон) и ≈45 (фон плюс эффект), можно оценить полный поток нейтронов, стимулированный электронным пучком в дейтерированной мишени. Предполагая, что избыток счета целиком вызван вылетающими *пр* парами, имеющими теоретически ожидаемое угловое распределение ~sin<sup>2</sup>θ, используя телесный угол нейтронных счетчиков  $\Delta\Omega_n = 0.0028$  ср (площадь  $9x9cm^2$ , удаленная на расстояние 1.7м) и оценочные значения эффективности регистрации нейтронов и протонов  $\varepsilon_n \approx \varepsilon_p \approx 0.1$ , получаем, что полный выход *пр* пар в телесный угол  $4\pi$  составляет ~6x10<sup>5</sup> сек<sup>-1</sup>. Данное число должно рассматриваться как верхняя граница, потому что часть регистрируемых событий-совпадений может быть вызвана фоном электронов и гамма-квантов, преодолевающими зашиту. Более точные и определенные результаты, касающиеся идентификации регистрируемых

частиц, а также эффективностей регистрации частиц счетчиками, могут быть получены в будущем при продолжении исследований.

Аналогичную оценку можно получить и из данных на палладиевой мишени. Предполагая, что протоны низких энергий вылетают только из тонкого приповерхностного слоя вещества толщиной ~5 мкм, принимая относительную концентрацию дейтерия в этом слое 73%, находим, что поверхностная плотность дейтерия в этом слое равна ~ $2.5 \times 10^{19}$  см<sup>-2</sup>, что вдвое превышает поверхностную плотность дейтерия в дейтерированном титане (около  $1.2 \times 10^{19}$  см<sup>-2</sup>). Поэтому приблизительно вдвое более высокая скорость счета совпадения для дейтерированной палладиевой мишени (см. Рис. 46) вполне объясняется этой разницей в количестве дейтерия у поверхности вещества. Соответственно, полный поток нейтронов из дейтерированной палладиевой мишени также примерно вдвое больше и приблизительно равен  $10^6$  сек<sup>-1</sup>.

Исследования проводились на микротроне C-25P при энергии пучка электронов 7 МэВ и токе пучка 5 мкА. Использовались мишени CD<sub>x</sub>, Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>, Pd/PdO:D<sub>x</sub> и фоновая мишень Ti/TiO<sub>2</sub>. Измерялись и протонная нейтронная эмиссии от мишеней, стимулированные пучком электронов. Измерение проводилось с помощью нейтронного детектора для времяпролетных измерений.

Распределения количества отсчетов двойных совпадений протонного и нейтронного каналов время-пролетного нейтронного детектора за время 10 с во временном окне 10 нс ( $N_{np}$ ), измеренные с мишенями CD<sub>x</sub>, Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub>, Pd/PdO:D<sub>x</sub> и фоновой мишенью Ti/TiO<sub>2</sub>, приведены на Рисунке 47. Из распределений видно, средний счет детектора во время облучения дейтерированных мишеней в 2-4 раза превосходит счет с фоновой мишенью. С учетом эффективности детектирования нейтронов оцененной как  $\eta_{np} =$ , можно оценить поток нейтронов, испускаемый из мишени под действием пучка электронов. Эти данные приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Потоки нейтронов, испускаемые из различных мишений под действием пучка электронов.

		1				
Мишень,	толщина	Средний	счет	Количество	Средний	поток
(мкм)		совпадений,		дейтерия в мишени,	нейтронов	ИЗ
		< N <sub>np</sub> >, 1/10c		N <sub>d</sub> , cm <sup>-3</sup>	мишени.	
					$< n_{np}>, c^{-1} B 4$	π ср
CD <sub>x</sub> (1500)		45 ± 15		10 <sup>20</sup>		
Pd/PdO:D <sub>x</sub> (5	0)	84 ± 53		10 <sup>22</sup>		
Ti/TiO <sub>2</sub> :D <sub>x</sub> (5	5)	45 ± 20		10 <sup>19-20</sup>		
Ti/TiO <sub>2</sub> (55)		23 ± 12		0	-	



Рисунок 47. Распределения количества отсчетов двойных совпадений протонного и нейтронного детекторов за время 10 с во временном окне 10 нс  $(N_{np})$ , измеренные с мишенями  $CD_x$  (a), Pd/PdO:D<sub>x</sub> (б), Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> (в) и фоновой мишенью Ti/TiO<sub>2</sub> (г).

# 6.4. Измерение выходов продуктов ядерных реакций в процессе высоковольтного разряда и их зависимость от формы и материала электродов

# 6.4.1. Измерение выходов продуктов ядерных реакций в высоковольтном разряде на установке ЭРГ

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе ЭРГ, реконструированном для исследований высоковольтного разряда в воздухе [39]. Схема эксперимента приведена на Рисунке 41. Напряжение амплитудой до 1 МВ, формируемое в генераторе импульсных напряжений (ГИН) Аркадьева-Маркса с энергией 60 кДж, подается через проходной масловоздушный изолятор на дюралевый фланец со сменными электродами (катодами), и обеспечивает ток атмосферного разряда 10 – 15 кА. Диаметр внешнего цилиндрического токопровода заземленного ограничивает допустимое расстояние между катодом и анодом на уровне 1 м. Анодный фланец может перемещаться вдоль оси системы для плавного изменения зазора. Для анодов и катодов применялся один и тот же набор сменных электродов.

Электрофизические диагностики включали запись осциллограмм токов (анодный шунт, пояса Роговского), напряжения (активный и емкостной делители), азимутального магнитного поля (магнитные зонды) с полосой пропускания 200 МГц. Формирование каналов разряда контролировалось с помощью интегральной съемки в оптическом диапазоне с двух ракурсов.

Для регистрации интегрального потока нейтронов использовались трековые детекторы CR-39 производства японской фирмы Fukuvi Chemical Industry, нечувствительные к электромагнитным помехам. Трековые детекторы CR-39 располагались вблизи зоны разряда как показано на Рисунке 48.



Рисунок 48. Схема эксперимента. а) Схема установки с системами диагностики: 1, 2 – емкостный и активный делители, 3 – ввод высокого напряжения от ГИНа, 4, 13 – магнитные зонды, 5 – трековые детекторы, 6 – анодный шунт, 7 – пояс Роговского, 8,9 – интегральные фотокамеры, 10 – сцинтилляционные детекторы, 11 – детектор УФ излучения, 12 – ФЭУ на видимый свет, 14 – катод, 15 – анод, b) Схема расположения трековых детекторов CR-39 (детектор 1 расположен внутри анода, детектор 2 – внутри катода, детекторы 3, 4 и 5 размещены в воде, детекторы 6, 7, 8 – за стальным уголком на разных расстояниях разряда, фоновые детекторы OT располагались в ~10 м от зоны разряда).

Интегральные снимки разряда – лабораторной молнии – полученные с помощью камеры 9 показаны на Рисунке 49. Как и природе, просматриваются типичные для молний типы разрядных каналов: линейные, раздвоенные, ломанные, цепочечные и т.д.



Рисунок 49. Различные типы разрядных каналов в установке ЭРГ.

Первичные эксперименты с электродами различных радиусов скруглений и материалов поверхности (медь, алюминий, нержавеющая сталь) показали наличие генерации жестких излучений без сильно выраженной зависимости от радиуса и материала в доступном интервале величин. Средняя напряженность электрического поля во всем промежутке меняется менее чем на 30%. Изменение поля у электрода приводит к сдвигу по времени начального стримерообразования относительно фронта нарастания напряжения, с соответствующим временным сдвигом предымпульса тока. В случае большего радиуса скругления электрода канал разряда более свободен в выборе места привязки, и от выстрела к выстрелу произвольно «обегает» большую площадь. Взаимодействие канала разряда с материалом электрода

определяется пятном контакта, размер которого определяется полным током разряда и практически не зависит от диаметра электрода. Диаметр канала разряда у электрода (~2-3 мм) много меньше диаметра электродов. При материале размер электрода однородном почти не сказывается на результатах при небольшом общем числе выстрелов (вплоть до нескольких) сотен). Отмечен лишь больший разброс амплитуд регистрируемых излучений в случае больших радиусов электродов, при том же самом среднем уровне, характерном меньшим радиусам. Это может быть связано co стримерообразованием в более удаленных от оси разрядного промежутка областях, с меньшими полями и протяженностями полей выше некоторого порога. Гораздо больше проявляется собственная стохастичность генерации излучений от выстрела к выстрелу при постоянстве внешних условий. О сложной структуре самих каналов можно судить по Рисунку 42. Отсутствие сильной зависимости материала электрода, по-видимому, связано с тем, что основную роль в генерации излучений играет поверхностный слой/пленка абсорбированных из атмосферы веществ, в т.ч. воды. Поэтому были выбраны оптимальные совокупности свойств диаметры электродов 40-90 мм: большие обхода эффектов достаточного для наложения, но с удовлетворительным разбросом амплитуд излучений. Для количественных измерений плотности потока нейтронов результаты по нескольким близким сериям были объединены.

