

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

<b>Тема работы</b> <b>Моделирование газовых потоков в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND</b>
---

УДК 621.039.32:543.544

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Гольцман Андрей Иванович		

Руководители

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник радиохимического сектора ЛЯР ОИЯИ	Аксенов Н.В.	к.х.н.		
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Клемашева Е.И.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
<b>Универсальные</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объёме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета
ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии  
Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Видяев Д.Г.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0AM01	Гольцману Андрею Ивановичу

Тема работы:

Моделирование газовых потоков в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора <b>GRAND</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 32-51/С от 01.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2022 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Задание. Литературные источники методике постановки эксперимента, по математическому моделированию, по программной реализации математических моделей. Математическая модель камеры сбора ядер отдачи.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор и анализ литературы</li> <li>2. Моделирование камеры сбора ядер отдачи и анализ расчётов на основе модели</li> <li>3. Экономический расчет</li> <li>4. Охрана труда и техника безопасности</li> <li>5. Выводы. Заключение</li> </ol>

<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<p>Графики:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Конфигурация дубненского газонаполненного сепаратора</li> <li>2. Конструкция детектора COLD</li> <li>3. Фотография одной стороны массива детекторов, используемого в системе COMPACT</li> <li>4. Линии тока</li> <li>5. Сечение трубки тока</li> <li>6. Трубка тока</li> <li>7. Горизонтальная трубка тока с переменным сечением</li> <li>8. Участок горизонтальной трубы</li> <li>9. Профиль скоростей при ламинарном течении жидкости в круглой трубе</li> <li>10. Профиль скоростей при турбулентном течении жидкости в круглой трубе</li> <li>11. Модули поддерживаемые в COMSOL</li> <li>12. Интерфейс Laminar Flow</li> <li>13. Интерфейс Particle tracing for fluid flow</li> <li>14. Кусочная функция относительного числа Рейнольдса</li> <li>15. Наглядная иллюстрация метода Ньютона</li> <li>16. Камера сбора ядер отдачи сепаратора SHELS</li> <li>17. Геометрия камеры диаметром 60 мм в COMSOL</li> <li>18. Узел Materials</li> <li>19. Построенная сетка для камеры диаметром 60 мм в COMSOL</li> <li>20. Профиль скоростей внутри камеры диаметром 60 мм</li> <li>21. Линии тока</li> <li>22. Распределение давлений</li> <li>23. Горизонтальное распределение продуктов ЯР в фокальной плоскости сепаратора Grand</li> <li>24. Вертикальное распределение продуктов ЯР в фокальной плоскости сепаратора Grand</li> <li>25. Количество частиц, попадающих в каждую из областей</li> <li>26. Начальное распределение внутри камеры диаметром 60 мм</li> </ol>
---	---

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Клемашева Е.И.
Социальная ответственность	Доцент Отделения ядерно-топливного цикла, к.т.н. Передерин Ю.В.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	01.02.2022
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Аксенов Н.В.	к.х.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0АМ01	Гольцман А.И.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
0AM01	Гольцману Андрею Ивановичу

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение</b>	<b>Отделение ядерно-топливного цикла</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	14.04.02 Ядерные физика и технологии

<b>Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:</b>	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Дубна, Московской области. Тарифная ставка исполнителя и руководителя определены штатным расписанием ОИЯИ ЛЯР
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30% премии; 1,15 районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	1. Анализ потенциальных потребителей; 2. Анализ и оценка конкурентоспособности НТИ; 3. SWOT-анализ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1. Цели и результат проекта. 2. Организационная структура проекта. 3. Ограничения и допущения проекта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	1. Формирование плана и графика разработки; 2. Разработка графика Ганта; 3. Формирование бюджета затрат на научное исследование.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1. Определение интегрального показателя эффективности. 2. Расчет абсолютной эффективности.
<b>Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):</b>	
1. Сегментирование рынка 2. Оценка конкурентоспособности технических решений 3. Матрица SWOT-анализа 4. Иерархическая структура работ 5. Диаграмма Ганта	

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.02.22
---	----------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон. наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0AM01	Гольцман Андрей Иванович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b> ОАМ01	<b>ФИО</b> Гольцману Андрею Ивановичу
------------------------	--

<b>Школа</b>	<b>ИЯТШ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОЯТЦ</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	14.04.02 Ядерные физика и технологии

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Моделирование газовых потоков в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND в ПО COMSOL Multiphysics. Область применения: аэродинамика. Работы проводились на базе Лаборатории Ядерных Реакций им. Флерова Объединенного Института Ядерных Исследований (ОИЯИ ЛЯР).
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– Правовые нормы трудового законодательства; – Требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ; – ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – отклонение показателей микроклимата; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень шума; – психофизиологические факторы; – опасность поражения электрическим током.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду; – разработка организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– выбор и описание типичной ЧС - пожар; – обоснование мероприятий по предотвращению ЧС; – порядок действий при возникновении ЧС.

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.02.2022
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОАМ01	Гольцман Андрей Иванович		

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация включает в себя: 114 страниц, 29 таблиц, 29 рисунков, 44 литературных источника.

Ключевые слова: камера сбора ядер отдачи, Криодетектор, газовые потоки, моделирование в COMSOL Multiphythics, сверхтяжелые элементы.

Объектом исследования являлась газовая камера сбора ядер отдачи экспериментальной установки Криодетектор ЛЯР ОИЯИ.

Цель работы: создание математической модели газовых потоков в камере сбора ядер отдачи экспериментальной установки Криодетектор и выявление оптимальных геометрических характеристик камеры, обеспечивающих наиболее эффективный вынос ядер отдачи.

В работе проведен обзор и анализ литературных данных по газодинамике, газофазным методам в химии сверхтяжёлых элементов, методам трехмерных расчетов полей скорости, давлений и времени транспорта частиц. С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics построена трехмерная компьютерная модель камеры сбора ядер отдачи экспериментальной установки Криодетектор и проведено определение времени транспорта частиц на основе рассчитанных полей скорости и давлений.

Сравнительный анализ полученных результатов расчетов позволил сделать выбор оптимальной геометрии камеры для эффективного выноса ядер отдачи.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований, полученные при подготовке магистерской диссертации, могут быть использованы в ходе выполнения проекта Министерства науки и высшего образования "Сверхтяжелые ядра и атомы: пределы масс ядер и границы Периодической таблицы Д.И. Менделеева" в радиохимическом секторе ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна.

