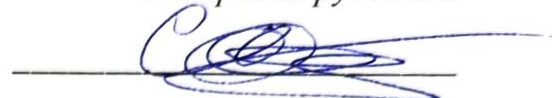


ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ ИМ. Г.Н. ФЛЕРОВА

*На правах рукописи*



**Соловьев Дмитрий Игоревич**

**Расчетные и экспериментальные характеристики нового  
газонаполненного сепаратора DGFRS-2 и моделирование  
ионной оптики газонаполненного сверхпроводящего соленоида  
GASSOL**

Специальность - 1.3.2 «Приборы и методы экспериментальной физики»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2023

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва  
Объединенного института ядерных исследований

**Научный руководитель** – *Утенков Владимир Климентьевич*  
*доктор физико-математических наук*

**Официальные оппоненты** –

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте  
Объединенного института ядерных исследований в информационно-  
телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: [http://\\_\\_\\_\\_\\_](http://_____). С печатной  
версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ  
(г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

А.Г.Попеко

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Исследование ядер сверхтяжелых элементов (СТЭ) стало в последние годы одним из важнейших и интереснейших направлений современной ядерной физики. Существование области СТЭ было предсказано в середине 1960-х годов, после чего были проведены многочисленные эксперименты по их синтезу и поиску в природных объектах. Однако все они оказались безуспешными. Новый этап исследований был начат в ЛЯР ОИЯИ в конце 1990-х годов с использованием модернизированных установок (ускоритель У-400, сепаратор DGFRS), которые обеспечили повышение чувствительности эксперимента на 2-3 порядка по сравнению с той, которая была достигнута в первых опытах. Эти эксперименты привели к синтезу ядер новых, наиболее тяжелых элементов от 113 (Nh) до 118 (Og), было изучено более 50 новых изотопов элементов от 104 до 118. Опыты экспериментально доказали существование сверхтяжелых ядер [1].

Однако было показано, что сечения образования ядер более чем на порядок падают при переходе от изотопов Fl и Mc к изотопам Og. Более того, для синтеза еще более тяжелых ядер с  $Z > 118$  необходимо повышать атомный номер бомбардирующих частиц, что еще на порядок или более понизит сечение реакций. Синтез изотопов известных элементов, но с большим или меньшим числом нейтронов, также осложняется заметным падением сечений их образования. Кроме того, для глубокого изучения радиоактивных свойств известных ядер необходимо было существенно повышать число ядер, синтезируемых в эксперименте.

Это потребовало создания в ЛЯР нового экспериментального комплекса «Фабрика Сверхтяжелых Элементов» на базе циклотрона ДЦ-280 [2] с интенсивностью ускоряемых частиц почти на порядок выше, чем на У-400. Для синтеза и регистрации ядер был спроектирован новый сепаратор DGFRS-2, основная задача которого – увеличить трансмиссию синтезируемых продуктов реакций полного слияния к его фокальной плоскости [A3, A5] и одновременно существенно подавить число фоновых ядер на детекторах.

Помимо исследования ядерных свойств СТЭ, большой интерес представляет исследование их химических свойств. Релятивистские эффекты существенным образом влияют на химические свойства СТЭ. Из-за большого заряда ядра скорость электронов на внутренних оболочках приближается к скорости света, что приводит к релятивистскому увеличению массы электронов и изменению структуры электронных оболочек. Для проведения дальнейших экспериментов по изучению химических свойств СТЭ в ЛЯР ОИЯИ необходимо создание новой сепарирующей установки. Требованиями к ней будет высокая эффективность трансмиссии СТЭ в камеру малого размера и возможность отделить СТЭ от

фоновых продуктов реакции и прямого пучка. Результаты экспериментов на соленоиде SOLITAIRE [3] и предварительные результаты расчетов [4] показывают, что такой установкой может стать газонаполненный сверхпроводящий соленоид GASSOL.

### **Цель работы**

Целью данной работы являлось изучение характеристик сепаратора DGFRS-2 и создание расчетной модели сепаратора GASSOL. Изучение DGFRS-2 проводилось как на основе созданной в фреймворке Geant4 расчетной модели сепаратора, так и на основе экспериментальных данных, полученных в тестовых реакциях  $^{170}\text{Er}(^{48}\text{Ca},4n)^{214}\text{Ra}$ ,  $^{174}\text{Yb}(^{48}\text{Ca},5n)^{217}\text{Th}$  и  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$ . После верификации расчетной модели и используемых алгоритмов, следующим этапом работы являлось создание модели сепаратора GASSOL и оценка его перспективности в экспериментальном изучении химических свойств СТЭ. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Создать набор программ для анализа данных, полученных в экспериментах;
2. Разработать методики определения оптимальных параметров сепаратора и его экспериментальных характеристик;
3. Исследовать необходимые методы и алгоритмы для проведения расчетов движения ионов в газонаполненных сепараторах, разработать и имплементировать отсутствующие алгоритмы в структуру Geant4, создать расчетную модель сепаратора DGFRS-2;
4. Исследовать экспериментальные характеристики сепаратора DGFRS-2;
5. Провести сравнение экспериментальных и расчетных характеристик сепаратора;
6. На основе верифицированной модели DGFRS-2 создать расчетную модель GASSOL и оценить его возможности для изучения химических свойств СТЭ.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Создан набор программ для проведения автоматической калибровки многострипового детектора, определения статистической и систематической погрешности измерения энергии альфа-частиц, off-line анализа данных и поиска коррелированных цепочек распада тяжелых ядер. Программа использована в тестовых опытах  $^{170}\text{Er}(^{48}\text{Ca},4n)^{214}\text{Ra}$ ,  $^{174}\text{Yb}(^{48}\text{Ca},5n)^{217}\text{Th}$  и  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$  и экспериментах по синтезу изотопов Ds ( $Z = 110$ ), Cn ( $Z=112$ ), Fl ( $Z=114$ ) и Mc ( $Z=115$ ), проведенных на Фабрике СТЭ.
2. Разработаны и имплементированы новые алгоритмы моделирования в структуру Geant4, создана программа для описания образования тяжелых атомов в мишени и движения ионов с учетом перезарядки в среде разреженного водорода под действием магнитных полей оптических элементов сепаратора. Проведены расчеты для выбора оптимальных параметров магнитов сепаратора DGFRS-2 в разных экспериментах, вычислены

характеристики сепаратора (дисперсия дипольных магнитов, трансмиссия сепаратора при разной толщине мишени, зависимость размеров изображения ионов в фокальной плоскости от давления газа).

3. Исследованы экспериментальные характеристики DGFRS-2 в тестовых реакциях  $^{170}\text{Er}(^{48}\text{Ca},4n)^{214}\text{Ra}$ ,  $^{174}\text{Yb}(^{48}\text{Ca},5n)^{217}\text{Th}$  и  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$ . Проведен выбор оптимальных значений токов в оптических элементах сепаратора. Измерены дисперсии дипольных магнитов, распределения синтезированных в различных реакциях ядер в фокальной плоскости DGFRS-2, фактор подавления фоновых частиц, зависимость трансмиссии сепаратора от давления газа. Определено оптимальное давление газа, при котором достигается максимальная трансмиссия.
4. Проанализировано поведение зарядов тяжелых ионов в водороде в зависимости от их скорости. Предложена новая систематика для описания среднего значения заряда при различных давлениях.
5. Проведено сравнение экспериментальных характеристик сепаратора с результатами расчетов и продемонстрировано их хорошее согласие. Созданная программа была использована при выборе тока в магнитах в экспериментах синтезу изотопов Ds ( $Z = 110$ ), Sn ( $Z=112$ ), Fl ( $Z=114$ ) и Mc ( $Z=115$ ) в реакциях полного слияния  $^{232}\text{Th}+^{48}\text{Ca}$ ,  $^{238}\text{U}+^{48}\text{Ca}$ ,  $^{242}\text{Pu}+^{48}\text{Ca}$  и  $^{243}\text{Am}+^{48}\text{Ca}$ , проведенных на Фабрике СТЭ.
6. На основе расчетной модели DGFRS-2 создана модель сверхпроводящего газонаполненного соленоида GASSOL. Проведено моделирование траекторий СТЭ в GASSOL, сделаны оценки размера изображения СТЭ в фокальной плоскости установки. Оценены возможности установки по изучению химических свойств СТЭ. На основе анализа траекторий, предложен новый способ подавления продуктов фоновых реакций.