В серии разрядов из 180 выстрелов трековые детекторы CR-39, размещенные внутри сеточного электрода (анода) и сферического катода показали превышение над фоном. Распределения диаметров треков заряженных частиц на детекторах показаны на Рисунке 50. Для построения распределений отбирались треки круглой формы с углом падения близким к нормали. Так, например, детектор CR-39 с РЕ радиатором 120 мкм, размещенный внутри анода, показал превышение над фоном в ~5 раз в интервале диаметров треков протонов отдачи 4 – 6 мкм (Рисунок 50 а). При этом средний поток быстрых нейтронов в области детектора составил  $<n_n$ 

 $2 \times 10^5$  n/см<sup>2</sup> на выстрел. Аналогичный детектор, размещенный внутри катода, также показал превышение над фоном в интервале диаметров треков протонов отдачи 4 – 6 мкм (Рисунок 50 б). При этом средний поток быстрых нейтронов, оцененный по протонам отдачи, в области детектора составил  $< n_{n1} > = 2.4 \times 10^5 \text{ n/cm}^2$  на выстрел. Детектор внутри анода, помещенный в 20% раствор тетрабората Na в глицерине, в интервале диаметров треков альфачастиц (E<sub>a</sub> < 2 МэВ) 10 – 12 мкм также показал превышение над фоном (Рисунок 50 в). При этом средний поток тепловых нейтронов в области детектора, оцененный по реакции (1), составил  $< n_{n2} > = 6 \times 10^5 \text{ n/cm}^2$  за выстрел. На этом детекторе наблюдалось превышение над фоном и в интервале диаметров треков протонов отдачи 4 – 6 мкм. Сравнение измерений детекторов 1 и 3, регистрирующих тепловые нейтроны, показывает, что, несмотря на увеличение расстояния от зоны разряда, поток тепловых нейтронов на дальнем детекторе (Рисунок 50 г) больше, чем на ближнем (с меньшей толщиной замедлителя). Возможно, что в разряде первичными являются быстрые нейтроны, которые затем замедляются в воде до тепловых энергий.



Рисунок 50. Суммарные распределения диаметров треков: а) и б) – на детекторах с радиаторами из 120 мкм полиэтилена, расположенных в аноде (а) и в катоде (б); в) – на детекторах с радиатором из 20 % раствора тетрабората Na в глицерине, г) – на детекторах в 20 % растворе тетрабората Na в глицерине с дополнительным водяным радиатором, размещенных вблизи анода Темными столбцами выделены результаты измерений после серии разрядов, светлыми – в соответствующих фоновых детекторах, размещенных в 10 м от разряда.

На детекторе 1 (2 см<sup>2</sup>), расположенном вблизи анода, найдено 10 событий распада ядра С-12 на 3 α-частицы (Рисунок 51), число 3α-событий N  $_{3\alpha} = 5$  см<sup>-2</sup> при фоне  $N_{bg3\alpha} = 0.2$  см<sup>-2</sup>. Средний поток нейтронов с энергией  $E_n > 10$  МэВ в области детектора, оцененный по реакции (2), составил  $<n_{n3}> = 1.4 \times 10^5$  п/см<sup>2</sup> на выстрел. На остальных детекторах, расположенных вблизи разряда, N  $_{3\alpha} = 1 - 4$  см<sup>-2</sup>.



Рисунок 51. Микрофотографии событий распада ядра C-12 на 3 α-частицы (размер изображения 130х100 мкм).

Статистика детекторов CR-39 показывает экспоненциальный спад (exp[-r/18.4], Рисунок 52) потока быстрых нейтронов с расстоянием r(см) от первого детектора, помещенного в анод. Поток спадает медленнее, чем по закону  $1/r^2$ . Наблюдаемое отклонение может быть объяснено распределенным в катод-анодном промежутке источником нейтронов.



Рисунок 52. Зависимость плотности потока нейтронов от расстояния. имеет вид экпоненциального спада по закону:

Зависимость плотности потока нейтронов от расстояния имеет вид экпоненциального спада по закону:

$$y = A1 \exp(-r/t1) + y0$$
, где  $y0 = -240$ ,  $A1 = 137000$ ,  $t1 = 18,4$ . (18)

Для детектирования быстрых нейтронов использовался пластический сцинтиллятор на основе полистирола с добавкой РОРОР, чувствительный к быстрым нейтронам, имеющий форму параллелепипеда 150x150x55 мм<sup>3</sup>. Собственная эффективность детектора к быстрым нейтронам, измеренная с помощью источника <sup>252</sup>Cf, оказалась равной  $\eta_{int} = 0.17$ .

Схема детектирования нейтронов в режиме реального времени показана на Рис. 53. Детекторы располагались на расстоянии ~150 см от зоны разряда. Один детектор имел покрытие из 50 мкм Al фольги и мог регистрировать импульсы от рентгеновских гамма-квантов ( $E_{\gamma} > 10$  кэB) и нейтронов ( $E_n > 1$  МэB). Другой имел дополнительную защиту из 10 см Pb.



Рисунок 53. Схема детектирования нейтронов в реальном времени (вверху) и временные диаграммы импульсов напряжения, тока, и рентгеновского излучения и нейтронного сигнала (внизу).

В момент разряда оба детектора показали наличие сигналов. Начало сигнала (предположительно, от быстрых нейтронов) на втором детекторе с защитой из 10 см Рb задержано относительно первого сигнала (от гамма-

квантов) на 35 нс. Оценивая энергию нейтронов по времени пролета расстояния 150 см, получаем  $E_n \sim 10$  МэВ. Формы нейтронных импульсов примерно одинаковые для всех событий. Вне ширины импульсов рентгеновского излучения импульсов нейтронов не наблюдалось. Ширина и амплитуда нейтронных импульсов меняется в широких пределах внутри импульса рентгеновского излучения. Временная задержка нейтронного импульса относительно импульса РИ лежит в более узком интервале. По этой задержке можно оценить диапазон энергий нейтронов без определения местоположения источника. В предположении одновременной генерации РИ и нейтронов, средняя энергия нейтронов составляет 17±6 МэВ (Рисунок 53).

Геометрический фактор, определяемый размерами сцинтиллятора и расстоянием от разряда, составляет  $\approx 8 \times 10^4$ . Тогда, исходя из предположения  $\sim 10^6$  быстрых нейтронов за импульс в  $4\pi$  ср, с учетом геометрического фактора и поглощения в свинце до сцинтиллятора дойдет  $\sim 250$  нейтронов. С учетом собственной эффективности импульс ФЭУ будет суперпозицией примерно 40 одинарных (~500 мВ) импульсов, т.е. должен иметь амплитуду примерно 20 В (при точном наложении) или с меньше, но с пропорционально увеличенным интегралом импульса.

Введение дополнительного замедлителя нейтронов (~20 см полиэтилена) привело к исчезновению сигнала от быстрых нейтронов на втором детекторе (см. Рисунок 53), что согласуется с выводом о том, что в момент разряда излучаются и быстрые нейтроны.

Как видно из Рис. 53, формирование потока нейтронов происходит на предымпульсе тока до формирования основного разряда. Амплитуда предымпульса к моменту генерации нейтронов в 27 раз меньше амплитуды основного импульса тока. Появление импульса нейтронного излучения задержано по отношению к импульсу γ-излучения на 35 нс.

Оценка энергии нейтронов проводилась следующим образом. Энергия нейтронов E<sub>n</sub> в эВ связана со временем t в мксек соотношением:

$$E_n = (72,3L)^2 / t^2, \tag{19}$$

где t интервал времени между нейтронной вспышкой и моментом попадания нейтрона в детектор, т. е. время пролёта нейтронами расстояния L (в метрах) от источника до детектора. По этому времени пролета можно оценить диапазон энергий нейтронов без определения местоположения источника. В предположении одновременной генерации РИ и нейтронов, средняя энергия нейтронов составляет 17±6 МэВ (см. Рисунок 54).



Рисунок 54. Распределение времени пролета нейтронов: <t>=26.2 ns,  $\sigma(t)=4.2$  ns;  $E(_{t=22}) = 24$  MeV,  $E(_{t=26.2}) = 17$  MeV,  $E(_{t=30.4}) = 12.7$  MeV.

Таким образом, двумя независимыми методами (трековым детектором CR-39 и детектором на основе пластического сцинтиллятора с ФЭУ) установлено, что в процессе высоковольтного разряда в воздухе эмитируются нейтроны, которые являются продуктами пока неизвестных ядерных реакций, с интенсивностью  $\sim 10^6$  нейтронов за выстрел в 4 $\pi$  ср. Полученные данные позволяют предположить, что в процессе разряда образуются быстрые нейтроны, причем их генерация происходит в начальной фазе разряда и коррелирована с генерацией квантов жесткого рентгеновского излучения. Не наблюдается генерации нейтронов, не сопровождающейся жестким рентгеновским излучением. Поток быстрых нейтронов падает

экспоненциально и медленнее, чем по закону 1/r<sup>2</sup> с расстоянием от ближайшего к разряду детектора CR-39. наблюдаемое отличие может быть связано с нелокальностью источника нейтронов, распределенного в промежутке катод-анод.

объяснения механизма наблюдаемой эмиссии нейтронов и Для пространственных характеристик уточнения ИХ источника требуется проведение дополнительных экспериментов. Для получения спектра энергии нейтронов нужно установить положение (положения) нейтронного источника. Для этого необходимы детальные и полные времяпролетные измерения, дополнительные детекторы нейтронов на основе <sup>3</sup>He и ZnS счетчиков, частичное или полное экранирование области разряда, применение различных замедлителей и конверторов для увеличения чувствительности по нейтронному потоку в широком диапазоне энергий. Подлежит исследованию возможная анизотропия нейтронного излучения. С другой стороны, показано влияние средних и локальных электрических полей, параметров атмосферы.

В настоящее время нет приемлемой модели или механизма, объясняющего генерацию нейтронных вспышек в атмосферном разряде в воздухе. Отельной проблемой является происхождение нейтронов с энергией более 10 МэВ.

# 6.4.2. Выход продуктов ядерных реакций в высоковольтном разряде с дейтерированным заостренным катодом на установке ЭРГ

Мишень в виде дейтерированной электролизом до насыщения стальной иглы использовалась в качестве острия катода. Анод в виде сетчатой полусферы со встроенным токовым шунтом. Для уменьшения азимутальной неоднородности поля в промежутке и увеличения ширины области сильного поля применен дополнительный потенциальный электрод в виде обращенного конуса. Распределение электрического поля в геометрии эксперимента представлено на Рисунке 55.



Рисунок 55. Распределение напряженности в промежутке заостренный катод – полусферический анод. Шаг изолиний потенциала 50 кВ.