## Оглавление

Введение.....	12
1 Литературный обзор .....	13
1.1 Получение сверхтяжёлых элементов .....	13
1.2 Газонаполненный сепаратор.....	14
1.2.1 Принцип работы.....	15
1.3 Газофазные методы при изучении химии сверхтяжёлых элементов .....	17
1.3.1 Термохроматография.....	17
1.3.2 Изотермическая хроматография.....	18
1.3.3 Детекторы для газовой хроматографии.....	19
1.4 Взаимодействие заряженных частиц с веществом.....	22
1.4.1 Ионизационные потери .....	22
1.5 Основы газодинамики .....	25
1.5.1 Линии тока, неразрывность .....	25
1.5.2 Виды течения в газе .....	28
1.5.3 Вязкое течение в трубе .....	29
1.6 ПО COMSOL Multiphysics .....	32
1.6.1 Интерфейс «Ламинарный поток».....	33
1.6.2 Интерфейс «Отслеживание частиц в потоке».....	35
1.6.3 Процедура решения задач в COMSOL .....	37
2 Экспериментальная часть.....	40
2.1 Моделирование газовых потоков .....	40
2.2 Моделирование трассировки частиц.....	44
2.3 Обсуждение результатов.....	48
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	48
3.1 Предпроектный анализ.....	50
3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	50
3.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	51
3.1.3 SWOT-анализ .....	52
3.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации .....	53
3.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования .....	55

3.2	Инициация проекта .....	56
3.3	Реестр рисков проекта .....	58
3.4	Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования .....	59
3.5	Планирование научно-исследовательского проекта .....	60
3.6	Бюджет научного исследования .....	63
3.6.1	Расчёт амортизации оборудования .....	63
3.6.2	Основная заработная плата исполнителей темы .....	65
3.6.3	Отчисления во внебюджетные фонды .....	66
3.6.4	Накладные расходы .....	67
3.6.5	Бюджет научно-исследовательской работы .....	67
3.7	Организационная структура проекта .....	69
3.7.1	Чистая текущая стоимость .....	69
3.7.2	Дисконтированный срок окупаемости .....	70
3.6.3	Внутренняя ставка доходности .....	71
3.8	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности научного исследования .....	73
4	Социальная ответственность .....	77
4.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	77
4.1.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства .....	77
4.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	79
4.2	Производственная безопасность .....	81
4.2.1	Анализ вредных и опасных факторов .....	81
4.2.2	Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов .....	83
4.2.3	Отклонение показателей микроклимата .....	83
4.2.4	Повышенный уровень электромагнитного излучения .....	84
4.2.5	Недостаточная освещенность рабочей зоны .....	85
4.2.6	Превышение уровня шума .....	89
4.2.7	Психофизиологические факторы .....	90
4.2.8	Поражение электрическим током .....	90

4.3 Экологическая безопасность.....	93
4.4 Пожарная и взрывная безопасность.....	94
4.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	96
Выводы по разделу .....	97
Выводы .....	98
Список используемой литературы .....	100
Приложение А .....	104

## Введение

Определение физических и химических свойств сверхтяжелых элементов (СТЭ) представляет собой одну из важнейших фундаментальных проблем современной ядерной химии и ядерной физики. Исследования ядерных реакций при облучении актинидных мишеней интенсивными пучками  $^{48}\text{Ca}$  позволили осуществить синтез самых тяжелых из известных химических элементов с атомными номерами от 112 до 118 [1]. Эти открытия подтвердили существование «острова стабильности» СТЭ, теоретически предсказанного в середине прошлого столетия. Относительно большие периоды полураспада (от секунд до часов) радиоизотопов СТЭ позволяют ставить эксперименты по изучению химии этих труднодоступных элементов. Постановка таких экспериментов является сложной задачей. Самым быстрым и эффективным методом изучения химических свойств новых элементов является газовая термохроматография. В ходе таких экспериментов ядра СТЭ отделяются от пучка и других продуктов ядерных реакций на специализированном сепараторе [2-7], тормозятся в камере сбора ядер отдачи, заполненной протекающим газом (He, Ar,  $\text{N}_2$  и др.) и по капилляру газовой струей переносятся в хроматографическую колонку [8, 9]. Для проведения экспериментов с радиоизотопами с периодами полураспада менее 1 с необходимо разработать газовую камеру сбора ядер отдачи с характеристиками, удовлетворяющими условиям эксперимента, такими как размер фокальной плоскости сепаратора, время и эффективность газового транспорта.

Целью настоящей работы являлось создание математической модели газовых потоков в камере сбора ядер отдачи экспериментальной установки Криодетектор и выявление оптимальных геометрических характеристик камеры, обеспечивающих наиболее эффективный вынос ядер отдачи.

# 1 Литературный обзор

## 1.1 Получение сверхтяжёлых элементов

Методы, с помощью которых впервые были получены элементы можно разделить на:

1. **Синтез первых трансурановых элементов ( $Z = 93 - 100$ ).** Впервые эти ядра были синтезированы в реакциях последовательного захвата нейтронов ядрами изотопа  $^{235}\text{U}$  ( $xn, \gamma$ ) при длительных экспозициях на высокопоточных ядерных реакторах. Данный способ до сих пор остаётся основным при получении изотопов с  $Z = 93 - 100$ , но для получения изотопов с  $Z > 100$  неприменим, из-за короткого периода полураспада данных изотопов.

2. **Синтез трансфермиевых элементов ( $Z = 101 - 106$ ).** В нейтроноизбыточные и долгоживущие ядра урана – кюрия вносится сразу комплекс нуклонов  $^{12}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$  или  $^{22}\text{Ne}$ . Энергия возбуждения в образующихся компаунд-ядрах составляет от 38 до 46 МэВ, и для перехода в основное состояние ядро должно испустить 4 – 5 нейтронов.

3. **Реакции холодного слияния массивных ядер ( $Z = 107 - 112$ ).** В реакциях холодного слияния в качестве мишеней используются магические ядра  $^{208}\text{Pb}$  или  $^{209}\text{Bi}$ , в качестве налетающих частиц используются ускоренные массивные ядра-снаряды с  $A \geq 40$ . Энергия возбуждения, получившегося в таких реакциях компаунд-ядра, составляет около 12 – 15 МэВ. То есть достаточно эмиссии одного нейтрона (вероятность этого составляет 1 – 2 %), чтобы эту энергию «унести» [10].