#### **Научная новизна:**

1. Доработаны и имплементированы в структуру Geant4 методы моделирования кинематики продуктов реакции полного слияния в мишени и движения полученных ионов с учетом перезарядки в среде разреженного газа. Созданная на их основе расчетная модель сепаратора хорошо воспроизводит полученные экспериментальные данные.
2. Определены экспериментально и на основе расчетов характеристики нового газонаполненного сепаратора DGFRS-2. Исследовано влияние токов в магнитных элементах и давления газа на трансмиссию и размеры изображения синтезированных ядер в фокальной плоскости.
3. Предложены новые формулы для описания среднего значения заряда тяжелых ионов, движущихся с различной скоростью в разреженном водороде при различных давлениях.

4. Рассчитана ионная оптика нового газонаполненного соленоида GASSOL. Обоснован новый способ подавления фоновых частиц в соленоидальных сепараторах.

#### **Научная и практическая значимость.**

Характеристики сепаратора являются важнейшей составляющей при планировании экспериментов по синтезу СТЭ. На основе вычисленной трансмиссии происходит анализ возможностей постановки эксперимента, определение необходимой дозы пучка, времени проведения эксперимента и числа синтезированных ядер.

Созданная модель позволяет определять оптимальные параметры магнитных элементов сепаратора для исследования СТЭ и достигать высокой эффективности работы сепаратора.

Изучение химических свойств СТЭ и их отличия от более легких гомологов является важной задачей атомной физики, позволяющей лучше понять изменение структуры электронных оболочек под влиянием релятивистского эффекта. Новый сепаратор GASSOL предлагает расширенные возможности для изучения химических свойств СТЭ, расчеты показывают, что за счет малых размеров изображения в фокальной плоскости эффективность экспериментов может увеличиться приблизительно на порядок.

**Степень достоверности** полученных результатов обеспечивается хорошим согласием экспериментальных и расчетных характеристик сепаратора (глава 3) и результатами экспериментов по синтезу 115 элемента, продемонстрировавших в два раза более высокую трансмиссию сепаратора по сравнению с DGFRS. Расчетная эффективность и размеры изображения ядер в фокальной плоскости установки GASSOL дает схожие результаты с экспериментальными данными установки SOLITAIRE [3], использующей сверхпроводящий соленоид для изучения реакций полного слияния с образованием более легких ядер.

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие в постановке экспериментов по изучению сепаратора DGFRS-2. Лично автором были разработаны программы по анализу данных и калибровке детекторов установки. В совместной работе с научным руководителем автором были разработаны методы определения оптимальных параметров магнитных элементов сепаратора на основе экспериментальных данных.

Расчетная модель DGFRS-2 создавалась в сотрудничестве с Коврижных Н.Д. при определяющей роли автора. Анализ результатов расчета и сравнение с экспериментальными данными проводилось лично автором.

Расчетная модель GASSOL создавалась в сотрудничестве с Коврижных Н.Д. при определяющей роли автора. Оценка количества атомов СТЭ на криодетекторах проводилась лично автором. Разработка новой сепарирующей системы на основе статичной турбины

проводилась в сотрудничестве с Казариновым Н.Ю. и Гульбекиным Г.Г. при определяющей роли автора.

### **Апробация работы.**

Результаты диссертации докладывались на:

1. Совещание «Сверхтяжелые атомы», Дубна, декабрь 2022
2. The XXVI International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2022), Дубна, октябрь 2022
3. LXXII Международная конференция "Ядро-2022: Фундаментальные вопросы и приложения", Москва, июль 2022
4. Совет РАН по физике тяжелых ионов, Санкт-Петербург, июль 2022
5. Совещание «Сверхтяжелые элементы», Дубна, июль 2021
6. Семинары ЛЯР ОИЯИ 18.11.2020 и 11.03.2022
7. Вторая премия Объединенного Института Ядерных Исследований за работу «Новый газонаполненный сепаратор DGFRS-2» за 2022 год.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 114 страниц с 51 рисунком и 9 таблицами. Список литературы содержит 126 наименований.

Во **Введении** рассматривается научная проблема, история открытия сверхтяжелых ядер, обосновывается актуальность повышения чувствительности исследований. Сформулированы цель данной работы, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** посвящена описанию конструкции сепаратора DGFRS-2 и экспериментальному определению его характеристик [A3,A5]. Описаны результаты анализа данных экспериментов и вычисленные на их основе характеристики сепаратора DGFRS-2: трансмиссия, степень подавления фоновых частиц, размеры изображения продуктов реакции полного слияния в фокальной плоскости, влияние давления газа внутри сепаратора на размеры изображения и трансмиссию сепаратора. Также описывается созданная программа для автоматической калибровки детекторной системы DGFRS-2.

Принцип работы газонаполненных сепараторов основан на различии магнитной жесткости в разреженном газе продуктов реакции полного слияния и ускоренных ионов. Синтезированный остаток испарения (ОИ) вылетает из тонкой мишени с импульсом, равным импульсу налетающего ядра-снаряда и начинает движение внутри объема сепаратора, заполненного газом при давлении около 1 Торр. Из второго закона Ньютона и закономерностей движения заряженной частицы в однородном магнитном поле следует

формула, определяющая магнитную жесткость заряженной частицы,  $B\rho = \frac{mv}{q}$ , где  $\rho$  – радиус кривизны траектории,  $m$  – масса ядра,  $v$  – скорость ядра,  $q$  – заряд иона,  $B$  – компонента магнитного поля, перпендикулярная движению ОИ.

Масса ядер определяется из свойств их распада, их скорость определяется из кинематики реакции полного слияния по закону сохранения импульса. Вылетающие из мишени синтезированные атомы сильно ионизированы ( $q \approx 20^+$ ) с широким распределением возможных зарядов. В газонаполненных сепараторах атомы сталкиваются с молекулами газа, что приводит к обмену электронами, из-за чего зарядовое распределение ОИ сужается, и средняя величина равновесного заряда становится равной примерно  $6^+$ . Магнитная жесткость синтезируемых атомов, таким образом, примерно в три раза выше, чем у  $^{48}\text{Ca}$ , из-за чего ионы  $^{48}\text{Ca}$  движутся по меньшему радиусу внутри дипольных магнитов DGFRS-2.

Схема сепаратора DGFRS-2 представлена на рисунке 1. DGFRS-2 имеет ионно-оптическую схему  $Q_v D_h Q_h Q_v D$  [A3,A5], где  $h$  означает фокусирование ионов по горизонтали,  $v$  – по вертикали. Квадруполь Q1 фокусирует ОИ в вертикальном направлении так, чтобы большая часть продуктов реакции полного слияния проходила через зазор дипольного магнита D1. Дипольный магнит D1 фокусирует ОИ в горизонтальном направлении из-за наклонной задней поверхности полюса. Диполь D1 отделяет ОИ от частиц пучка и подавляет большую часть фоновых частиц, которые могут достичь фокальной плоскости сепаратора. Квадруполь Q2 и Q3 фокусируют ОИ на детектор в фокальной плоскости сепаратора в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Диполь D2 снижает фон от заряженных частиц высокой энергии, образующихся в прямых реакциях ионов пучка с газом и стенками DGFRS-2.