В серии из 50 выстрелов с регистрацией сцинтилляционными детекторами импульсы РИ на предпробойной стадии зарегистрированы в 44 выстрелах. Импульсы нейтронного излучения на предпробойной стадии зарегистрированы в 16 выстрелах. Во всех случаях импульсы нейтронов лежат внутри контура импульсов РИ. В среднем, фронт нейтронного импульса отстоит от импульса РИ на 25±5 нс, как наблюдалось и ранее в сериях разрядов со сферическими электродами различных радиусов и с чистым заостренным катодом (без насыщения дейтерием).

Основным отличием серии с дейтерированным острием-иглой в качестве катода явилось появление импульса второго импульса нейтронов. В трех случаях из всех нейтронных событий по серии нейтронные импульсыдвойники особенно выражены. В нескольких импульсах присутствует, по-Появление видимому, только второй импульс. второго импульса механизме свидетельствует о дополнительном генерации нейтронов, связанном с наличием высокой концентрации, до 10<sup>22</sup> см<sup>-3</sup>, дейтерия в поверхностных слоях материала острия.

На Рисунке 56 приведены типичные осциллограммы хорошо различимых двойных импульсов нейтронов с дейтерированным остриемиглой в качестве катода. Расстояния по времени между максимумами импульсов составляют 22-45 нс. В предположении о том, что первый по времени импульс соответствует ранее исследованной вспышке нейтронов со средней энергией ~17 МэВ, второй импульс можно отнести к группе нейтронов меньшей энергии, но рожденной одновременно с первой группой.



Рисунок 56. Типичные осциллограммы двойных нейтронных импульсов. Разница по времени между максимумами 22-45 нс.

Энергия нейтронов  $E_n$  в эВ связана со временем t в мкс соотношением:  $E_n = (72,3L)^2/t^2$ , где t – время переноса частицы на расстояние L (в метрах). Рассчитаем время переноса нейтронов от разрядного промежутка до детектора для установки ЭРГ. Характерное расстояние от ближайшего электрода (анода) до поверхности сцинтиллятора составляет 1,5 м.

Исходя из зависимости времени пролета нейтронов от их энергии:  $t_1 = (72,3 \cdot L) \cdot (1,5 \cdot 10^7) = 26$  нс для  $E_n = 17$  МэВ,  $t_2 = (72,3 \cdot L) \cdot (2,5 \cdot 10^6) = 69$  нс для  $E_n = 2,5$  МэВ (DD нейтрон),  $\Delta t = t_2 - t_1 = 43$  нс.

Следовательно, в случае одновременной генерации нейтронов с разной энергией (17 и 2,5 МэВ) детектор зафиксирует два импульса с разницей по времени приблизительно 43 нс. Таким образом, второй импульс может быть связан со стимуляцией DD реакции в материале мишени. Наблюдаемые также меньшие временные задержки (на ~20 нс), вероятно, связаны со временами развития стимулированных процессов, но могут быть отнесены и к генерации нейтронов больших энергий.

Таким образом, показано, что воздействие высоковольтного разряда на дейтерированную мишень приводит к стимулированию DD-реакции с выходом 2.5 МэВ-ных нейтронов. При этом также происходит стимулирование генерации нейтронов с энергией > 10 МэВ, связанной с пока неизвестными процессами в высоковольтном разряде в воздухе.

## 7. Проведение мероприятий по модернизации УСУ

## 7.1. Модернизация ГЕЛИС

С целью модернизации установки ГЕЛИС, включая автоматизацию контроля работы систем, а также запись необходимых для анализа экспериментальных данных были приобретены:

1. DPO4054B. Осциллограф цифровой, 4 канала х 500МГц\Tektronix. 576900,01 руб. с НДС.

 2. ADAM-4118-AE. Модуль аналогового ввода, 8 каналов (мВ, В, мА, термопары) для расширенного диапазона температур. 8443,57 руб. с НДС.
 3. ADAM-4520-D2E. Преобразователь интерфейсов RS-232 и RS-422/RS-485. 2584,70 руб. с НДС.

4. DNR30US24. Источник питания AC-DC для монтажа на DIN-рейку, входное напряжение 90-264В перем. тока (47-63 Гц) / 90-375В пост. тока, выходное напряжение 24В/1.25А. 3544,25 руб. с НДС.

5. SW-4EPL (DBSF). Реле потока 3/4 дюйма. 8 шт. 73896 руб. с НДС.
6. PTL-10-V. Преобразователь перепада давления в жидких средах. 6610 руб. с НДС.

7. Преобразователь ПМИ-3-2. 4 шт. 12500 руб. с НДС.

Общая стоимость закупленного оборудования для модернизации установки ГЕЛИС составила 684478,53 руб. с НДС.

Приобретенные устройства позволяют осуществить автоматический дистанционный контроль наличия протока охлаждаемой воды в разрядной камере ионного источника И В 7 катушках фокусирующей электромагнитной линзы установки ГЕЛИС. Используя приобретенную аппаратуру, на установке ГЕЛИС планируется осуществить дистанционное мониторирование и непрерывную запись параметров экспериментов (ускоряющее напряжение, ток ионного пучка, остаточное давление в камере мишеней, температура мишеней) в память ПК, что позволит повысить точность получаемых экспериментальных результатов.

Для отладки и контроля работоспособности быстрой аналоговой и цифровой электроники существующей детектирующей системы установки

ГЕЛИС и с целью её модернизации (развития) использовался 4-канальный осциллограф с цифровым люминофором Tektronix DPO4054B.

Tektronix DPO4054B Осциллограф обеспечивает рабочие характеристики, необходимые для представления самых сложных сигналов. Полоса пропускания до 500 МГц, и минимальное значение соотношения максимальной (частоты выборки) / (верхняя частота полосы пропускания), позволяет уверенно захватывать и точно отображать самые быстрые изменения сигнала. Стандартная длина памяти 10 млн выборок на каждом канале обеспечивает захват сигналов в длинную память с высоким разрешением по времени. Возможность автоматического подключения осциллографа Tektronix DPO4054В к ПК по шине USB позволяет управлять прибором с помощью ПК для регистрации данных и проведения измерений. В число поставляемых приложений входят NI LabVIEW SignalExpress<sup>тм</sup> Tektronix Edition LE, OpenChoice® Desktop, а также панели инструментов Microsoft Excel и Word, что позволяет быстро и просто устанавливать прямую связь с компьютером, работающим под управлением Windows. Все эти возможности осциллографа Tektronix DPO4054B позволят дооснастить ГЕЛИС детектирующую систему установки 4 полупроводниковыми детекторами (ППД) для регистрации заряженных частиц on line в процессе эксперимента существенно улучшить надежность получаемых И экспериментальных данных.

Наличие ППД детекторов в детектирующей системе позволит приступить на установке ГЕЛИС к исследованиям безнейтронных ядерных реакций:

D + <sup>3</sup>He → <sup>4</sup>He (3.9 MeV) + p (14.7 MeV) <sup>3</sup>He + <sup>3</sup>He → <sup>4</sup>He + 2p (12.8 MeV).

Сведения о закупках оборудования для модернизации установки ГЕЛИС приведены в Приложении А.

#### 7.2. Модернизация ЭРГ

С целью модернизации диагностической системы установки ЭРГ были приобретены широкополосные усилители-преобразователи 50 кГц – 1.5 ГГц для ФЭУ Hamamatsu C5594-22 в количестве 10 шт.

Общая стоимость закупленного оборудования для модернизации установки ГЕЛИС составила 720254,30 руб. с НДС.

Оборудование позволяет В полной мере исследовать быстропротекающие излучательные процессы, происходящие на начальной стадии развития атмосферного разряда. Использование системы регистрации на базе 8-ми анодного ФЭУ с временем нарастания 0,7 нс (Hamamatsu H9530-01) и двух ФЭУ с увиолевыми окнами (Hamamatsu R1463) в комплексе с тремя четырехканальными осциллографами с полосой пропускания 1 ГГц одновременной регистрации УΦ. даст возможность видимого, рентгеновского и нейтронного излучений в десяти независимых каналах с обеспечиваемым датчиками временным разрешением.

Сведения о закупках оборудования для модернизации установки ЭРГ приведены в Приложении Б.

## 7.3. Модернизация С-25Р

С целью модернизации установки C-25P были приобретены: 1. Электронные модули согласно договору №16/13 от 05.09.13 (наименования ADC64S и TRB-D128). 500000руб., НДС - нет.

2. Затвор проходной ДУ 50 MDC. 26000 руб. с НДС.

3. Затвор проходной ДУ 160 VAT. 32000 руб. с НДС.

4. Тройник Ду 50. 3000 руб. с НДС.

5. Шланг сильфонный 1м, Ду 80. 9000 руб. с НДС.

6. Блок электродный магниторазрядного насоса. 10 шт. 80000 руб с НДС.

Общая стоимость закупленного оборудования для модернизации установки C-25P составила 650000 руб. с НДС.

С целью модернизации установки С-25Р были произведены закупки модулей ADC64S (Рисунок 57) электронных И **TRB-D128** новых производства ОАО «Афрес», аффилированного с Объединенным институтом ядерных исследований в Дубне. Эти модули, разработанные специалистами института, предназначены для исследований быстропротекающих процессов, в том числе для совпадательных и время-пролетных измерений. Они соответственно выполняют функции многоканального 12-ти битового АЦП с 64 дифференциальными входами с частотой защелкивания не менее 65 МГц, также функции многоканального (128)дифференциальных входа) а

многохитового ВЦП с глубиной запоминания до 102.4 мкс и временным разрешением около 100 пс. Модули оснащены высокоскоростным (1 Гбит/с) Ethernet каналом передачи данных и каналами внешней синхронизации. Логика предварительной обработки сигналов и буферизации данных реализуется на схемах FPGA. Приобретение этих модулей существенно поможет дальнейшему проведению исследований на УСУ.



Рисунок 57. Фотография закупленного электронного модуля ADC64S (АЦП с 64 дифференциальными входами).

Помимо этого были произведены текущие закупки некоторой вакуумной техники (сильфоны, затворы), необходимой для перестройки вакуумных трактов, а также поддержания работы магниторазрядного насоса. На Рисунке 58 представлена фотография проходного затвора ДУ 160 VAT и сильфонного шланга ДУ 80.