4. **Горячее слияние актинидов с ионами  $^{48}\text{Ca}$  ( $Z \geq 112$ ).** В данных реакциях в качестве мишенного материала выступают элементы с  $Z = 94 - 98$ , которые нарабатываются в реакция захвата нейтрона на высокопоточных ядерных реакторах, а в качестве снаряда – ускоренные ионы  $^{48}\text{Ca}$ . Энергия возбуждения в образующихся компаунд-ядрах составляет от 35 до 40 МэВ, и для перехода в основное состояние ядро должно испустить 3 – 4 нейтрона. В этом и

заключается основной недостаток данного типа реакций, так как на каждом этапе последовательного испускания нейтрона вероятность деления нагретого ядра существенно выше [11].

## 1.2 Газонаполненный сепаратор

Схема газонаполненного сепаратора DGFRS (Dubna gas-filled recoil separator) показана на рисунке 1.1.

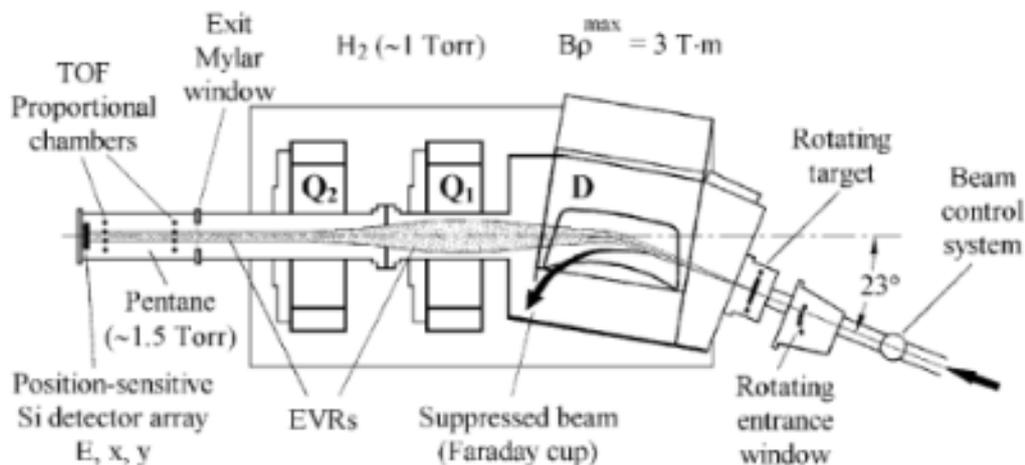


Рисунок 1.1 – Конфигурация дубненского газонаполненного сепаратора.

Дипольный магнит газонаполненного сепаратора заполнен газообразным водородом при давлении около 1 Торр. Из-за различий в жесткости ядра отдачи, отскакивающие от мишени, отделяются в полете от частиц пучка, рассеянных ионов и продуктов реакции переноса. Квадрупольный дублет используется для фокусировки ядер отдачи на детекторной системе в фокальной плоскости. Перед имплантацией в детекторы отделенные ядра отдачи проходят через систему измерения времени пролета (TOF), которая состоит из двух (стартовой и стоповой) многопроволочных пропорциональных камер, заполненных 1,5 Торр пентана. Система TOF позволяет отличать отскакивающие ядра от различных фоновых ионизирующих частиц, поступающих в детектор из сепаратора. В конечном итоге ядра отдачи имплантируются в фокальной плоскости в матрицу полупроводниковых позиционно-чувствительных детекторов (PSD) размером 12

х 4 см, состоящую из 12 полосок (шириной 1 см и высотой 4 см). Мы получаем горизонтальные положения (х) для продуктов реакции, записывая номер полосы. Измеряя сигналы с обоих концов каждой полосы, вертикальные положения (у) определяются по разделению резистивного заряда. Система сбора данных записывает информацию в режиме списка об энергиях, положениях, сигналах и времени прибытия имплантированных EVR и генетически связанных последующих частицах а и/или фрагментах деления [12].

### 1.2.1 Принцип работы

Основной принцип работы газонаполненного сепаратора основан на действии силы Лоренца:

$$\vec{F} = q[\vec{v} \cdot \vec{B}] \quad (1.1)$$

на ион, движущийся в магнитном потоке  $B$  со скоростью  $v$  и зарядом  $q$ .

Результирующая магнитная жесткость иона массы  $m$  равна

$$B\rho = \frac{mv}{q}, \quad (1.2)$$

где  $\rho$  – радиус кривизны,  $m = Am_0$  – масса иона,  $A$  – атомный массовый номер,  $m_0$  – атомная единица массы

Если область магнитного поля диполя заполнена разбавленной газовой средой, движущиеся ионы изменяют свою энергию, направление и заряд за счет столкновений с атомами газа. Попадая в газ, первоначально однородный ионный пучок распадается на несколько составляющих с разным зарядом. После статистически большого числа столкновений с атомами среды распределение заряда приближается к равновесному, и ионы следуют некоторой средней траектории, определяемой средним значением заряда. Форма равновесного распределения зарядов описывается гауссианой с центром в среднем заряде  $\bar{q}$ , что приблизительно выражается формулой Бора:

$$\bar{q} = \frac{v}{v_0} Z^{1/3}, \quad (1.3)$$

где  $Z$  – атомный номер,  $v_0 = 2,19 \cdot 10^6$  – боровская скорость [13].

Подставив уравнение (1.3) в (1.2), получим:

$$B\rho = 0,02267 \frac{A}{Z^{1/3}}. \quad (1.4)$$

Следовательно, в первом приближении радиус кривизны иона в магнитном поле, заполненном газом, определяется в основном массой, в меньшей степени атомным номером и становится независимым от заряда и скорости. Ионы разной массы будут отклоняться от указанной выше траектории, двигаясь по разным радиусам кривизны, которые в первом порядке пропорциональны величине  $A^{2/3}$ . При бомбардировке ядер-мишеней снарядами продукты реакции полного синтеза имеют максимально возможную массу. Соответственно, остальные продукты реакции — мишенеподобные или снарядоподобные ионы — будут отделяться от ЭВР по траекториям с меньшими радиусами кривизны.

Для ионов с постоянным отношением  $v/q$  ширина траектории и, следовательно, массовое разрешение газонаполненного сепаратора зависит от относительной ширины  $B\rho$ , определяемой оптической дисперсией системы, и ширины пространственного распределения ядер отдачи за счет взаимодействия с материалом мишени и газом сепаратора.

Для асимметричных систем типа  $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$  и  $^{22}\text{Ne} + ^{244}\text{Pu}$  соотношения жесткостей ядер отдачи, рассеянных мишеневидных и первичных ионов составляют  $1 : 0,89 : 0,29$  и  $1 : 0,95 : 0,18$  соответственно.