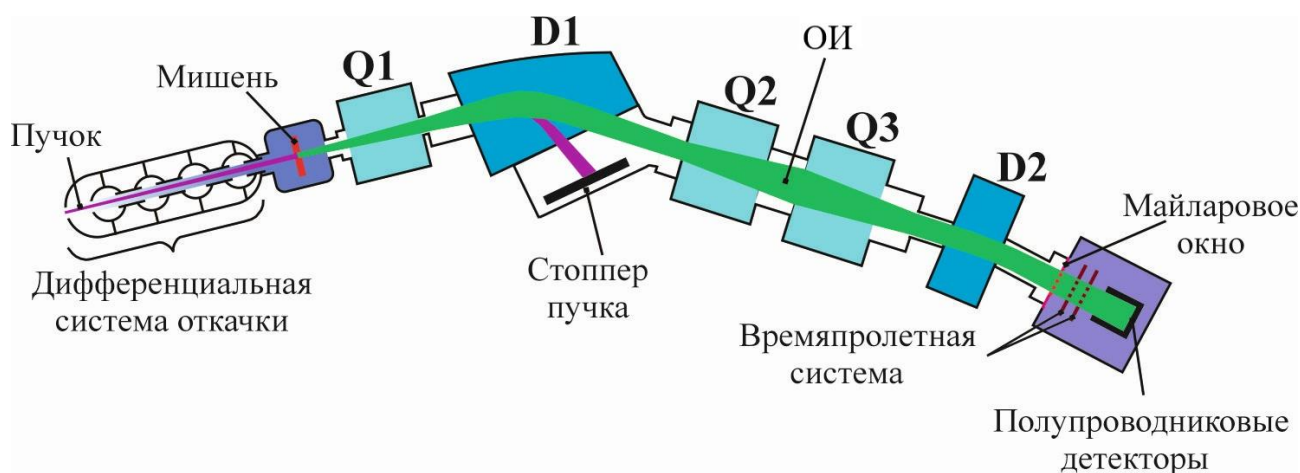


Рисунок 1. Схема DGFRS-2. Дифференциальная система откачки и блок вращающейся мишени установлены перед сепаратором. В конце сепаратора показана детекторная система, включающая в себя майларовое окно, многопроволочные пропорциональные камеры и кремниевые детекторы.

Характеристики магнитов DGFRS-2, как и расстояния до магнитных элементов приведены в таблицах 1, 2 и 3. В главе 1 приведено описание мишенного устройства,



системы дифференциальной откачки газа из сепаратора, стоппер пучка и система детекторов и набора данных.

Таблица 1. Характеристики дипольных магнитов.

Магнит	D1	D2
Угол поворота, град.	31.5	10
Радиус поворота, м	1.86	2.58
Расстояние между полюсами, мм	132	120
Максимальное поле, Тл	1.80	1.81
Угол входа, град.	-8.4	0
Угол выхода, град.	-44.5	0

Таблица 2. Характеристики квадрупольных магнитов.

Магнит	Q1 <sub>v</sub>	Q2 <sub>h</sub>	Q3 <sub>v</sub>
Максимальный градиент поля (Тл/м)	13.3	5.4	5.4
Радиус отверстия (мм)	75	150	150
Длина полюса (мм)	420	520	520
Эффективная длина (мм)	456	600	601

Таблица 3. Расстояния в мм.

Мишень – Q1	734
Q1 – D1	1170
D1 – Q2	1795
Q2 – Q3	1000
Q3 – D2	1457
D2 – Майларовое окно	916
Майларовое окно – сборка детекторов	335
Мишень – сборка детекторов	7407

В качестве имплантационного позиционно-чувствительного детектора на DGFRS-2 используются два DSSD размерами 128×48 мм<sup>2</sup>, расположенных друг за другом таким образом, что общая площадь фокальной плоскости, покрываемая ППД составляет 220×48 мм<sup>2</sup> (рисунок 2). Детектор окружен 8 стриповыми кремниевыми детекторами, каждый с активной областью 60×120 мм<sup>2</sup>. Каждый детектор имеет 8 стрипов шириной 15 мм, параллельных плоскости DSSD. Они формируют стенки детекторной коробки и предназначены для регистрации альфа-частиц и осколков деления, вылетающих из имплантационных детекторов.

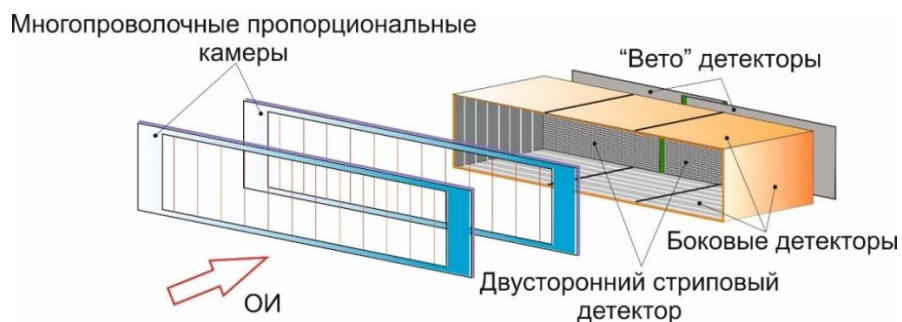


Рисунок 2. Схема детекторной системы DGFRS-2.

В экспериментах на сепараторе DGFRS-2 калибровка детекторов осуществлялась на основе экспериментальных данных, полученных в реакции  ${}^{\text{nat}}\text{Yb}({}^{48}\text{Ca}, \text{xn}){}^{215-217}\text{Th}$ . Энергии альфа-частиц продуктов данной реакции и их дочерних ядер хорошо известны и варьируются в достаточно широком диапазоне от 6.04 до 9.26 МэВ. Каждый из стрипов обладает несколько различающимися свойствами, что приводит к отличиям в получаемых энергетических спектрах с разных стрипов. Для калибровки детекторной системе на основе программного комплекса ROOT была написана программа автокалибровки, определяющая коэффициенты калибровки, погрешность их определения и статистическую погрешность. Пример результатов автокалибровки детекторов показан на рисунке 3.

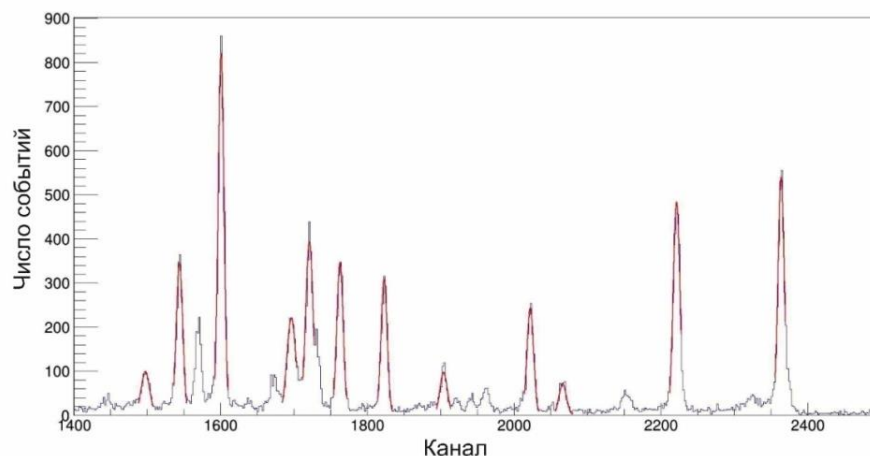


Рисунок 3. Экспериментальный спектр (синим) с результатами автокалибровки (красным).

Положение максимума распределения ионов по горизонтали существенно зависит от их заряда в газе. В большей части существующих в различных лабораториях мира газонаполненных сепараторах используется гелий. Однако, заряды ионов в водороде и его масса меньше. Это существенно повышает трансмиссию синтезируемых ионов к детекторам (за счет снижения многократного рассеяния) и степень отделения от фоновых частиц (из-за большей разницы в зарядах). Поэтому сепараторы DGFRS и DGFRS-2 работают на водороде [5, A3, A5]. Все известные данные, полученные для разреженного водорода [6], а также новые данные [A4] были использованы для создания новых, более точных формул для

вычисления зарядов (рисунок 4). Точность определения заряда для СТЭ с зарядом  $q \approx 6^+$  составляет около 2% [A4].