Рисунок 58. Затвор проходной ДУ 160 VAT и сильфонный шланг ДУ 80.

Сведения о закупках оборудования для модернизации установки С-25Р приведены в Приложении В.

## 8. Обеспечение проведения исследований для сторонних организаций с использованием УСУ

Ускорительный комплекс ФИАН «Пахра» (установка C-25P) регулярно используется рядом сторонних организаций – как правило, для выполнения совместных исследований. Для обеспечения этих исследований заключены долгосрочные договоры с Объединенным институтом ядерных исследований, Московским инженерно-физическим институтом, Белгородским государственным университетом, Институтом спектроскопии РАН, Томским политехническим университетом и др. Такие работы выполняются либо на основе плана научно-исследовательской работы ФИАН, либо на основе отдельных договоров (протоколов).

Аппаратура заказчиков размещается в ускорительном и двух экспериментальных залах ускорительного комплекса, в пультовых экспериментальных установок.

В ряде случаев заказчики оказывают неоценимую помощь, поставляя экспериментов свою дорогостоящую измерительную аппаратуру, для отсутствующую в институте, и привлекая собственные квалифицированные кадры – научных работников, аспирантов, студентов. ФИАН обеспечивает мероприятия охране проводит инструктажи ПО труда, по технике безопасности, проверяет наличие допусков при работе с источниками ионизирующего излучения.

Сторонней организацией при проведении совместных исследований на установке ЭРГ в рамках настоящего госконтракта является НПП «Дельта» (научно-производственное предприятие сферы ОПК). С организацией заключен долгосрочный договор о научно-техническом сотрудничестве. Экспериментальные работы по комплексному воздействию на образцы Ti/Ti:Dx (BT-6) высоковольтным атмосферным разрядом на установке ЭРГ имеют прямое отношение к теме настоящего госконтракта.

Основные результаты работ (исследований, услуг) для сторонних организаций, проведенных в период действия настоящего госконтракта,

заключаются в следующем (см. Приложение 18, таблицу «Сведения о числе организаций-пользователей уникальных стендов, установок и объектов научной инфраструктуры в рамках государственного контракта»).

- В рамках прикладных работ по созданию узконаправленных гаммапучков, предусмотренных госконтрактом с МИФИ № 552-600/57эа от 05.12.2011 г., на установке С-25Р было проведено облучение экспериментальных образцов заказчика, предоставлено заказчику метрологическое обеспечение параметров электронного пучка при его прохождении через подготовленные мишени. Подтверждающий документ – акт сдачи-приемки работ от 19.07.2013 г.
- 2. В рамках протокола № 4254-1-12/14 от 01.10.2012 г. о выполнении совместной (ФИАН и ОИЯИ) научно-исследовательской работы по проблеме исследования эта-мезонных ядер на пучке нуклотрона ОИЯИ специалистами ФИАН было проведено тестирование изготовляемого ими для совместного эксперимента прототипа нейтронного детектора на космическом излучении и на пучке электронов с энергией 300 МэВ установки С-25Р. Подтверждающий документ акт приемки работ от 09.08.2013 г.
- 3. В рамках договора № 1/9 от 14.09.2011 г. о научно-техническом сотрудничестве ФИАН и ИСАН по проблеме использования пучка синхротронного излучения на установке С-25Р (ускорительном комплексе ФИАН «Пахра») в интересах заказчика – Института спектроскопии РАН - на канале синхротронного излучения был смонтирован высокопроизводительный турбомолекулярный насос TG 450 FBAB производства Японии, который позволил задействовать для установленный измерений ранее на канале И настроенный совместными усилиями специалистов обоих институтов рентгеновский спектрометр-монохроматор McPherson 248/310. Подтверждающий документ – акт приемки работ от 10.09.2013 г.
- 4. В рамках договора № П/1 от 01.10.2012 г. о научно-техническом ФИАН сотрудничестве между И Научно-исследовательским институтом «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха по проблеме использования физических установок ускорительного комплекса ФИАН «Пахра» и технологической базы НИИ «Полюс» для изучения микро-И наноструктуры конденсированных веществ» была изготовлена по новой технологии медная мишень, которая в дальнейшем была изучения смонтирована на установке для рентгеновского поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов. Подтверждающий документ – акт приемки работ от 03.09.2013 г.
- 5. В рамках договора № 29/09 от 25.02.2009 г. об образовании базовой кафедры Белгородского государственного университета в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН и привлечении студентов и аспирантов БелГУ к выполнению научно-исследовательских работ на базе лабораторий ФИАН специалистами ФИАН были выполнены работы по изготовлению усовершенствованной вакуумной камеры и размещению в ней на ускорительном комплексе С-25Р нового рентгеновского монохроматора БелГУ, предназначенного для изучения рентгеновского поляризационного тормозного излучения. Подтверждающий документ акт приемки работ от 28.08.2013 г.
- 6. В рамках договора № 121/1 от 02.09.2013 г. о научно-техническом сотрудничестве между ФИАН и НПП «Дельта» по проблеме модификации материалов с помощью комбинированного воздействия высоковольтного атмосферного разряда на установке ЭРГ (ФИАН) в интересах заказчика был выполнен эксперимент по комплексному воздействию высоковольтного атмосферного разряда на образцы Ті/Ті:D<sub>x</sub> (ВТ-6). Подтверждающий документ акт №1 сдачи-приемки выполненной услуги от 13.09.2013 г.

#### 9. Анализ полученных результатов, подготовка публикаций

Анализ данных, полученных в серии экспериментов на установках ГЕЛИС, ЭРГ и С-25Р, показал, что воздействие на дейтерированные твердотельные гетероструктуры пучков ионов, электронов и электрических разрядов происходит стимулирование в них ядерных реакций с выходом нейтронов. Величина выхода нейтронов сильно зависит от мощности излучения, воздействующего на поверхность мишени, от материала мишени, от способа воздействия (импульсное или непрерывное).

На основании полученных результатов были подготовлены 3 статьи, которые приняты в печать и будут опубликованы в журнале «Краткие сообщения по физике ФИАН» (см. Приложение 18, таблицу «Сведения о числе публикаций, содержащих результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках выполнения государственного контракта »).

### 10. Оценка возможности применения полученных результатов. Рекомендации и предложения по использованию результатов НИР

Экспериментальные данные показывают, что потенциал экранирования сильно зависит от материала мишени и от условий проведения эксперимента (плотности тока, температуры на поверхности мишени, эффективной концентрации атомов дейтерия в поверхностном слое мишени и др.). Также показано, что важными факторами, повышающими выход ядерных реакций, являются различные внешние воздействия на мишень (пучки ионов и электронов, электрические разряды и др.)

Рассмотрим, какие следствия можно сделать из полученных данных.

недавнего времени при оценке выхода DD/DT-реакций на Дo поверхности «первой стенки»/дивертора термоядерных реакторов типа ITER, не принимались во внимание нелинейные процессы усиления реакций синтеза в металлах при низких энергиях бомбардирующих частиц. Действительно, при столкновении частиц в вакууме или плазме выход продуктов синтеза при ( $E_d$ )lab  $\leq 2$  keV будет пренебрежимо мал. Однако, при низкоэнергетической дейтронной бомбардировке металлических мишеней возникают условия, кардинально отличные от условий вакуумно-плазменных столкновений. Недавно было показано, что в большинстве металлических мишеней, подвергнутых бомбардировке дейтронами при низкой энергии, выходы DD –реакции значительно величины выше, чем те. что предсказываются путем экстраполяции стандартного (вакуумного) сечения к низкой энергии дейтронов.

Нелинейные наблюдаются эффекты усиления вследствие значительного увеличения потенциала экранирования дейтронов В металлических мишенях при E<sub>d</sub> < 5 keV, особенно при большой плотности тока, когда количество несвязанного с атомами мишени дейтерия существенно возрастает. Так, в недавних экспериментах, использующих импульсный тлеющий разряд с током пучка дейтронов I ~ 200-400 mA при

напряжениях 0.8-2.45 kV, обнаружено усиление на 9 порядков величины выхода реакции d(d,p)t при  $E_d = 1.0$  keV в Ті мишени, по сравнению со значением полученным путем экстраполяции стандартного сечения к данной энергии. Из приведенных данных следует, что дальнейшее возрастание тока пучка дейтронов могло бы существенно увеличить выход продуктов реакций DD/DT- синтеза из металлов при низких энергиях бомбардирующих частиц. В этой связи, можно предположить, что усиление выхода реакций синтеза будет также иметь место В процессе плазменной бомбардировки поверхностей реактора дейтронами/тритонами, ускоренными электростатически в зазоре плазма – стенка реактора в сильноточных термоядерных установках типа ITER. Понимание вклада подобных эффектов становится важным при рассмотрении вопроса о возможных дополнительных источниках эрозии материалов первой стенки реактора при длительной его эксплуатации.

Анализ экспериментальных данных по измерению сечения DDреакции при бомбардировке различных металлических мишеней дейтронами низких энергиях на ускорителях показывает, что краевые эффекты в материалах первой стенки термоядерного реактора типа ITER могут приводить к, игнорировавшимся ранее, процессам эрозии приповерхностного слоя за счет генерации избыточных альфа-частиц (атомов гелия-4), в результате значительного усиления выхода реакции d(t, n)α.

Полагая, например, что условия на первой стенке термоядерного реактора, отвечают значениям плотности тока J = 1.0 A/cm<sup>2</sup> при температуре t = 500 °C и используя значения  $y_0(W) = 3.45$ ,  $\varepsilon_d(W) = 0.05$  eV и  $y_0(Fe) = 16.7$ ,  $\varepsilon_d(Fe) = 0.06$  eV [5], получим  $U_e(W) = 1200$  и  $U_e(Fe) = 1350$  eV, соответственно.