## 1.3 Газофазные методы при изучении химии сверхтяжёлых элементов

Газофазное химическое разделение играло и продолжает играть важную роль в химических исследованиях трансактинидных элементов. Ряду условий, которые необходимо одновременно выполнить для успешного проведения химического эксперимента с трансактинидным элементом, почти идеально удовлетворяет газовая хроматография летучих неорганических соединений. Поскольку синтез ядер трансактинидов обычно предполагает термализацию продуктов реакции в газовом объеме, камера отдачи может быть соединена капилляром непосредственно с газохроматографической системой. Процедура газофазного разделения является быстрой, эффективной и может выполняться непрерывно.

### 1.3.1 Термохроматография

В термохроматографии газ-носитель протекает через хроматографическую колонну, к которой приложен отрицательный продольный градиент температуры [14]. Можно использовать открытые или заполненные колонны. Вещества, летучие в начальной точке, переносятся вниз по потоку от колонны потоком газа-носителя. Из-за снижения температуры в колонне время пребывания частиц в адсорбированном состоянии экспоненциально увеличивается. Различные частицы образуют отдельные пики осаждения в зависимости от их энтальпии адсорбции ( $\Delta H_a^0$ ) на поверхности колонны и, таким образом, отделены друг от друга. Характерной величиной является температура осаждения ( $T_a$ ), которая зависит от различных экспериментальных параметров.

Смесь разделяемых веществ можно вводить в колонку непрерывно [15] или проводить эксперимент периодически, вводя смесь веществ через горячий конец хроматографической колонны и удаляя смесь веществ через холодный конец после завершения разделения. Два варианта (непрерывный или

прерывистый) приводят к несколько разным формам пиков. Для непрерывного варианта хроматографическое разрешение несколько хуже. Термохроматографическое разделение является предпочтительным методом для исследования веществ, содержащих долгоживущие нуклиды, которые распадаются либо путем  $\gamma$ -излучения, электронного захвата или  $\beta^+$  распада, либо путем испускания  $\beta^-$  частиц с высокой энергией [16]. Таким образом, испускаемое излучение может быть легко обнаружено путем сканирования длины колонны детектором. Обнаружение нуклидов, распадающихся при испускании  $\alpha$  частиц или при спонтанном делении, является более сложным.

### 1.3.2 Изотермическая хроматография

В изотермической хроматографии газ-носитель протекает через хроматографическую колонну с постоянной изотермической температурой. Можно использовать открытые или заполненные колонны. В зависимости от температуры и  $\Delta H_a^0$  частиц на поверхности колонки частицы перемещаются по длине колонки медленнее, чем газ-носитель. Это время удерживания можно определить либо путем введения короткого импульса вещества в газ-носитель и измерения времени его выхода через выход из колонки [17, 18], либо путем непрерывного введения в колонку короткоживущего нуклида и определения доли нуклидов, распавшихся на выходе из колонки [19, 20].

Характерной величиной является температура, при которой половина введенных нуклидов обнаруживается на выходе ( $T_{50\%}$ ). В этом случае время удерживания в колонке равно периоду полураспада введенного нуклида. Таким образом, период полураспада нуклида используется в качестве внутренних часов системы. Температура  $T_{50\%}$  зависит от различных экспериментальных параметров. Можно показать, что при одинаковых расходах газа и размерах колонн  $T_a \approx T_{50\%}$ . Варьируя изотермическую температуру, получают интегральную хроматограмму. Выход вещества на выходе из колонны изменяется в коротком интервале изотермических температур от нуля до

максимального выхода. Вариантом изотермической хроматографии с использованием долгоживущих радионуклидов является температурно-программируемая хроматография. Выход различных видов на выходе измеряется в зависимости от непрерывно изотермически повышающейся температуры [18, 21].

### 1.3.3 Детекторы для газовой хроматографии

В реальном эксперименте с Hs [22] использовалась детектор COLD (Cryo On-Line Detector). Этот детектор был сконструирован в Институте Пауля Шеррера (Швейцария) и состоял из двух диодов по 36 PIN. Схема COLD показана на рис. 1.2.

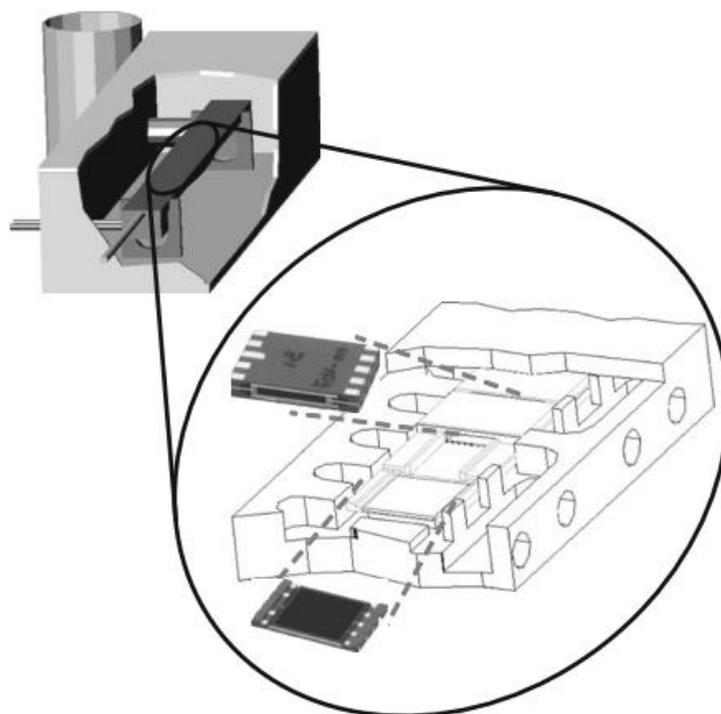


Рисунок 1.2 – Конструкция детектора COLD

Температурный градиент детектора COLD достигал нижней конечной температуры  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Два PIN-диода, установленные на керамических опорах, были склеены друг с другом лицом друг к другу. Две Т-образные прокладки из кремния ограничивали поток газа к активной поверхности диодов. Зазор между

PIN-диодами в COLD был 1,5 мм. Сэндвичи с PIN-диодами были заключены в медный стержень с тефлоновым покрытием, который был помещен в корпус из нержавеющей стали, продуваемый сухим азотом. Медный стержень на входе нагревался термостатом до +20 °С, а на выходе охлаждался жидким N<sub>2</sub>. Геометрическая эффективность обнаружения одиночной α-частицы, испускаемой частицами, адсорбированными внутри массива детекторов, составила 77%. Детекторы группы COLD были откалиброваны в режиме реального времени с α-распадающим <sup>219</sup>Rn и его дочерними <sup>215</sup>Po и <sup>211</sup>Pb с использованием источника <sup>227</sup>Ac.