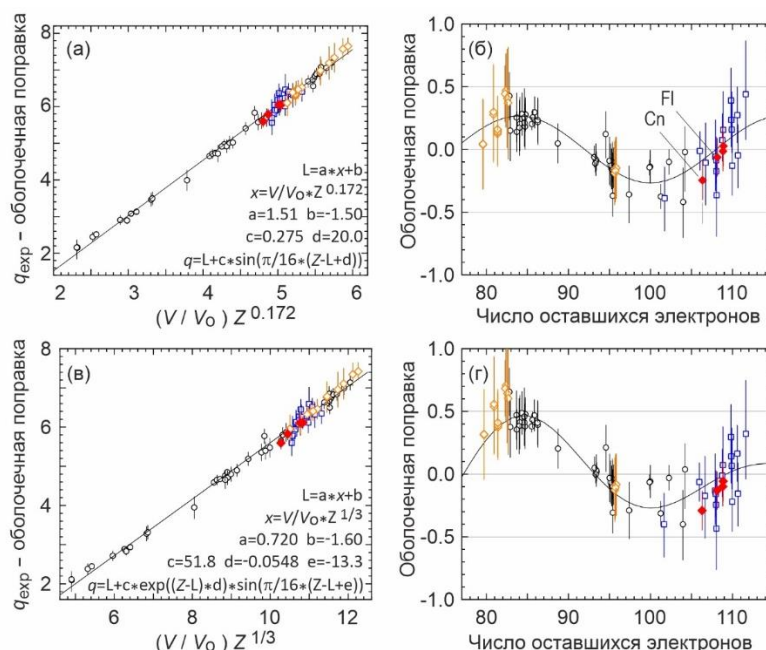


Рисунок 4. (а), (в) Средний экспериментальный заряд  $q_{\text{exp}}$  ионов с  $Z$  от 86 до 118 с вычитенной оболочечной поправкой, (б) и (г) - оболочечная поправка. Формулы для линейной зависимости и оболочечной поправки указаны на рисунках (а) и (в), оболочечной поправке формулы (а) соответствует рисунок (б), формулы (в) – (г). Заряды, измеренные на DGFRS для ионов с  $Z = 88-108$  и  $Z = 102-118$  [6] показаны черными кругами и синими квадратами соответственно. Заряды ионов с  $Z = 86, 88, 90$  и  $102$ , полученные при давлении  $P = 1.15$  мбар на DGFRS-2 показаны оранжевыми открытыми кругами. Заряды для Cn и Fl [A4], измеренные при 0.9 и 1.15 мбар на DGFRS-2 показаны красными ромбами.

Также было изучено влияние давления газа на величину заряда (эффект плотности). При увеличении давления заряд увеличивается, выходя затем на некоторое постоянное значение. Предложена новая формула, позволяющая вычислять заряды в водороде при различном давлении в диапазоне 0.5 – 2.6 мбар [A4].

В целом, анализ экспериментальных данных показал:

1. Сепаратор DGFRS-2 обладает высокой дисперсией (35 мм/% $V\rho$  - суммарная дисперсия двух дипольных магнитов). Данный факт усложняет настройку сепаратора и выбор токов в дипольных магнитах, также высокая дисперсия приводит к широкому горизонтальному распределению ОИ в фокальной плоскости (рисунок 5). Ввиду этого было принято решение увеличить ширину используемых полупроводниковых детекторов с 128 мм до 220 мм и создать новую систематику средних зарядов тяжелых ионов в разряженном водороде.

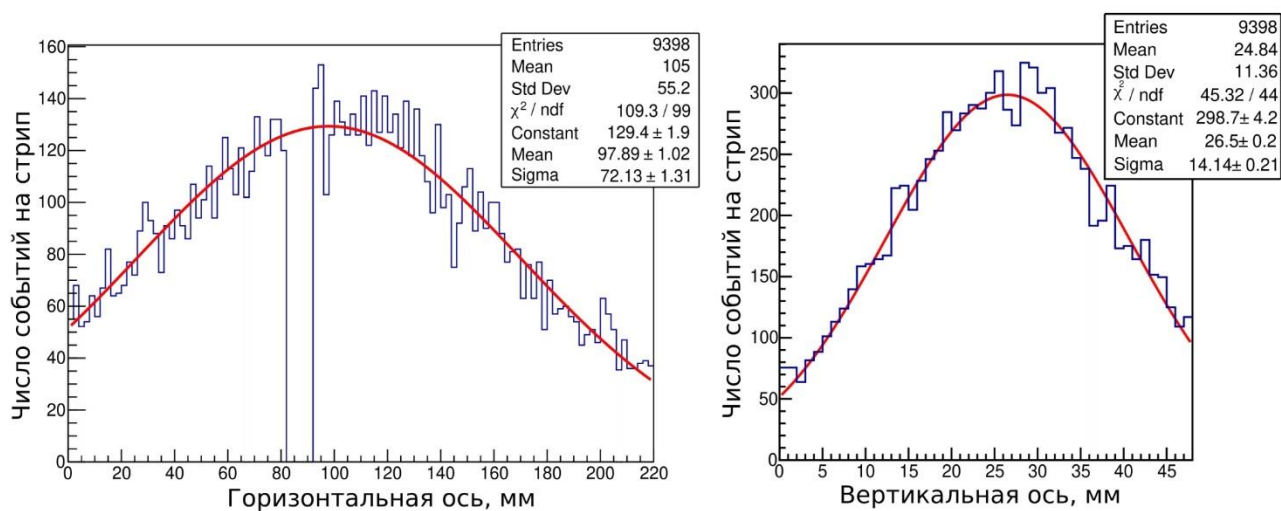


Рисунок 5. Позиционные распределения  $^{252}\text{No}$  в фокальной плоскости.

- Вычисленная на основе тестовых реакций трансмиссия DGFRS-2 составляет около 60%, что в два раза выше трансмиссии DGFRS. Данный факт также подтверждается результатами экспериментов по синтезу 115 элемента [А6]: выход ядер  $^{288,289}\text{Mc}$  увеличился в более чем два раза на ту же дозу, прошедшую через мишень.
- Размеры изображения в фокальной плоскости сильно зависят от давления: в вертикальной плоскости ширина изображения растет практически линейно с увеличением давления, в горизонтальной плоскости ширина сначала уменьшается, достигает некоторого минимума и затем начинает расти с дальнейшим увеличением давления. Оптимальное давление водорода составило около 0.7-1 Торр.
- Значение тока в первом квадруполе влияет только на эффективность сепаратора и не влияет на размеры изображения ОИ в фокальной плоскости.
- Токи во втором и третьем квадруполях значительным образом влияют на размеры изображения в фокальной плоскости. Оптимальные значения токов в Q2 и Q3 связаны линейно, коэффициенты линейной взаимосвязи зависят от изучаемой реакции.
- На основе созданной программы для калибровки детекторов определены погрешность калибровки и энергетическое разрешение детекторов. Погрешность калибровки детекторов с использованием данных реакции  $^{174}\text{Yb}(^{48}\text{Ca}, 5n)^{217}\text{Th}$  составляет около 4 кэВ (одно стандартное отклонение) для энергетического диапазона альфа-частиц 9-11 МэВ. Энергетическое разрешение детекторов составляет около 20 кэВ.

Существенной характеристикой сепаратора является его способность подавлять фоновые частицы – ионы пучка, продукты реакций передач и т.д. Особенно важным подавление фона становится в экспериментах на циклотроне ДЦ-280, где интенсивность пучка до 10 раз выше, чем на У-400, где установлен DGFRS.

На рисунке 6 приведены энергетические спектры, измеренные в реакции  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$  на двух сепараторах [A3]. Приведены энергетические спектры всех частиц, прошедших сепараторы, и спектр только ядер отдачи  $^{252}\text{No}$ . Сравнение показывает, что для DGFRS-2 практически все сигналы с энергией выше 9 МэВ принадлежат ОИ  $^{252}\text{No}$ , в то время как на DGFRS вклад ядер  $^{252}\text{No}$  составляет лишь малую часть от общего числа частиц, прилетевших из сепаратора. Из этого следует, что DGFRS-2 имеет фактор подавления фона в 200 раз выше, чем DGFRS. Подобное уменьшение фона позволяет регистрировать цепочки распада ядер более надежным образом и увеличивает время жизни фокальных детекторов.