Расчеты показывают, что в мишенях из W и Fe, с учетом гипотетических краевых параметров ITER: J=1.0 A/cm<sup>2</sup>,  $\langle E_d \rangle = 2.0$  keV, T ~ 773K а также приведенных выше значений U<sub>e</sub>, концентраций связанного трития/дейтерия (N<sub>eff</sub>(T)) и энергий активации выхода свободного дейтерия  $\varepsilon_d$ 

для этих металлов приводит к значениям выхода DT-реакции d(t, n) $\alpha$  I<sub>DT</sub>  $\approx$  (1-2) ×10<sup>4</sup> s<sup>-1</sup>-cm<sup>-2</sup>. С точки зрения генерации 3.6 MeV альфа-частиц из DTозначает, что в течение одного реакции, это года эксплуатации термоядерного реактора в его первой стенке аккумулировалось бы дополнительно до  $\sim 7 x 10^{11\,4} \text{He}$  at./cm² или в слое с эффективной глубиной  $\sim 6$ µm (длина пробега 3.6 MeV α в вольфраме) достигалась бы концентрация гелия  $N_{He}^4 \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Отметим, что без учета фактора усиления DT- реакции, концентрация гелия генерируемого в реакции  $d(t, n)\alpha$  за счет краевых эффектов будет на 4 порядка ниже, т.е. соизмерима с исходными (до экспозиции в реакторе) значениями.

Таким образом, приведенные грубые оценки интенсивности DTреакции, с учетом фактора усиления при низких энергиях дейтронов в металлах, указывают на наличие, игнорируемых ранее, дополнительных краевых эффектов в термоядерных установках типа ITER. Альфа-частицы, генерируемые реакциях тормозящиеся материалах В таких И В дивертора/первой стенки, будут создавать дополнительные точечные дефекты (вакансии). Генерация избыточных вакансий может увеличить скорость распыления поверхностного слоя первой стенки. С другой стороны, гелия-4 образующиеся при остановке этих α-частиц будут атомы накапливаться в приповерхностном слое материала в ядрах краевых дислокаций или захватываться дислокационными атмосферами. Данный процесс может привести к потере пластичности приповерхностного слоя металлов даже при достаточно малых концентрациях <sup>4</sup>He ~ 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup>, сопровождающейся блистерингом и образованием микротрещин.

Описанные эффекты, являющиеся следствием усиления реакций синтеза в первой стенке термоядерного реактора могут привести к уменьшению времени его эксплуатации. Этот вывод особо относится к более мощным энергетическим реакторам будущего (DEMO и др.) в которых поток заряженных частиц на первой стенке, а значит и фактор усиления реакций

DD/DT – синтеза будут значительно выше. В этой связи, наряду с эффектами повреждений, объемных индуцируемых быстрыми нейтронами, И поверхностным распылением конструкционных материалов потоками низкоэнергетических заряженных частиц, вклад усиления реакций синтеза в материалов первой радиационную коррозию стенки энергетических реакторов также подлежит серьезной экспериментальной оценке.

Говорить окончательно о значении эффектов усиления выходов peaкций DD/DT – синтеза для получения избыточной энергии пока преждевременно. Для этого необходимы точные калориметрические измерения, что является темой отдельного исследования. Хотя некоторые качественные оценки можно сделать уже сейчас. Напомним, что ДЛЯ условий протекания реакций синтеза в термоядерных обеспечения установках типа ITER используется сильно ионизированная плазма. Для поддержания этих условий в течение времени, необходимого, чтобы выделяющаяся энергия достигла нужных значений, требуется сложная система сжатия плазмы магнитным полем (что требует значительных энергозатрат). В других установках для создания горячей плазмы используются мощные (свыше 10<sup>18</sup> Вт/см<sup>2</sup>) лазеры. Воздействие такого лазера на твердотельную мишень приводит к её частичному или полному разрушению, благодаря чему и создается плазма. При этом энергетические затраты на лазерное излучение и удержание плазмы также очень велики. До настоящего времени пока ни одна из термоядерных установок не выработала энергию, превышающую энергозатраты на поддержание её работы.

В этой связи представляется перспективным и заманчивым использовать в качестве мишеней материалы, содержащие дейтерий (и тритий) и обладающие высоким потенциалом экранирования. Расчеты, проведенные в [54] показали, что гидриды металлов, можно рассматривать как двойную систему, где водородная подсистема находится в возбужденном состоянии. При этом эффективная температура водородной подсистемы может на несколько порядков величины превышать температуру металла –

матрицы. Таким образом, водородную подсистему можно рассматривать как холодную плазму, внедренную в твердое тело, которое само не дает ей разлететься и поддерживает её в возбужденном состоянии длительное время. При воздействии на такую систему внешним излучением, не разрушающим структуру твердого тела (рентгеновское излучение, пучки электронов и ионов, лазерное излучение малой мощности), можно добиться условий, при возможно протекание реакций синтеза. Увеличивая которых станет внешнего воздействия, можно добиться усиления выхода мощность продуктов ядерных реакций и такой синтез будет вполне управляемым [34]. При этом затраты энергии на поддержания такой системы в рабочем состоянии могут быть существенно ниже (на порядки величины), чем для «классических» термоядерных установок.

Таким образом, поиск материалов с высоким потенциалом экранирования, обладающих стойкостью к экстремально высоким температурам и способных поддерживать протекание реакций синтеза длительное время, а также способов инициирования этих реакций с затратами энергии, представляется весьма важным минимальными И перспективным. При этом не стоит ограничиваться только исследованием реакций DD/DT – синтеза, а следует изучить и другие перспективные реакции с выделением избыточной энергии (He-3(d,p)He-4, Li-6(d,α)He-4,  $B-11(p,\alpha)Be-8$  и др.), протекание которых в твердом теле при низких энергиях пока до конца не изучено.

В результате выполнения НИР проведено комплексное исследование реакций низкоэнергетического взаимодействия пучков ионов и электронов, а также мощного электрического разряда с водородосодержащими наносистемами на уникальных установках ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и С-25Р. Создан нейтронный детектор для время-пролетных измерений.

В нашей работе потенциал экранирования для гетероструктуры  $Ti/TiO_2:D_x$  при воздействии пучком ионов Ne+ при энергии ионов в диапазоне 10 – 20 кэВ оценен как U<sub>e</sub> = 796 эВ. Потенциал экранирования для

гетероструктуры Pd/PdO:D<sub>x</sub> при данных условиях эксперимента оценен как U<sub>e</sub> = 986 эВ. Эти результаты в общем хорошо согласуются с данными, полученными в других работах. Некоторые количественные расхождения объяснить можно разными условиями проведения экспериментов. Результаты НИР показали, что потенциал экранирования сильно зависит от материала мишени и от условий проведения эксперимента (плотности тока, температуры на поверхности мишени, эффективной концентрации атомов дейтерия в поверхностном слое мишени и др.). Поэтому выбор оптимальных условий эксперимента при поиске перспективных материалов с высоким потенциалом экранирования является первостепенной задачей.

Результаты НИР могут помочь при оценке наработки He-4 и He-3 в результате работы мощных термоядерных установок, которая ведет к их преждевременному разрушению. Также могут быть подобраны материалы с низким потенциалом экранирования, где данные эффекты будут минимальны.

Результаты НИР будут полезны в поиске материалов с высоким потенциалом экранирования для использования их в качестве мишеней в будущих установках ядерного синтеза.

В результате выполнения НИР исследованы методы воздействия (пучки ионизирующего излучения ионов, электронов) на водородосодержащие гетероструктуры палладия и титана, предназначенные для повышения вероятности протекания ядерных реакций. Получены результаты, способствующие пониманию процессов ядерного синтеза в энергиях взаимодействующих твердом теле при низких частиц, стимулированного внешними ионизирующими излучениями.

Установлено, что воздействие мощного электрического разряда на поверхность дейтерированной мишени приводит к усилению выхода DD-реакции.

Также установлено, что в процессе высоковольтного разряда в воздухе эмитируются нейтроны с энергией > 10 МэВ, которые являются продуктами

```
116
```

пока неизвестных ядерных реакций, с интенсивностью  $\sim 10^6$  нейтронов за выстрел в  $4\pi$  ср. Полученные данные позволяют предположить, что в процессе разряда образуются быстрые нейтроны, причем их генерация происходит в начальной фазе разряда и коррелирована с генерацией квантов жесткого рентгеновского излучения.

Результаты НИР могут иметь целый ряд практически важных применений, касающихся создания источников энергии на новых принципах (ядерный синтез при низких энергиях, безнейтронный синтез), синтезе новых материалов (локальное комбинированное воздействие жесткими высоковольтного разряда), выработки излучениями И током норм радиационной безопасности в высотной атмосфере и стратосфере (процессы излучения нейтронного генерации И гамма-В атмосфере), помехоустойчивости низкоорбитальной и стратосферной техники (радио-, рентгеновское и гамма-излучение так называемых гигантских и высотных атмосферных разрядов в стратосфере и ионосфере).

Приоритетные направления развития науки, технологий и техники Российской Федерации, развитию которых способствуют результаты научного исследования: энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика

Критические технологии Российской Федерации, в которых возможно использование результатов научного исследования: водородная энергетика, технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы.

#### 11. Технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов

Исследования процессов стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов на уникальных установках ФИАН положили начало развитию нового фундаментального направления, находящегося на стыке физики твердого тела и ядерной физики низких энергий.

В соответствии с п.6.1. ТЗ были выполнены основные техникоэкономические требования к разрабатываемым методам стимулирования ядерных реакций.

Изучение ядерных процессов, вызываемых частицами низких энергий, присутствующих в высоковольтном разряде и пучках ионов и электронов от ускорителей, позволяют сделать утверждение о важности учета вкладов низкоэнергетических ядерных реакций в термоядерной энергетике будущего. В результате НИР показано, что эти вклады важны при разработке систем накопления и хранения изотопов водорода (дейтерия, трития), поиске путей снижения температур, необходимых для осуществления термоядерных реакций, а также при исследованиях радиационной стойкости материалов, применяющихся в термоядерных установках.