Усовершенствованная версия под названием COMPACT (Cryo On-line Multidetector for Physics And Chemistry of Transactinides) с зазором всего 0,6 мм и внутренней активной поверхностью детектора 93% успешно идентифицировала новые нуклиды <sup>270</sup>Hs и <sup>271</sup>Hs [23, 24]. За счет увеличения геометрической эффективности регистрации значительно повысилась эффективность регистрации полных цепочек распада α-частиц с тремя или четырьмя членами, поскольку эффективность регистрации таких цепочек распадов является кратным произведением эффективности регистрации одиночной α-частицы.

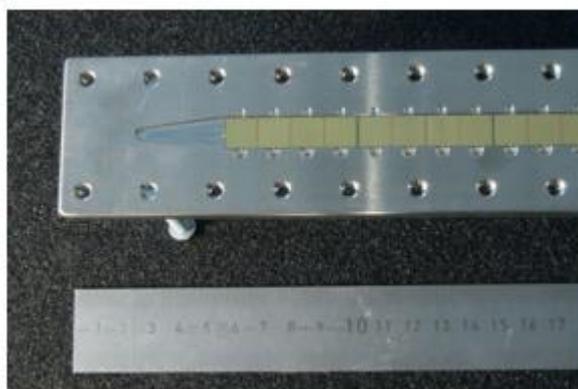


Рисунок 1.3 – Фотография одной стороны массива детекторов, используемого в системе COMPACT.

Концепция COLD и COMPACT оказалась очень успешной при изучении даже более тяжелых элементов, таких как Cn и Fl, в их элементарном состоянии [25, 26]. Для изучения взаимодействия одиночных атомов Cn и Fl с Au

поверхности PIPS-детекторов были покрыты тонким слоем Au толщиной несколько нанометров. На рис. 1.3 показан массив детекторов, покрытых золотом. На чипе детектора всегда располагаются четыре детектора. Расстояние между отдельными детекторами на одном чипе составляет всего 100 нм. На этот массив детекторов накладывается такой же второй, образуя таким образом хроматографический канал. Две решетки герметизированы проводом In, который является идеальным герметиком при очень низких температурах, при которых работает один конец матрицы детекторов.

## 1.4 Взаимодействие заряженных частиц с веществом

Заряженные частицы теряют свою энергию путем электромагнитного взаимодействия с атомами или молекулами среды по трем основным каналам:

- потери на ионизацию и возбуждение атомов или молекул вещества, объединенные в общий канал потерь — ионизационные потери;
- потери на тормозное излучение;
- потери на черенковское излучение.

Все три вида потерь статистически независимы, т. е. происходят независимо друг от друга, и их вклад в суммарные потери определяется скоростью частицы, ее массой и пр., как это будет показано ниже. Потери на черенковское излучение здесь не рассматриваются, так как они дают вклад при больших энергиях заряженных частиц. [27]

### 1.4.1 Ионизационные потери

При движении заряженной частицы через вещество независимо от его агрегатного состояния (газ, жидкость, твердое тело) кулоновское взаимодействие электрического заряда частицы с атомами или молекулами вещества приводит к ионизации этих атомов или молекул, или их возбуждению. Для описания этих потерь энергии вводится суммарная характеристика  $dE/dx$  — удельные ионизационные потери, которые измеряются в МэВ/см или в МэВ · см<sup>2</sup>/г. Последняя величина получается путем деления  $(dE/dx)$  в МэВ/см на плотность вещества  $\rho$  в г/см<sup>3</sup> и удобна тем, что, например, для газов она не зависит от давления газа.

Проведем сравнительно простой расчет удельных ионизационных потерь для нерелятивистской частицы с массой, превосходящей массу электрона. Рассмотрим взаимодействие электрического поля частицы с отдельным электроном среды. Среду полагаем невзаимодействующей и неупорядоченной. Последнее замечание применимо практически к любой среде, поскольку

направление движения частицы носит случайный характер, а энергия взаимодействия атомов или молекул в любой среде мала по сравнению с энергией частицы. Особый случай составляет лишь сфокусированное движение частицы вдоль кристаллической оси кристалла, что может быть достигнуто в специально поставленных экспериментах. Итак, при сформулированных условиях сила взаимодействия между электрическим полем частицы и отдельным электроном атома среды равна:

$$F = ze^2/b^2 \quad (1.5)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $b$  — прицельный параметр (минимальное расстояние, на которое частица приближается к атому).

За время взаимодействия, равное по порядку величины  $dt = 2b/V$ , электрон среды получит (а частица, соответственно, потеряет) импульс, равный  $dp = F \cdot dt = 2ze^2/bV$ , что соответствует приобретенной электроном (и потерянной частицей) энергии  $dE = (dp)^2/2m$ , где  $m$  — масса электрона.

Таким образом,

$$dE = \frac{2z^2e^4}{b^2mV^2}. \quad (1.6)$$

В кольцевом слое радиусом  $b$ , шириной  $db$  и толщиной  $dx$  содержится электронов  $N_e = ZN \cdot 2\pi b \cdot db \cdot dx$ , тогда полная передача энергии на кольцевой слой будет равна:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{db} = \frac{4\pi z^2 e^4 ZN}{mV^2} \cdot \frac{db}{b}. \quad (1.7)$$

Откуда удельные ионизационные потери энергии заряженной частицы на единицу пути  $dx$  будут равны:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mV^2} NZ \cdot \ln\left(\frac{b_{max}}{b_{min}}\right). \quad (1.8)$$

где  $N$  — плотность атомов в единице объема;  $Z$  — заряд одного атома (молекулы) среды.

Каков физический смысл пределов  $b_{max}$  и  $b_{min}$ ? При упругом взаимодействии тяжелой частицы с электроном максимально возможная передача энергии от тяжелой частицы к электрону в нерелятивистском случае из кинематических соображений равна  $E_{max} = 2mV^2$ , что соответствует минимальному прицельному параметру  $b_{min}$ . Максимальному прицельному параметру обычно ставят в соответствие некоторую среднюю передачу энергии от частицы к атому, которая носит название «средний ионизационный потенциал». Он примерно равен  $kZ$ , где  $k \sim 10$  эВ.