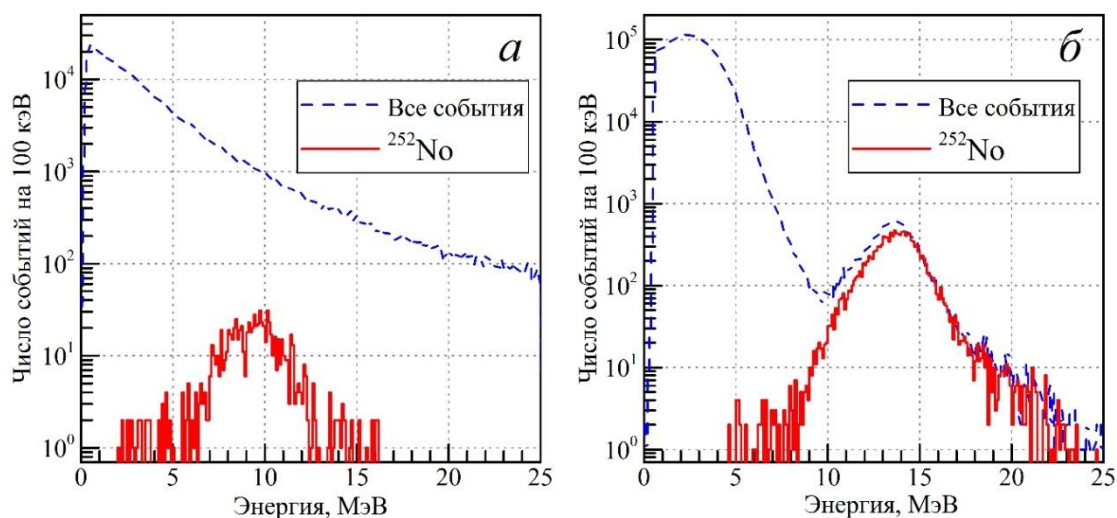


Рисунок 6. Энергетические спектры всех частиц, прошедших к детекторам (верхние синие линии), и ядер  $^{252}\text{No}$ , полученных в реакции  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$  (нижние красные линии), для сепараторов DGFRS (а) и DGFRS-2 (б).

Полученные экспериментальные данные сравниваются с результатами расчетной модели сепаратора DGFRS-2 в главе 3.

**Вторая глава** посвящена созданию расчетной модели DGFRS-2, где описаны основные алгоритмы и методы расчета [A1,A5]. Увеличенное по сравнению с DGFRS количество магнитных элементов усложняет настройку и выбор параметров DGFRS-2 для проведения эксперимента. Для достижения высокой эффективности сбора необходимо провести моделирование прохождения ОИ через DGFRS-2 с учетом сложной геометрии его камеры и определить оптимальные значения полей в магнитах. Расчетное изучение характеристик сепаратора проводилось на основе фреймворка Geant4 [7]. Для моделирования траекторий ОИ в объеме сепаратора ряд новых процессов был имплементирован в структуру Geant4. Проанализированы и изучены основные алгоритмы, необходимые для создания модели:

1. Образование ОИ в толщине мишени.
2. Оценка изменения направления импульса ОИ за счет испарения нейтронов.

3. Расчет многократного рассеяния ОИ в мишени и объеме сепаратора.
4. Расчет энергетических потерь в мишени и объеме сепаратора.
5. Моделирование перезарядки ОИ.
6. Расчет движения ОИ в магнитных полях установки.

Процесс образования составного ядра и последующего его охлаждения за счет испускания одного или нескольких нейтронов описан на основе упрощенной статистической модели ядра и имплементирован в структуру Geant4. Из кинетической энергии ядра-снаряда и дефектов масс [8,9] рассчитывается энергия возбуждения составного ядра, после чего моделируется его охлаждение за счет испускания нейтронов с кинетической энергией, разыгрываемой по распределению Максвелла. После охлаждения, ОИ начинает движение в толще мишени, теряя энергию и испытывая упругое рассеяние. Потери энергии рассчитываются на основе пробегов SRIM [10], многократное рассеяние симулируется с помощью реализованной в Geant4 модели [11]. Вылетая из мишени, ОИ испытывает многократные столкновения с молекулами среды, в результате которых происходит обмен электронами и изменение зарядовых состояний ОИ. Моделирование данного процесса основано на использовании экспериментально измеренного среднего значения заряда ОИ в водороде [6, A1, A4, A5]. Численное интегрирование уравнений движения в магнитном поле осуществляется с помощью одной из схем Рунге-Кутты, реализованной в Geant4. На рисунке 7 приведены результаты моделирования 100 траекторий  $^{252}\text{No}$ .

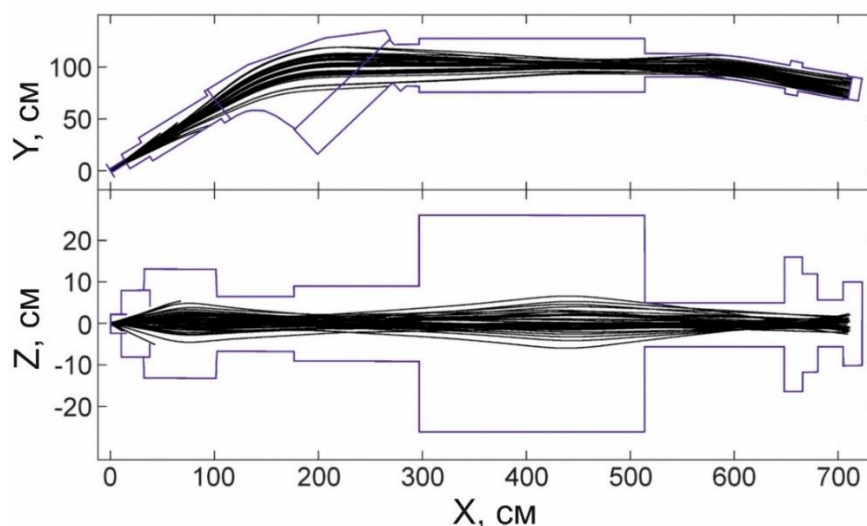


Рисунок 7. Проекция смоделированных траектории ОИ – продуктов реакции  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252}\text{No}$  на горизонтальную (вверху) и вертикальную плоскости (внизу).

В **третьей главе** представлено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета [A1, A5]. Верификация проводилась на основе сравнения расчетных и экспериментальных размеров изображения синтезированных ядер в фокальной плоскости при изменении значений токов в магнитах (рисунок 8). Достигнутое хорошее согласие

позволяет использовать созданные алгоритмы для определения оптимальных параметров сепаратора в реакциях синтеза СТЭ и для создания новых установок на Фабрике СТЭ.

Учет процесса перезарядки позволил описать изменение размеров изображения в фокальной плоскости при изменении давления. Сравнение измеренных и расчетных ширин распределений при различных давлениях водорода представлено на рисунке 9. Видно, что модель достаточно хорошо воспроизводит экспериментальные данные.