Возможность осуществления условий, необходимых для протекания реакций ядерного синтеза при низких энергиях в твердотельных структурах будет иметь далеко идущие фундаментальные и прикладные следствия.

Одним из важнейших технико-экономических показателей реализации является возможность поиска материалов на практике С высоким потенциалом экранирования для использования их в качестве мишеней в будущих установках ядерного синтеза. Исследование материалов, в которых реакций более процессы усиления ядерных ярко выражены, дает возможность определить перспективность их применения в будущих установках управляемого ядерного синтеза.

Другим важным технико-экономических показателем реализации НИР является поиск оптимальных способов стимулирования ядерных реакций в твердотельных мишенях, обеспечивающих максимальный выход продуктов реакций при минимальных затратах вложенной энергии.

В этой связи результаты НИР могут иметь практическую значимость в областях, касающихся создания источников энергии на новых принципах (ядерный синтез при низких энергиях, безнейтронный синтез), синтезе новых материалов (локальное комбинированное воздействие жесткими излучениями током высоковольтного разряда), выработки И норм радиационной безопасности в высотной атмосфере и стратосфере (процессы нейтронного излучения генерации И гамма-В атмосфере). помехоустойчивости низкоорбитальной и стратосферной техники (радио-, рентгеновское и гамма-излучение так называемых гигантских и высотных атмосферных разрядов в стратосфере и ионосфере).

Предложенное развитие направления стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и различными видами излучений может иметь инвестиционную привлекательность как для государственных учреждений и структур, так и для частных компаний, специализирующихся в области поиска новых альтернативных источников энергии. В долгосрочной перспективе следует рассматривать получение энергии на основе новых принципов и процессов в энергетике как главное приоритетное направление развития науки и технологий в Российской Федерации. Не исключается и возможность быстрой «энергетической революции», связанной в каким-либо новым источником энергии, если он будет более конкурентоспособен по сравнению с традиционными.

Развитие направления исследования низкоэнергетических ядерных реакций требует государственных инвестиций, имеет экономическую привлекательность для частных инвесторов. Новые подходы к

стимулированию ядерных реакций высоковольтными разрядами и пучками частиц от различных источников могут быть востребованы на международном рынке новых наукоёмких технологий. Полученные в ходе выполнения НИР результаты имеют не только фундаментальный характер, но и способствуют развитию новых подходов к организации и проведению научных исследований в различных областях современной науки.

# 12. Разработка и реализация комплекса мероприятий, направленных на увеличение количества пользователей УСУ

Мероприятиям, направленным увеличение количества на пользователей УСУ, постоянно уделяется большое внимание. Они разрабатываются и реализуются в тесном соответствии с утвержденными планами научно-исследовательской работы ФИАН, с планами модернизации УСУ, co сложившимися научно-техническими связями с другими учетом возможного проведения на УСУ организациями, С новых перспективных работ. В частности, работы на электронном пучке установки С-25Р (ускорительном комплексе ФИАН «Пахра»), предусмотренные настоящим госконтрактом, планировались и реализовывались так, чтобы не создавать значительные препятствия для проведения других работ. ведущихся на ускорительном комплексе, в том числе совместных работ с К числу последних относятся, в частности, другими организациями. совместные работы с Объединенным институтом ядерных исследований (Дубна) по проблеме изучения эта-мезонных ядер (на установке «Гиперон»), с Белгородским госуниверситетом по проблеме атомной диагностики веществ и наноматериалов с помощью рентгеновского поляризационного тормозного излучения (на установке «Рентген-1»), совместная работа с Московским инженерно-физическим институтом по прикладным проблемам.

К числу недавно осуществленных мероприятий, направленных на увеличение числа пользователей УСУ, относятся следующие действия.

1. Новая физическая установка с нейтронным детектором, системой регистрации медленных протонов, новым вакуумным трактом и пр. была спроектирована и создана для выполнения НИР в рамках настоящего госконтракта так, чтобы иметь возможность быстрого переключения подачи электронного пучка на другие установки и продолжения на них работ с участием сторонних организаций. В частности, В спроектированной конструкции разводки пучка облучения микротрона-инжектора, использованного ДЛЯ

дейтерированных мишеней, предусмотрен поворотный магнит, который может отводить пучок на установку «Рентген-1», на которой регулярно проводятся работы по изучению веществ и наноматериалов с участием студентов и аспирантов Белгородского госуниверситета в рамках договора о создании в ФИАН базовой кафедры БелГУ. Этот шаг позволил студентам и аспирантам БелГУ без задержек, уже в сентябре с.г. приступить к работам, запланированным для них в учебном плане \_ т.е. сразу после завершения измерений, предусмотренных настоящим госконтрактом.

2. В конструкции новой физической установки была также предусмотрена возможность легкого восстановления канала ввода электронного пучка инжектора в кольцо синхротрона для дальнейшего ускорения и получения пучка гамма-квантов высоких энергий, синхротронного излучения, выведенного электронного пучка высоких энергий. Эта процедура неоднократно проделывалась летом 2013 г. для неотложных работ на УСУ, выполняемых В интересах иных потребителей – МИФИ, ОИЯИ, ИСАН - тем самым сохраняя их как наших постоянных партнеров и пользователей УСУ.

К числу мероприятий, направленных на увеличение числа пользователей УСУ в будущем, относятся следующие действия.

1. На ускорительном комплексе ФИАН «Пахра» продолжены работы по запуску канала и станции синхротронного излучения в области вакуумного ультрафиолета. В частности, в последнее время на канале установлен дорогостоящий станции И рентгеновский монохроматор McPherson 248/310G производства США в комплекте с регистрирующей CCD камерой, а также высокопроизводительный турбомолекулярный насос TG450F производства Японии. В этих работах принимают сотрудники активное участие Института спектроскопии РАН. Ожидается, что запуск станции привлечет на УСУ дополнительных потребителей из Московского и соседних регионов, в

том числе из крупных учебных центров – МИФИ, физфака МГУ, МФТИ.

2. Проведены переговоры И заключен договор 0 научнотехническом сотрудничестве с Открытым акционерным обществом «Научно-производственное предприятие «Дельта» (OAO)«НПП «Дельта») по теме «Проведение поисковых экспериментальных исследований по модификации материалов С помощью комбинированного воздействия атмосферного высоковольтного разряда в установке ЭРГ» (Договор №121/1 от 02.09.2013). ОАО «НПП «Дельта» входит в состав оборонно-промышленного комплекса страны и занимает лидирующие позиции среди предприятий боеприпасной отрасли. На базе ОАО «НПП «Дельта» действует Координационный Центр по автономным системам неконтактного подрыва.

3. Проводится модернизация установок и физического оборудования УСУ. В частности, произведенные закупки нового дорогостоящего электронного оборудования на средства настоящего госконтракта помогут расширить круг решаемых на УСУ задач и ускорить сроки выполнения будущих исследований, что несомненно будет содействовать привлечению к работам на УСУ новых пользователей.

4. Привлечению новых пользователей способствуют также регулярно проводимые мероприятия по обновлению и поддержанию инфраструктуры УСУ. За последний год на ускорительном комплексе ФИАН «Пахра» были выполнены работы:

 A) по подключению новых источников водяного охлаждения магнитов кольца ускорителя, что позволило увеличить время работы ускорителя на потребителей, особенно в летнее время;

Б) по текущему ремонту мостовых кранов, который позволил обеспечить размещение в ускорительном и экспериментальном зале ускорительного комплекса ФИАН «Пахра» тяжелого оборудования пользователей (МИФИ и ОИЯИ);

В) по подготовке и оборудованию новой пультовой для размещения новых потребителей пучкового времени и их контрольной аппаратуры
 в первую очередь из МИФИ и ИСАН.

Взятые в комплексе указанные мероприятия обеспечивают условия для успешного сотрудничества ФИАН с целым рядом научно-исследовательских организаций и организаций высшего профессионального образования, для эффективного использования имеющихся в ФИАН уникальных установок, для привлечения к работам на УСУ молодых специалистов, для расширения круга решаемых на УСУ задач по развитию научно-технологического комплекса России.

#### 13. Обобщение и выводы по результатам НИР

В ходе выполнения НИР изготовлены мишени на основе гетероструктур Pd и Ti и CVD-алмаза для последующих экспериментов. Получены профили концентрации атомов в поверхностном слое мишеней. Установки ГЕЛИС, ЭРГ и C-25P подготовлены к работе с исследуемыми мишенями. Детекторы прокалиброваны протонами, альфа-частицами и нейтронами. Тестовые измерения показали готовность установок к проведению экспериментов.

Создан нейтронный детектор для время-пролетных измерений, сопряженный со стартовой системой, основанной на регистрации протонов.

Исследованы выходы DD-реакции из мишеней Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> и Pd/PdO:D<sub>x</sub> при их облучении пучком ионов инертных газов.

Впервые показано, что воздействие пучка ионов Ne<sup>+</sup> в диапазоне энергий 10 – 20 кэВ на дейтерированную гетероструктуры Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> и Pd/PdO:D<sub>x</sub> приводит к стимулированию выходов DD-реакции.

Исследованы выходы DD-реакции в образцах CVD-алмаза и углерода при их облучении пучком ионов дейтерия на установке ГЕЛИС. Показано, что ориентация образца в пучке дейтронов оказывает влияние на величину выхода. Таким образом, показана возможность использования образцов CVD-алмаза для генерирования узконаправленных потоков нейтронов.

Исследовано стимулирование ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком релятивистских электронов на установке C-25P. Показана возможность использования электронных пучков для стимулирования ядерных реакций в твердотельных дейтерированных гетероструктурах.

Проведены измерения выходов продуктов ядерных реакций в процессе высоковольтного разряда и их зависимость от формы и материала электродов на установке ЭРГ. Показано, что воздействие высоковольтного разряда на дейтерированную мишень приводит к стимулированию DD-реакции с выходом 2.5 МэВ-ных нейтронов. При этом также происходит стимулирование генерации нейтронов с энергией > 10 МэВ, связанной с пока неизвестными процессами в высоковольтном разряде в воздухе.