Учитывая, что  $(dE/dx) \sim (db/b)$ , заменим  $b_{max}/b_{min}$  на  $E_{max}/E_{min}$ . Таким образом, окончательно формула для удельных ионизационных потерь для нерелятивистских частиц тяжелее электрона выглядит следующим образом:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{4\pi z^2 e^4 ZN}{mV^2} \ln \frac{2mV^2}{\bar{I}} \quad (1.9)$$

где  $\bar{I}$  — средний ионизационный потенциал (эмпирическая величина, берется из справочников). Следует подчеркнуть, что средний ионизационный потенциал  $\bar{I}$  — это эмпирическая подгоночная величина, не имеющая ничего общего с потенциалом ионизации атома  $I_{\text{ион}}$ , значение которого является конкретной физической величиной, равной энергии, необходимой для удаления валентного электрона атома на бесконечность [27].

## 1.5 Основы газодинамики

### 1.5.1 Линии тока, неразрывность

Существует два способа описания движения жидкости или газа. В одном способе описания движения, разрабатывавшемся Лагранжем, траектория и скорость в функции от времени задаётся для каждой частицы жидкости. В другом способе (методе Эйлера) задаются точки пространства, в которых скорость, с которой проходят через каждую данную точку отдельные частицы.

Чтобы определить состояние движения жидкости или газа, нужно указать вектор скорости как функцию от времени для каждой точки в пространстве. В совокупности все эти вектора образуют образую поле вектора скорости. На рисунке 1.4 изображены линии тока, которые в движущемся газе проводятся так, чтобы касательная к ним в каждой точке совпадала по направлению с вектором.

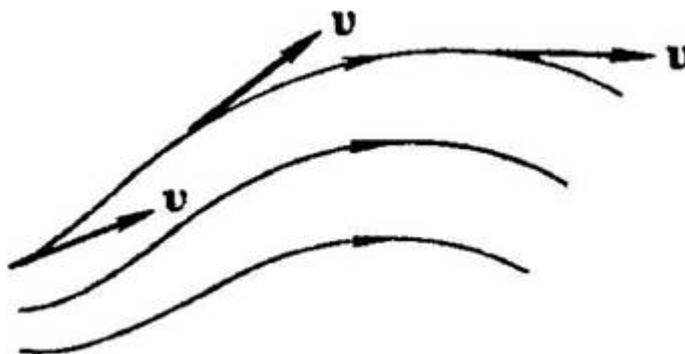


Рисунок 1.4 – Линии тока

Выдвинем условие, что линии тока будут проведены так, чтобы величина скорости в данном месте была прямо пропорциональна густоте линий тока. В таком случае по картине линий тока можно будет увидеть величину вектора скорости в разных точках пространства, то есть в местах где линий тока больше скорость жидкости или газа будет больше и наоборот [28].

Поскольку величина и направление вектора  $v$  в каждой точке могут меняться со временем, то и картина линий тока может непрерывно меняться. Если вектор скорости в каждой точке пространства остается постоянным, то

течение называется установившимся, или стационарным. При стационарном течении любая частица жидкости проходит данную точку пространства с одним и тем же значением  $v$ . Картина линий тока при стационарном течении остается неизменной, и линии тока в этом случае совпадают с траекториями частиц.

Часть газа, ограниченная линиями тока, называется трубкой тока. Вектор  $v$ , будучи в каждой точке касательным к линии тока, будет касательным и к поверхности трубки тока; следовательно, частицы жидкости при своем движении не пересекают стенок трубки тока.

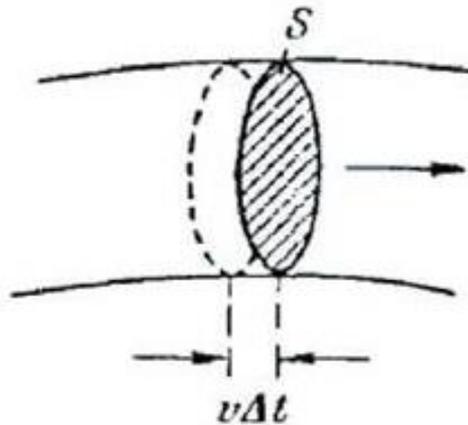


Рисунок 1.5 – Сечение трубки тока

Возьмем перпендикулярное к направлению скорости сечение трубки тока (рис. 2). Предположим, что скорость движения частиц жидкости одинакова во всех точках этого сечения. За время  $\Delta t$  через сечение  $S$  пройдут все частицы, расстояние которых от  $S$  в начальный момент не превышает значения  $v\Delta t$ . Следовательно, за время  $\Delta t$  через сечение  $S$  пройдет объем жидкости, равный  $Sv\Delta t$ , а за единицу времени через сечение  $S$  пройдет объем жидкости, равный  $Sv$ . Возьмем трубку тока, настолько тонкую, что в каждом ее сечении скорость можно считать постоянной. Если газ или жидкость несжимаемы (т. е. плотность всюду одинакова и изменяться не может), то количество жидкости между сечениями  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 1.3) будет оставаться неизменным. Отсюда следует, что объемы жидкости, протекающие за единицу времени через сечения  $S_1$  и  $S_2$ , должны быть одинаковы:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

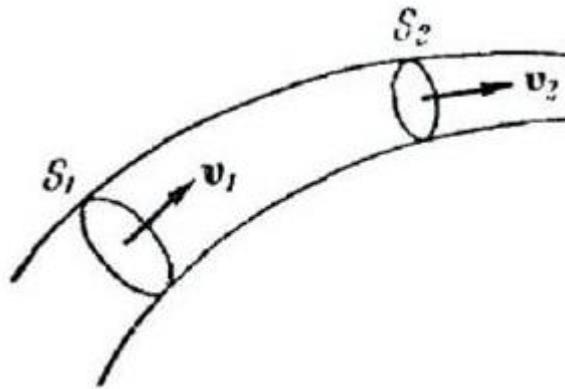


Рисунок 1.6 – Трубка тока

Приведенное выше рассуждение применимо к любой паре сечений  $S_1$  и  $S_2$ . Следовательно, для несжимаемой жидкости величина в любом сечении одной и той же трубки тока должна быть одинакова:

$$Sv = const. \quad (1.10)$$

Из (1.6) следует, что при переменном сечении трубки тока частицы несжимаемой жидкости движутся с ускорением. В горизонтальной трубке тока (рис 1.4) это ускорение может быть обусловлено только непостоянством давления вдоль оси трубки — в местах, где скорость меньше, давление должно быть больше, и наоборот.

Теорема о неразрывности струи применима к реальным жидкостям и даже к газам в том случае, когда сжимаемостью их можно пренебречь. Соответствующий расчет показывает, что при движении жидкостей и газов со скоростями, меньшими скорости звука, их с достаточной степенью точности можно считать несжимаемыми.