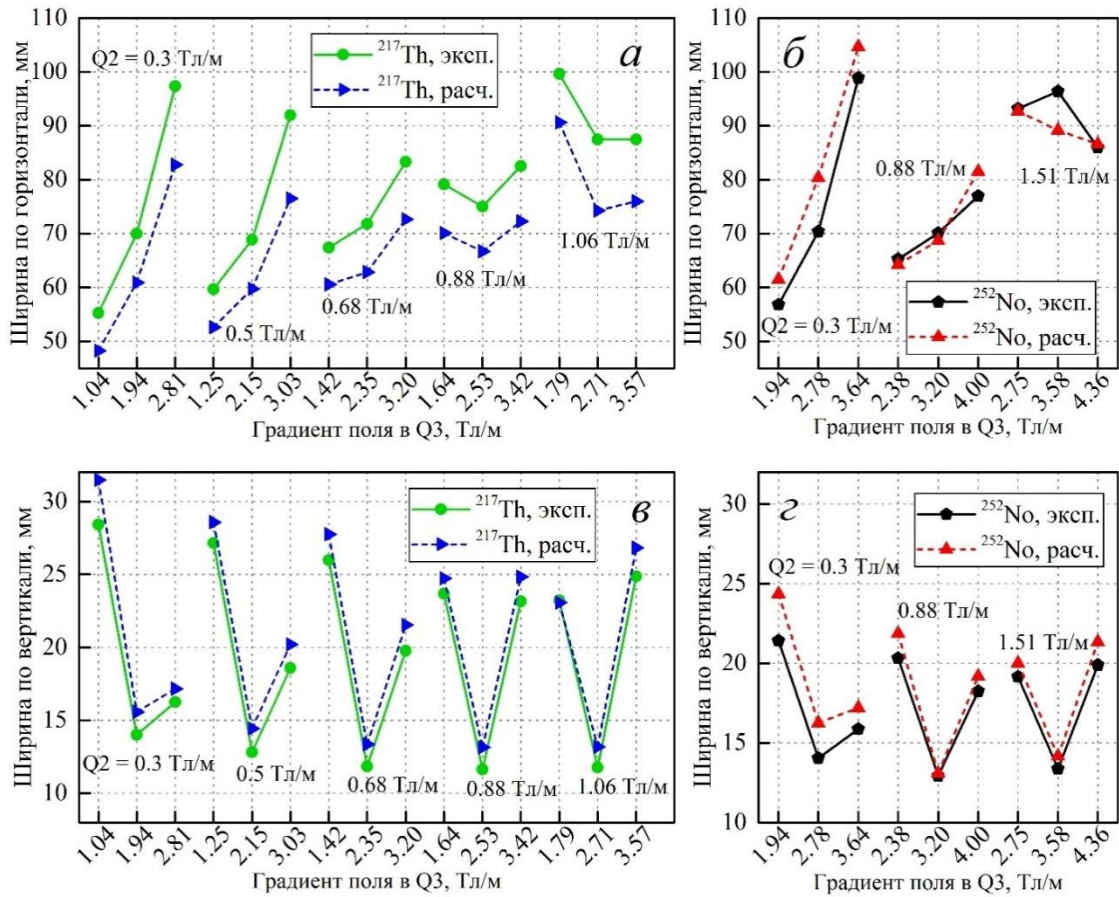


Рисунок 8. Сравнение экспериментальных и расчетных размеров изображения для двух реакций  $^{174}\text{Yb}(^{48}\text{Ca},5n)^{217}\text{Th}$  (а и в) и  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca},2n)^{252}\text{No}$  (б и г). По оси абсцисс указано по три значения градиента поля в линзе  $Q_3$  для каждого из указанных на рисунке значений градиента в  $Q_2$ . По оси ординат приведены величины ширин распределений указанных ядер (стандартные отклонения) по горизонтали (а и б) и вертикали (в и г).

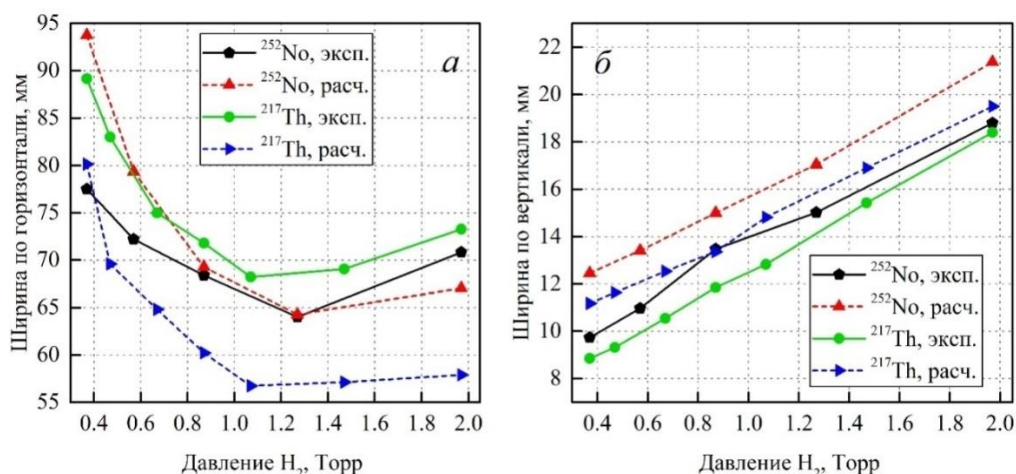


Рисунок 9. Зависимость экспериментальных и расчетных размеров горизонтального (а) и вертикального (б) изображения от давления газа.

Хорошее согласие с экспериментальными данными позволяет вычислять оптимальные значения Q2 и Q3 для изучаемых реакций. На рисунке 10 представлена расчетная зависимость эффективности сбора от полей в Q2 и Q3 для реакции  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252}\text{No}$ . Расчеты подобного типа позволили использовать созданную модель для определения оптимальных значений токов для реакций синтеза СТЯ [Аб,12,13]. Как видно, в большом диапазоне полей в Q2 и Q3 достигается высокая эффективность сепаратора.

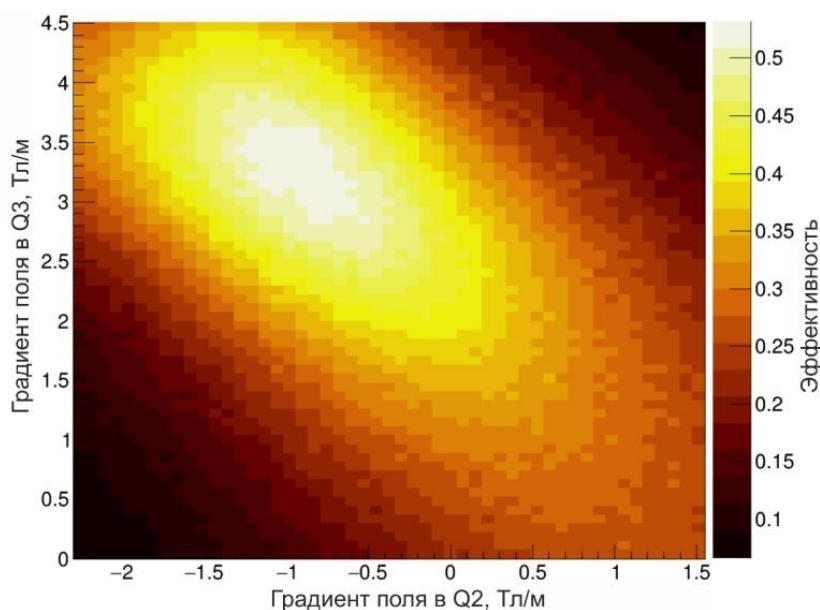


Рисунок 10. Расчетная эффективность сепаратора для реакции  $^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252}\text{No}$  при различных значениях Q2 и Q3. Отрицательное значение градиента в Q2 соответствует горизонтальной фокусировке квадруполя, положительное - вертикальной фокусировке квадруполя. Цветом показана эффективность для детекторов в фокальной плоскости размером 220×48 мм<sup>2</sup>.

В четвертой главе на основе набора методов и алгоритмов, использованных в расчетах DGFRS-2, описывается создание расчетной модели сепаратора GASSOL - газонаполненного сверхпроводящего магнитного соленоида для отделения продуктов



реакции полного слияния от рассеянных ионов и продуктов фоновых реакций [A2]. Схема установки приведена на рисунке 11. В первом приближении соленоид действует как тонкая фокусирующая линза [3,14] с фокусным расстоянием, определяемым по формуле  $f \approx 4 \frac{p^2}{q^2 B_z^2 L}$ , где  $p$  - импульс частицы,  $q$  - заряд иона,  $L$  - длина соленоида,  $\overline{B_z^2}$  - среднее значение квадрата аксиальной компоненты магнитного поля. Соленоид фокусирует частицы с различной магнитной жесткостью на разных расстояниях от мишени.

За счет заполнения газом внутреннего объема GASSOL, средние заряды ОИ и пучка становятся различными. Из-за разности в магнитной жесткости ускоренные ионы и ОИ будут фокусироваться соленоидом на разном расстоянии. Размещение стоппера в точке фокуса ионов (рисунок 11) позволяет практически полностью собрать рассеянный пучок, тогда как лишь малая часть ОИ будет в нем потеряна.