## 14. Разработка отчетной документации в соответствии с нормативными актами заказчика

Полный отчетной документации разработан комплект был В соответствии с техническим заданием и календарным планом госконтракта, а также с действующим порядком приемки работ (этапов работ), выполненных по государственным контрактам, заключенным в рамках федеральной «Исследования и целевой программы разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы». В комплект входит:

1. Заключительный отчет о НИР.

2. Отчет о патентных исследованиях.

3. Ведомость соответствия результатов работы требованиям технического задания.

4. Акт о создании сцинтилляционного нейтронного детектора высокого разрешения для регистрации продуктов ядерных реакций на электронном пучке установки C-25P.

5. Отчет о достижении заданных значений программных индикаторов (с приложением направленных в печать статей (3 шт.), справок из редакций о приеме статей к печати (3 шт.), актов и договоров об оказании услуг сторонним организациям (по 6 шт.)).

6. Акт приемки выполненных работ.

7. Акт сдачи-приемки работ (финансовый).

8. Резюме проекта.

9. Сведения о численности и качественном составе исполнителей работ по государственному контракту.

10. Копия регистрационной карты НИР.

11. Сведения о закупках оборудования.

Соответствующие документы размещены в электронной форме в информационной системе https://sstp.ru, а также переданы в бумажной форме в Дирекцию научно-технических программ.

#### Заключение

1. Выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы по теме механизмов стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов. Обоснован выбор развиваемого направления исследований на уникальных установках ФИАН. Обоснована необходимость использования УСУ в целях изучения ядерных процессов, энергий, вызываемых частицами низких присутствующих в высоковольтном разряде или создаваемых ускорителями ионов и электронов, и оценка возможности использования таких процессов термоядерной энергетики, а также в астрофизических и иных ДЛЯ применениях. Изложены методики стимулирования ядерных реакций и излучений на границе твердого тела и плазмы высоковольтным разрядом и пучками ионов и электронов и обосновано их использование;

2. Проведены патентные исследования в целях обеспечения высокого уровня проводимых работ и создаваемой научной продукции, а также выявления результатов интеллектуальной деятельности, способных к правовой охране;

3. Разработаны эффективные методы измерения выхода продуктов ядерных реакций и излучений из твердотельных мишеней при воздействии на них пучками ионов, электронов и высоковольтного разряда;

4. Проведены подготовительные работы для проведения экспериментов по исследованию стимулирования ядерных реакций. В результате работ: изготовлены мишени на основе гетероструктур Pd, Ti и CVD-алмаза; проведена адаптация узлов установок ЭРГ, ГЕЛИС и C-25P к работе с исследуемыми мишенями; проведена калибровка детекторов с помощью источников и продуктов DD-реакции на установке ГЕЛИС; проведены тестовые измерения выходов ядерных реакций на установке C-25P;

5. Создан нейтронный детектор для время-пролетных измерений, включающий в себя блок нейтронных счетчиков, свинцовую защиту, стартовую систему на основе протонного счетчика, мишенную станцию, вакуумную систему и систему электроники для сбора и обработки информации;

6. Проведены исследования с использованием уникальных установок ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и С-25Р, расположенных на территории Российской Федерации. Показана возможность стимулирования ядерных реакций в дейтерированных мишенях (Pd, Ti) пучком ионов инертных газов. Измерены выходы ядерных реакций в образцах CVD-алмаза и углерода при их облучении пучком ионов дейтерия. Показана возможность стимулирования (Pd, Ti) ядерных реакций В дейтерированных мишенях пучком релятивистских электронов. Измерены выходы продуктов ядерных реакций в процессе высоковольтного разряда и исследована зависимость от формы и Показано, материала электродов. что проведенные исследования обеспечивают получение новых знаний и результатов в области новых перспективных материалов, нанотехнологий с использованием методов активного физического воздействия (высоковольтного разряда, а также пучков ионов и электронов).

7. Проведены мероприятия по модернизации уникальных установок ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и C-25P;

8. Обеспечено проведение исследований для сторонних организаций с использованием уникальных установок ФИАН ГЕЛИС, ЭРГ и С-25Р;

9. Проанализированы полученные результаты. Показано, что результаты, полученные в ходе выполнения проекта, будут важны для решения как фундаментальных, так и прикладных проблем в различных областях науки. В области термоядерной энергетики результаты актуальны: при создании систем накопления и хранения изотопов водорода (дейтерия, трития); при поиске путей снижения температур, необходимых для осуществления термоядерных реакций; в исследованиях радиационной

стойкости материалов, которые применяются в термоядерных установках. В области астрофизики результаты НИР связаны с измерением и уточнением вкладов в сечения термоядерных процессов, ответственных за энергетику звезд. В области ядерной физики результаты НИР связаны с измерением дополнительных вкладов в сечения ядерных реакций при низких энергиях. На основании полученных результатов подготовлены 3 статьи, которые приняты в печать и будут опубликованы в журнале «Краткие сообщения по физике ФИАН» в 2013 г.

10. Проведена оценка возможности применения полученных результатов. Показано, что результаты НИР могут иметь целый ряд практически важных применений, касающихся создания источников энергии на новых принципах (ядерный синтез при низких энергиях, безнейтронный синтез), синтезе новых материалов (локальное комбинированное воздействие жесткими излучениями и током высоковольтного разряда), выработки норм радиационной безопасности в высотной атмосфере и стратосфере (процессы генерации нейтронного И гаммаизлучения В атмосфере), помехоустойчивости низкоорбитальной и стратосферной техники (радио-, рентгеновское и гамма-излучение так называемых гигантских и высотных атмосферных разрядов в стратосфере и ионосфере). Сделаны рекомендации и предложения по использованию результатов НИР. Результаты проведенных исследований будут способствовать развитию приоритетных направлений технологий техники Российской Федерации, науки, И таких как, энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика. Результаты проведенных исследований можно использовать в критических технологиях Российской Федерации, таких как, водородная энергетика, технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы;

11. Проведена технико-экономическая оценка рыночного потенциала полученных результатов. Показано, что полученные в ходе выполнения НИР результаты имеют не только фундаментальный характер, но и способствуют развитию новых подходов к организации и проведению научных

исследований в различных областях современной науки. Развитие направления исследования низкоэнергетических ядерных реакций требует государственных инвестиций, имеет экономическую привлекательность для частных инвесторов. Новые подходы к стимулированию ядерных реакций высоковольтными разрядами и пучками частиц от различных источников могут быть востребованы на международном рынке новых наукоёмких технологий.

12. Разработан и реализован комплекс мероприятий, направленных на увеличение количества пользователей УСУ. Мероприятия, направленные на увеличение количества пользователей УСУ, разработаны и реализованы в тесном соответствии с утвержденными планами научно-исследовательской работы ФИАН, с планами модернизации УСУ, со сложившимися научно-техническими связями с другими организациями, с учетом возможного проведения на УСУ новых перспективных работ;

13. Проведено обобщение и сделаны выводы по результатам НИР;

14. Разработана отчетная документация в соответствии с требованиями технического задания, календарного плана и нормативными актами Заказчика.

#### Список использованных источников

- 1. В. А. Царев, Низкотемпературный ядерный синтез (обзор экспериментов)// УФН, (1990) 160, 11, 1—53.
- В. А. Царев. Аномальные ядерные эффекты в твердом теле: вопросы все еще остаются// УФН, (1992)162, 10, 65.
- V. A. Tsarev, D. H. Worledge, Cold fusion studies in the USSR// Fusion Technology, (1991) 22, 138.
- V. A. Chechin, V. A. Tsarev, M. Rabinovitz, Y. E. Kim. Critical review of theoretical models for anomalous effects in deuterated metals.// Int. Journal of Theor. Phys., (1994) 33 (3), 617.
- K. Langanke, H. J. Assenbaum, C. Rolf. Screening corrections in cold deuterium fusion rates// Zeitschrift Fur Physics. 1989. Kl. A. V.333. 317.
- J. Kondo. Cold Fusion in Metals//Journal of the Physical Society of Japan. 1989. V.58. P. 1869.
- L. L. Lohr. Electronic structure of palladium clusters: implications for cold fusion // Journal of Physical Chemistry. 1989. V.93. 4697.
- E. A. Stern. Criterion for cold fusion in the condensed state. //Univ. of Washington preprint, Seattle.1989.
- Z. Sun, D. Tomanek. Cold Fusion: How Close Can Deuterium Atoms Come Inside Palladium?// Physical Review Letters. 1989. V.63. 59.
- 10.A. J. Laggett, G. Baym. Can solid-state effects enhance the cold-fusion rate? // Nature, London. 1989. V.340. 45.
- 11. U. Greife, F. Gorris, M. Junker et al. Oppenheimer-Phillips effect and electron screening in d+d fusion reactions // Z. Phys. 1995. V.465. 107.
- 12. M. Junker, A. D'Alessandro, S. Zavatarelli et al. Cross section of <sup>3</sup>He
   (<sup>3</sup>He,2p)<sup>4</sup>He measured at solar energies // Physical Review. 1998. C57. 2700.
- H. Yuki, T. Sato, J. Kasagi, et al. The D+D reactions in metal at bombarding energies below 5 keV//. J.Phys.G: Nucl. Part. Phys.. 1989. 23. 1459.

- 14. M. Aliotta, F. Raiola, G. Gyurky et al. Electron screening effect in the reactions <sup>3</sup>He(d,p)<sup>4</sup>He and d(<sup>3</sup>He,p)<sup>4</sup>He// Nucl. Phys. 2001. A690. 790.
- 15. K. Czerski, A. Hulke, A. Biller et al. Enhancement of the electron screening effect for *d*+*d* fusion reactions in metallic environments // Europhys. Lett. 2001. 54. 449.
- 16. F. Raiola, P. Migliardi, G. Gyurky et al. Enhanced electron screening in d (d, p)t
- for deuterated Ta\*//European Physical Journal. 2002. A13. 377.
- F. Raiola, P. Migliardi, L. Gang, et al. Electron screening in d(d,p)t for deuterated metals and the periodic table// Physics Letters. 2002. B547. 193.