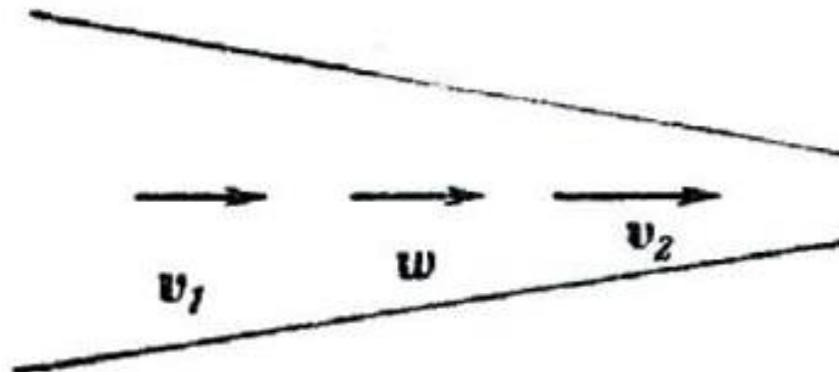


Рисунок 1.7 – Горизонтальная трубка тока с переменным сечением

## 1.5.2 Виды течения в газе

Наблюдаются два вида течения жидкости (или газа): ламинарное и турбулентное. Ламинарное течение – это течение, при котором жидкость как бы разделяется на слои, которые скользят относительно друг друга не перемешиваясь. Ламинарное течение стационарно.

При увеличении скорости или поперечных размеров потока характер течения существенным образом изменяется. Возникает энергичное перемешивание жидкости. Такое течение называется турбулентным. При этом течение нестационарно, так как скорость частиц изменяется беспорядочным образом. Если в турбулентный поток ввести окрашенную струйку, то уже на небольшом расстоянии от места введения окрашенная жидкость равномерно распределяется по всему сечению потока.

Английский физик Рейнольдс установил, что характер течения зависит от значения безразмерной величины

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}, \quad (1.11)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (или газа),  $v$  – средняя скорость потока (по сечению трубы),  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости,  $l$  – характерный для поперечного сечения размер, например, сторона квадрата при квадратном сечении, радиус или диаметр при круглом сечении и т.д.

Величина (6) называется числом Рейнольдса. При малых значениях числа Рейнольдса наблюдается ламинарное течение. Начиная с некоторого определенного значения, называемого критическим, течение приобретает турбулентный характер. Практически критическое число Рейнольдса равно примерно 2100-2300.

В число Рейнольдса входят две величины, зависящие от свойств жидкости: плотность и коэффициент вязкости. Отношение  $\nu = \eta/\rho$  называется кинематической вязкостью. В отличие от неё величина  $\eta$  называется

динамической вязкостью. Используя кинематическую вязкость, числу Рейнольдса можно придать следующий вид:  $Re = ul/\nu$ .

Число Рейнольдса служит важным параметром моделирования процессов, в частности при обтекании тел [28].

### 1.5.3 Вязкое течение в трубе

Пусть по горизонтальной трубе радиуса  $R$  течет стационарный поток жидкости. Рассмотрим отрезок этой трубы длиной  $L$  (рис. 1.8).

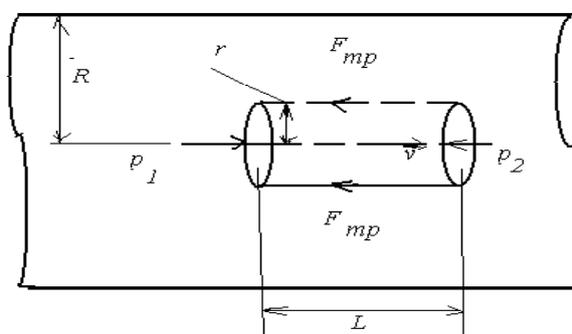


Рисунок 1.8 – Участок горизонтальной трубы

Частицы жидкости движутся вдоль трубы с разной скоростью: у самой стенки они прилипают к ней и имеют скорость равной нулю. По мере удаления от стенок скорость увеличивается и достигает максимального значения на оси трубы. Таким образом, величина скорости частиц жидкости является функцией  $v(r)$  расстояния  $r$  от оси трубы.

Для доказательства этого утверждения выделим воображаемый цилиндрический объем жидкости радиуса  $r$ . Жидкость, находящаяся внутри цилиндра, подвергается действию сил со стороны окружающей жидкости. Обозначим через  $p_1$  – давление жидкости у основания 1,  $p_2$  – давление жидкости у основания 2,  $S = \pi r^2$  – площадь оснований. Так как движение частиц жидкости происходит вдоль трубы, рассмотрим силы, действующие лишь в этом направлении. На основание цилиндра действуют силы давления, величины которых  $f_1 = p_1 S = \pi r^2 p_1$  и  $f_2 = p_2 S = \pi r^2 p_2$ .

На боковую поверхность действует сила внутреннего трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$ . Так как скорость жидкости внутри цилиндра больше, чем вне его, то сила  $\vec{F}_{\text{тр}}$  направлена в сторону, противоположную движению жидкости. Величина этой силы определяется по формуле:

$$F_{\text{тр}} = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| S = -\eta \frac{dv}{dr} \cdot 2\pi r L. \quad (1.12)$$

Здесь знак минус поставлен потому, что скорость убывает с расстоянием от оси трубы, следовательно,  $\frac{dv}{dr}$  отрицательна и  $\left| \frac{dv}{dr} \right| = -\frac{dv}{dr}$

При стационарном течении в трубе постоянного сечения скорости всех частиц жидкости остаются неизменными. Следовательно, должна быть равна нулю сумма проекций на направление оси трубы всех сил, действующих на цилиндр, т.е.  $f_1 - f_2 - F_{\text{тр}} = 0$ .

Здесь за положительное направление принято направление движения жидкости. Подставив сюда выражения для  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $F_{\text{тр}}$ , найдем  $\frac{dv}{dr} = -\frac{p_1 - p_2}{2\eta L} r$ .

Разделив переменные, получим уравнение  $dv = -\frac{p_1 - p_2}{2\eta L} r dr$ .

Интегрирование дает  $v = -\frac{p_1 - p_2}{4\eta L} r^2 + C$ .

Постоянную интегрирования  $C$  можно найти из условия, что на стенке трубы, т.е. при  $r = R$  скорость частиц должна обращаться в нуль. Это дает  $C = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} R^2$ .

Окончательно имеем

$$v(r) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (R^2 - r^2). \quad (1.13)$$

Отсюда видно, что при ламинарном течении скорость в зависимости от  $r$  меняется по параболическому закону и достигает максимума на оси трубы при  $r = 0$  (как это и предполагалось ранее) (рис. 1.9).