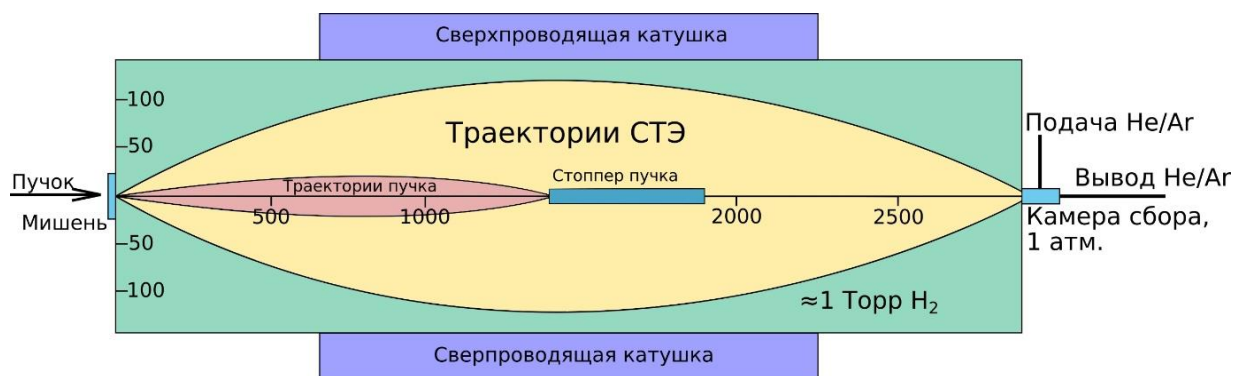


Рисунок 11. Схема сепаратора GASSOL.

Для дополнительного подавления фоновых частиц используется особенность движения заряженных частиц в поле соленоида. В области постоянного поля внутри соленоида угловая скорость ОИ остается постоянной и не зависит от аксиальной координаты ОИ. Также, для всех ОИ, вылетающих из мишени, эта скорость довольно близка, из-за чего в области постоянного поля все ОИ, проходя одно и то же аксиальное расстояние, поворачиваются примерно на один и тот же угол.

Это позволяет организовать дополнительную систему подавления продуктов фоновых реакций с помощью статичной турбины, расположенной в центре соленоида. Угол, на который ионы повернутся внутри соленоида на заданном расстоянии, обратно пропорционален магнитной жесткости иона. Турбина выделяет ионы по углу, на который они поворачиваются внутри соленоида: фоновые частицы будут остановлены лопатками турбины, тогда как ОИ с малыми потерями пройдут через нее. Эскиз возможной конфигурации турбины приведен на рисунке 12.

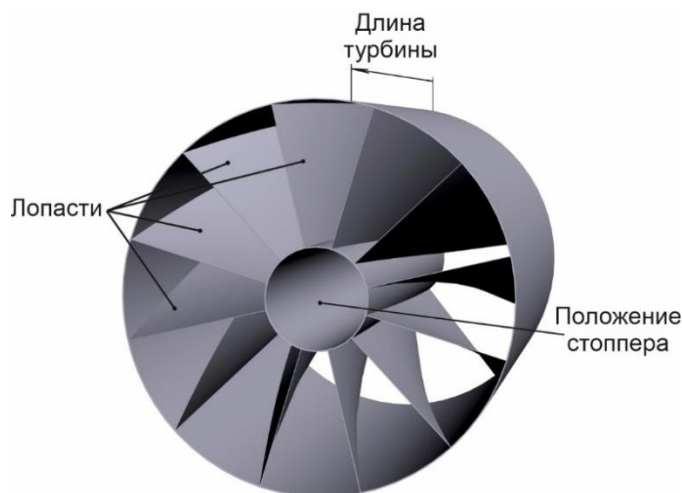


Рисунок 12. Эскиз турбины.

Из-за малых времен жизни СТЭ единственным экспериментальным методом изучения их химических свойств в настоящее время является газовая хроматография. С помощью данной методики была измерена энтальпия адсорбции элемента  $Cn$  ( $Z=112$ ) на золоте [15], а также проведены эксперименты по изучению свойств  $Mc$  ( $Z=115$ ),  $Fl$  ( $Z=114$ ) и  $Nh$  ( $Z=113$ ) [16-18]. Схема хроматографической установки приведена на рисунке 13. Влетающие в камеру продукты реакции останавливаются в среде инертных газов (обычно смесь He-Ar) и транспортируются потоком газа в детектирующие модули, состоящие из линейки полупроводниковых детекторов, температура поверхности которых постепенно падает от комнатной до температуры жидкого азота (криодетекторы).

Важным параметром является размер используемой камеры для сбора атомов, зависящий от размера изображения ОИ в фокальной плоскости установки - большие размеры камеры не позволяют обеспечить быструю транспортировку СТЭ на криодетекторы, что при малых временах жизни СТЭ сильно уменьшает эффективность эксперимента и ограничивает диапазон доступных для изучения элементов.

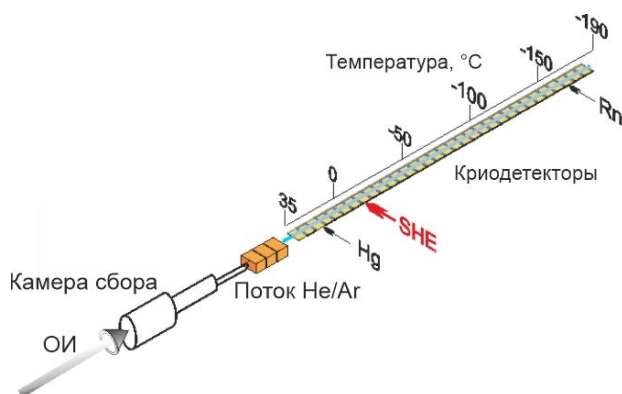


Рисунок. 13. Принципиальная схема установки для измерения энтальпии адсорбции. Показана температура поверхности детекторов и места осаждения атомов ртути, СТЭ и радона.

Анализ возможности проведения химических экспериментов на установке GASSOL проведен с точки зрения сечений образования СТЭ и их времен жизни. В качестве формы

камеры сбора ОИ ввиду осесимметричности изображения выбран цилиндр длиной 10 мм - все получаемые СТЭ имеют близкую кинетическую энергию и примерно равный пробег в газе камеры. Радиус камеры менялся в поисках оптимального значения - большой радиус камеры соберет большее количество ОИ, однако, увеличение радиуса приводит к увеличению времени обновления объема и потерям СТЭ за счет их распада.

В таблице 4 приведены результаты поиска оптимума. Все расчеты проводились со стоппером длиной 400 мм и установленной турбиной с 12 лопастями длиной 500 мм.

Таблица 4. Результаты расчетов.

Элемент	$^{287}\text{Fl}$	$^{288}\text{Mc}$	$^{293}\text{Lv}$	$^{294}\text{Tс}$
Оптимальный радиус камеры, мм	11	9	7	6
Эффективность для оптимальной камеры ( $\varepsilon_{tr} * \varepsilon_{col}$ )	0.52	0.47	0.37	0.31
Объем камеры, см <sup>3</sup>	3.8	2.5	1.5	1.1
Время обновления объема, с	0.127	0.08	0.051	0.038
Время прохождения через капилляр 1 м, с	0.063	0.063	0.063	0.063
Время прохождения через детекторы, с	0.11	0.11	0.11	0.11
Полное время транспортировки, с	0.299	0.257	0.224	0.21
Период полураспада, с	0.360	0.193	0.051	0.057
Интенсивность пучка, мкА-частиц	1	1	1	1
Сечение, пб	10	17	1.2	1.1
Мишень, мг/см <sup>2</sup>	0.4	0.4	0.4	0.4
Атомов в день в камере	2.81	4.24	0.22	0.18
Атомов в день на детекторах	1.58	1.68	0.015	0.010

Из анализа времен прохождения различных элементов видно, что при таких размерах изображения и оптимальном размере камеры наибольшее время занимает транспортировка через детекторную сборку. Данная проблема может быть решена за счет уменьшения размеров хроматографической установки. Длина капилляра будет определена исходя из фоновых радиационных условий в области проведения эксперимента.

Таким образом, если будет создана детекторная конструкция малых размеров с быстрым временем транспортировки и высокой эффективностью, установка GASSOL позволит реализовать эксперименты по изучению химии Lv и Ts.