18. H. Yuki, J. Kasagi, A.G. Lipson et al. Anomalous enhancement of DD reaction
 in Pd and Au/Pd/PdO heterostructure targets under low-energy deuteron
 bombardment // JETP Lett. 1998. 68. 785.

- J. Kasagi, H. Yuki, T. Baba et al. Strongly Enhanced DD Fusion Reaction in Metals Observed for keV D+ Bombardment// Journal of the Physical Society of Japan. 2002. 71. 2881.
- 20. H.S. Bosch and G.M. Halle. Improved formulas for fusion cross-sections and thermal reactivities // Nucl. Fusion. 1994. 32. 611.
- 21. J. Rafelski, M. Gajda, D. Harley et al. Theoretical limits on cold fusion in condensed matter a parametric study // Preprint AZPH-TH/89-19-Tucson. 1989.
- T. Garel, J. C. Niel, H. Orland. Thermodynamics of ions in a crystal: possible application to cold fusion. Preprint Saclay PhT/89-87.-CEN. Saclay, France. 1989.
- 23. М.А. Негодаев, А.В. Багуля. Электрофизическая установка "Гелис" //Препринт ФИАН. 1996. № 11.
- 24. A.V. Bagulya, I.P. Kazakov, M.A. Negodaev, V.I. Tsekhosh, V.V. Voronov. In situ growth of superconducting Y-Ba-Cu-O thin films by ion beam sputtering method // Mater. Sci. Eng. 1993. B21. 5-9
- 25. R.B. Luban, M.A. Negodaev, A.V. Bagulya. Investigation of sputtering and kinetic secondary ion-electron emission of composite materials under the influence of an ion beam of medium energy // Vacuum. 1994. 44. 893-896.

- 26. I.I Arkhipov, A.E. Gorodetsky, A.P. Zakharov, B.I. Khripunov, V.V. Shapkin, V.V. Petrov, V.I. Pistunovich, M.A. Negodaev, A.V. Bagulya. Bulk retention of deuterium in graphites exposed to deuterium plasma at high temperature // J. Nucl. Mater. 1996. 233-237. 1202.
- 27. A.V. Markin A.V., V.P. Dubkov, A.E. Gorodetsky, M.A. Negodaev, N.V. Rozhanskii, F. Scaffidi-Argentina, H. Werle, C.H. Wu, R.Kh. Zalavutdinov, A.P. Zakharov. Codeposition of deuterium ions with beryllium oxide at elevated temperatures // J. Nucl. Mater. 2000. 283-287. 1094.
- 28. А.G. Lipson, A.S. Roussetski, А.В. Karabut, G.H. Miley, Усиление DD– реакции и генерация рентгеновского излучения, в сильноточном импульсном тлеющем разряде в дейтерии с Ті катодом при напряжениях 0,8 – 2,45 кВ // ЖЭТФ (2005) 127, 6, с. 1334 – 1349// JETP (2005)100, 1175
- 29. V. A. Chechin, V. A. Tsarev, On the Nonstationary Quantum-Mechanical Origin of Nuclear Reactions in Solids // Fusion Technology (1994), 25, 469.
- 30. П. И. Голубничий, В. А. Царев, В. А. Чечин, К вопросу об ускорительном механизме холодного ядерного синтеза.// Препринт ФИАН № 149, Москва, 1989.

31. Липсон А.Г., Русецкий А.С., Ляхов Б.Ф. и др. Краевые эффекты в термоядерном реакторе типа ITER, обусловленные усилением реакций DD/DT –синтеза в металлах при низкой энергии бомбардирующих частиц // Химия высоких энергий. 2008. т.42. №4. с. 361-365.

32. А.Г. Липсон, И.П. Чернов, А.С. Русецкий и др. Десорбция «горячих» атомов дейтерия из гетероструктуры Pd/PdO:D<sub>x</sub> при возбуждении ее водородной подсистемы// ДАН, (2009), т.**425**, №5, 621-625

 W. Kohn, L. Sham. Self-consistent equations including exchange and correlation effects.// Phys. Rev. 1965. 140. 1133.

34. И.П. Чернов, А.С. Русецкий, Д.Н. Краснов и др. Ядерные реакции в системах Pd/PdO:D<sub>x</sub> и Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> при их возбуждении ионизирующим излучением // ЖЭТФ, (2011), **139**, 6, с. 1088-1097

35. А.В.Багуля, О.Д. Далькаров, М.А. Негодаев, А.С. Русецкий, А.П.

Чубенко. Исследование выходов DD-реакций из гетероструктуры Pd/PdO:D<sub>x</sub> при низких энергиях на установке ГЕЛИС.// Краткие сообщения по физике ФИАН. (2012) №9, с. 3-12

36. А.В.Багуля, О.Д. Далькаров, М.А. Негодаев, А.С. Русецкий, А.П. Чубенко. Исследование выходов DD-реакций из гетероструктуры Ti/TiO<sub>2</sub>:D<sub>x</sub> при низких энергиях на установке ГЕЛИС.// Краткие сообщения по физике ФИАН. (2012) №12, с. 3-10

37. А.В.Багуля, О.Д. Далькаров, М.А. Негодаев и др. Исследование стимулирования выходов DD-реакций из гетероструктуры Pd/PdO:D<sub>x</sub> пучками ионов H<sup>+</sup> и Ne<sup>+</sup> на установке ГЕЛИС.// Краткие сообщения по физике ФИАН. В печати.

38. Э.Н. Цыганов. Ядерная физика. Ядерный синтез в кристаллах.// (2010), т
73, №12, с. 2036 – 2044

39. Огинов А.В., Чайковский С.А., Богаченков В.А., Шпаков К.В., Рентгеновское и ультрафиолетовое излучение фаз разряда длинной искры, Научная сессия МИФИ-2010, Сборник научных трудов. Т.П, М., 2010, с. 92-95.

40. Е.В.Орешкин, С.А.Баренгольц, А.В.Огинов, В.И.Орешкин, С.А.Чайковский, К.В.Шпаков, Тормозное излучение быстрых электронов в длинных газовых промежутках, ПЖТФ, 2011, том 37, выпуск 12, с.80-87.

41. A.V.Oginov, K.V.Shpakov, E.V.Oreshkin, S.A.Chaikovsky, Experimental investigation of initial phase of atmospheric discharges, Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics. Issue 29. – 2011, pp. 264-269.

42. A.V.Oginov, K.V.Shpakov, Registration system of optical radiation with ns-scale time resolution for atmospheric discharge's initial phase investigation, Uzhhorod University Scientific Herald. Series Physics. Issue 30. – 2011, pp. 233-240.

- 43. E. V. Oreshkin, S. A. Barengolts, S. A. Chaikovsky, A. V. Oginov, K. V. Shpakov et al., Bremsstrahlung of fast electrons in long air gaps, Phys. Plasmas 19, 013108 (2012); doi: 10.1063/1.3677267
- 44. A. V. Agafonov, A. V. Oginov, and K. V. Shpakov, Prebreakdown Phase in Atmospheric Discharges, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2012, Vol. 9, No. 4–5, pp. 380–383.
- 45. В. А. Богаченков, А. В. Огинов, С. А. Чайковский, К. В. Шпаков, Исследование влияния внешней инжекции электронов и состава окружающей среды на развитие атмосферного разряда, Вестник национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", 2012, том 1, № 2, с. 133–138.
- 46. A.V. Gurevich, V.P. Antonova, A.P. Chubenko, A.N. Karashtin, G.G. Mitko, M.O. Ptitsyn, V.A. Ryabov, A.L. Shepetov, Yu.V. Shlyugaev, L.I. Vildanova, K.P. Zybin, Strong Flux of Low-Energy Neutrons Produced by Thunderstorms.// PRL 108, 125001 (2012).
- 47. A.V. Agafonov, A.V. Bagulya, O. D. Dalkarov, M. A. Negodaev, A.V. Oginov,
  A. S. Rusetskiy, V. A. Ryabov, K.V. Shpakov. Observation of Neutron Bursts
  Produced by Laboratory High-Voltage Atmospheric Discharge // PRL 111, 115003
  (2013), DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.115003.
- 48. Broggini C, Bemmerer D, Guglimentti A, Menegazzo R // LUNA: Nuclear astrophysics deep underground // Ann.Rev.Nucl.Part.Sci 60, 53-73 (2010);
- 49. Bemmerer D., Confortola F., Lemut A. et al // Feasibility of low energy radiative capture experiments at the LUNA underground accelerator facility // Eur.Phys.J. A24, 313-319 (2005);
- 50. H. Costantini, D. Bemmerer, F. Confortola et al // The 3He(alpha,gamma)7Be Sfactor at solar energies: the prompt gamma experiment at LUNA // Nucl.Phys.A814, 144-158 (2008);
- 51. M. Anders, D. Trezzi, A. Bellini et al // Neutron-induced background by an alpha-beam incident on a deuterium gas target and its implications for the study of the 2H(alpha,gamma)6Li reaction at LUNA // Eur. Phys. J. A 49, 28 (2013);

- 52. В.Г. Ральченко, А.В. Савельев, А.Ф. Попович, И.И. Власов, С.В. Воронина,
- Е.Е. Ашкинази, Двухслойные теплоотводящие диэлектрические подложки алмаз-нитрид алюминия.// Микроэлектроника, 2006, Т.35, №4, с. 243-248.
- 53. Гордеев С.К., Ральченко В.Г., Негодаев М.А.. Карабутов А.В., Белобров П.И., Полевой эмиттер электронов и способ его изготовления (варианты). Патент РФ №2150154 . Приоритет от 18.11.1998. Бюллетень изобрет., №15 (2000).
- 54. И.П. Чернов, Ю.П. Коротеев, Эволюция электронной структуры и спектра возбуждения палладия при абсорбции водорода. // ДАН (2008) 420, №6, с.758.