В заключении сформированы основные результаты и выводы, полученные в диссертации:

1. Сепаратор DGFRS-2 обладает высокой дисперсией  $\approx 35 \text{ мм}/\%B\rho$ . Данный факт усложняет настройку сепаратора и выбор токов в дипольных магнитах, также высокая дисперсия приводит к широкому горизонтальному распределению ОИ в фокальной

плоскости. Ввиду этого было принято решение увеличить ширину полупроводниковых детекторов с 128 мм до 220 мм. Однако благодаря большой дисперсии на два порядка возросла степень подавления фоновых частиц на детекторах. Это крайне важно для проведения экспериментов на пучке циклотрона ДЦ-280 с интенсивностью ускоряемых частиц на порядок выше, чем на имеющемся в ЛЯР циклотроне У-400.

2. Измеренные заряды ОИ в водороде на DGFRS-2 находятся в хорошем согласии с данными, полученными на DGFRS. Предложен новый способ описания средних зарядов в зависимости от относительной скорости ОИ с учетом эффекта плотности.
3. Вычисленная на основе тестовых реакций трансмиссия DGFRS-2 составляет около 60%, что почти в два раза выше трансмиссии DGFRS. Данный факт также подтверждается результатами экспериментов по синтезу 115 элемента: выход ядер увеличился более чем в два раза на ту же дозу ионов, прошедших через мишень.
4. Размеры изображения в фокальной плоскости сильно зависят от давления: в вертикальной плоскости ширина изображения растет практически линейно с увеличением давления, в горизонтальной плоскости ширина сначала уменьшается, достигает некоторого минимума и затем начинает расти с дальнейшим увеличением давления. Оптимальное давление водорода составило около 0.7-1 Торр.
5. Значение тока в первом квадруполе влияет только на эффективность сепаратора и не влияет на размеры изображения ОИ в фокальной плоскости.
6. Токи во втором и третьем квадруполях сильнее всего влияют на размеры изображения в фокальной плоскости. Оптимальные значения токов в Q2 и Q3 связаны линейно, коэффициенты линейной взаимосвязи зависят от изучаемой реакции.
7. Расчетная модель показала хорошее согласие с экспериментальными данными. Созданная модель позволяет определять оптимальные значения токов в магнитных элементах для реакций по изучению СТЭ.
8. На основе методов расчета DGFRS-2 создана модель сверхпроводящего газонаполненного соленоида GASSOL. Оценены размеры изображения ОИ в фокальной плоскости, проведен анализ возможностей установки для проведения экспериментов по изучению химических свойств СТЭ.

**Список публикаций автора по теме диссертационной работы**

- A1. **D.I. Solovyev**, N.D. Kovrizhnykh, *Simulations of recoil trajectories in Dubna Gas-Filled Recoil Separator 2 by Geant4 toolkit*, Journal of Instrumentation 17 (2022).
- A2. **D.I. Solovyev**, N.D. Kovrizhnykh, G.G. Gulbekyan et.al, *Simulation of ion optics in a gas-filled solenoid GASSOL*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1052, 168263 (2023).
- A3. Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, A.G. Popeko, **D.I. Solovyev**, et. al, *DGFRS-2 –A gas-filled recoil separator for the Dubna Super Heavy Element Factory*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1033, 166640 (2022).
- A4. Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, **D.I. Solovyev**, et. al, *Average charge states of heavy ions in rarefied hydrogen*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1048, 167978 (2023).
- A5. **D. I. Solovyev**, N. D. Kovrizhnykh, V. K. Utyonkov, et. al, *Simulated and experimental characteristics of a gas-filled recoil separator DGFRS-2*, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Volume 87, Issue 8, 2023
- A6. Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, N. D. Kovrizhnykh, F. Sh. Abdullin, S.N. Dmitriev, D. Ibadullayev, M. G. Itkis, D. A. Kuznetsov, O. V. Petrushkin, A. V. Podshibiakin, A. N. Polyakov, A. G. Popeko, R. N. Sagaidak, L. Schlattauer, I. V. Shirokovski, V. D. Shubin, M. V. Shumeiko, **D. I. Solovyev**, Yu. S. Tsyganov, A. A. Voinov, V. G. Subbotin, A. Yu. Bodrov, A. V. Sabel'nikov, A. V. Khalkin, V. B. Zlokazov, K. P. Rykaczewski, T. T. King, J. B. Roberto, N. T. Brewer, R. K. Grzywacz, Z. G. Gan, Z. Y. Zhang, M. H. Huang, and H. B. Yang, *First experiment at the Super Heavy Element Factory: High cross section of  $^{288}\text{Mc}$  in the  $^{243}\text{Am}+^{48}\text{Ca}$  reaction and identification of the new isotope  $^{264}\text{Lr}$* . Phys. Rev. C 106, L031301 (2022).

**Список литературы**

- [1] Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, Superheavy nuclei from  $^{48}\text{Ca}$ -induced reactions // Nuclear Physics A. - 2015. - №944. - P. 62-98.
- [2] G. G. Gulbekian, S. N. Dmitriev, M. G. Itkis, et. al, Start-Up of the DC-280 Cyclotron, the Basic Facility of the Factory of Superheavy Elements of the Laboratory of Nuclear Reactions at the Joint Institute for Nuclear Research // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2019. – №16. – P. 866-875.
- [3] M.D. Rodríguez, M.L. Brown, M. Dasgupta et al., SOLITAIRE: A new generation solenoidal fusion product separator//Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A – 2010. – № 614. -P. 119–129.
- [4] Yu. Ts. Oganessian, N. Yu. Kazarinov, G. G. Gulbekian, Solenoid Separator of Superheavy Elements: A New Design for the GASSOL Separator // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2022. – №19. - P. 108–116.

- [5] K. Subotic, Yu. Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, et. al. Evaporation residue collection efficiencies and position spectra of the Dubna gas-filled recoil separator //Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. – 2002. – №481 (1-3).–P. 71-80.
- [6] Y.T. Oganessian, V.K. Utyonkov, Y. V. Lobanov, et. al., Average charge states of heavy atoms in dilute hydrogen// Phys. Rev. C.– 2001. –№64. – 64309.
- [7] J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, P. Arce, M. Asai, T. Aso, E. Bagli, A. Bagulya, S. Banerjee, et al., Recent developments in Geant4 //Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A – 2016. – № 835.– P. 186-225.
- [8] Meng Wang, G. Audi, F.G. Kondev, W.J. Huang, S. Naimi, Xing Xu, The Ame2016 atomic mass evaluation // Chinese Physics C. – 2017. – № 41(3). – 030003.
- [9] W.D. Myers, W.J. Swiatecki, Average nuclear properties // Annals of physics – 1969. – №55. – P. 395-505.
- [10] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM - The stopping and range of ions in matter // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 2010. – №268. – P. 1818–1823.
- [11] M.H. Mendenhall, R.A. Weller, An algorithm for computing screened coulomb scattering in Geant4matter //Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B.–2005. –№227. –P. 420-430.
- [12] Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, D. Ibadullayev, et. al., Investigation of  $^{48}\text{Ca}$ -induced reactions with  $^{242}\text{Pu}$  and  $^{238}\text{U}$  targets at the JINR Superheavy Element Factory //Phys. Rev. C– 2022. –№106. – 026412
- [13] Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, N. D. Kovrizhnykhet. al., New isotope  $^{286}\text{Mc}$  produced in the  $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$  reaction//Phys. Rev. C–2022. –№106. –064306.
- [14] Yu. Ts. Oganessian, N. Yu. Kazarinov, G. G. Gulbekian, Solenoid Separator of Superheavy Elements: A New Design for the GASSOL Separator // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2022. – №19. - P. 108–116.
- [15] R. Eichler, N. V. Aksenov, Y. V. Albin, et. al., Indication for a volatile element 114 // Radiochim. Acta. – 2010. –№98. –P. 133–139.
- [16] A. Yakushev, Sixty years of the transactinide chemistry in the gaseous phase, available at <https://webmaster.ncbj.gov.pl/events/superheavy-elements/program-2022> (accessed on June 20, 2022).
- [17] A. Yakushev, R. Eichler, Gas-phase chemistry of element 114, flerovium// EPJ Web Conf. – 2016. – №131. – P.1–6.
- [18] S.N. Dmitriev, N. V. Aksenov, Y. V. Albin, et. al., Pioneering experiments on the chemical properties of element 113 //MendeleevCommun. – 2014. – №24 – P.253–256.