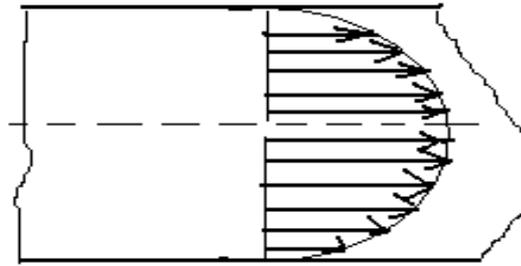


Рисунок 1.9 – Профиль скоростей при ламинарном течении жидкости в круглой трубе

При турбулентном течении остается постоянной средняя скорость в каждой точке сечения трубы (рис. 1.10). Вблизи стенок трубы скорость изменяется гораздо сильнее, чем при ламинарном течении, а в остальной части сечения скорость изменяется меньше.

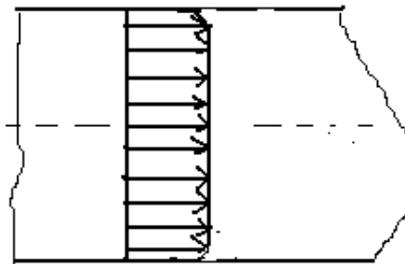


Рисунок 1.10 – Профиль скоростей при турбулентном течении жидкости в круглой трубе

## 1.6 ПО COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics — это универсальная среда численного моделирования для любых направлений проектирования, производства и научных исследований. С её помощью можно анализировать как отдельные, так и взаимосвязанные физические процессы, создавать и администрировать модели и приложения с помощью удобных и простых инструментов.

Модули расширения содержат специальные функции для моделирования электромагнитных и акустических полей, расчёта напряженно-деформированного состояния твёрдых тел, численного анализа гидродинамических, теплообменных и химических процессов. Модули интеграции обеспечивают совместную работу со сторонними CAD-системами и другими программами. Все модули COMSOL Multiphysics функционируют как единое целое вне зависимости от того, какие физические явления вы моделируете.

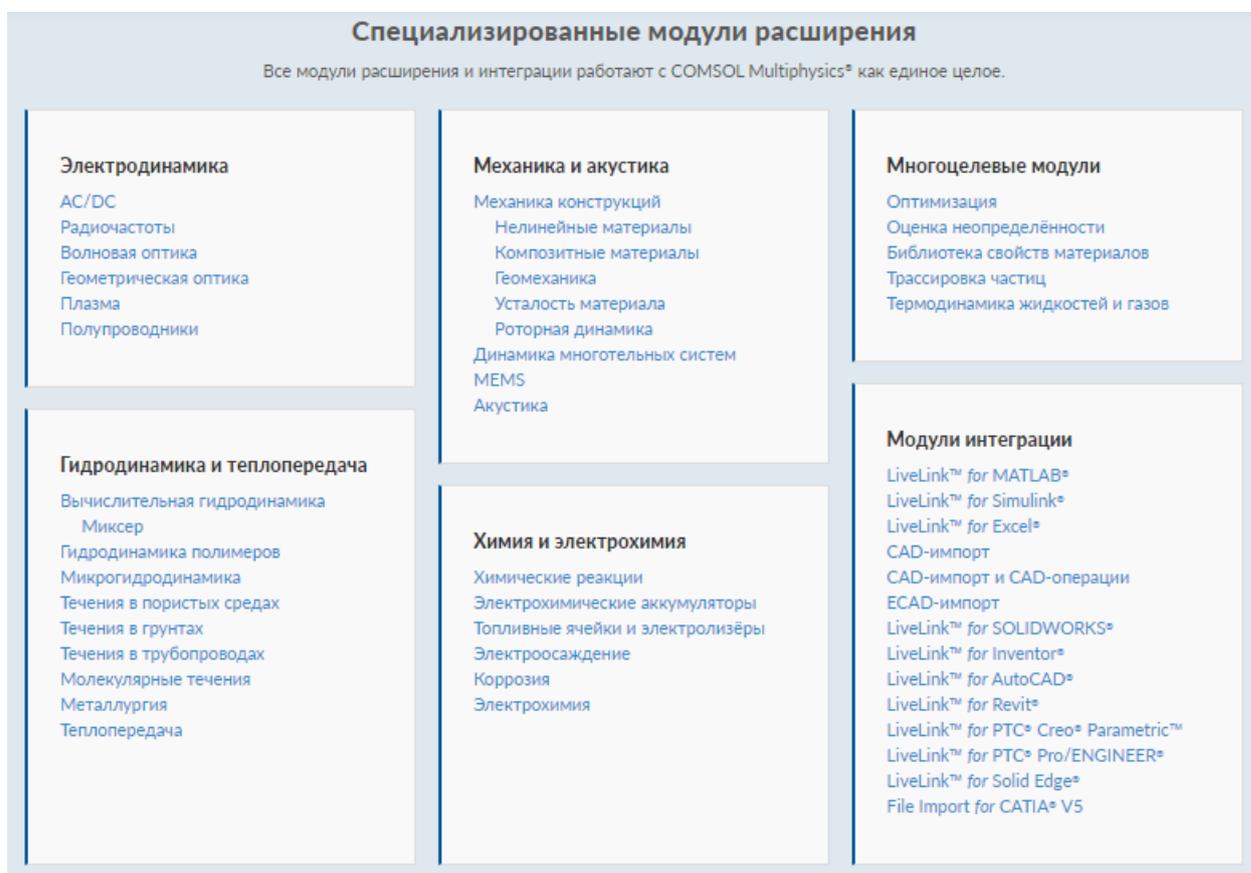


Рисунок 1.11 – Модули поддерживаемые в COMSOL

### 1.6.1 Интерфейс «Ламинарный поток»

Интерфейс Laminar Flow (spf) используется для расчета полей скорости и давления для течения однофазной жидкости в режиме ламинарного течения. Течение остается ламинарным до тех пор, пока число Рейнольдса ниже определенного критического значения. При более высоких числах Рейнольдса возмущения имеют тенденцию к росту и вызывают переход в турбулентность. Это критическое число Рейнольдса зависит от модели, но классическим примером является течение в трубе, где известно, что критическое число Рейнольдса составляет приблизительно 2000.

Физический интерфейс поддерживает несжимаемый поток, слабосжимаемый поток (плотность зависит от температуры, но не давления) и сжимаемый поток при низких числах Маха (обычно менее 0,3). Он также поддерживает течение неньютоновских жидкостей.

Уравнения, решаемые интерфейсом Laminar Flow, представляют собой уравнения Навье-Стокса для сохранения импульса и уравнение неразрывности для сохранения массы. В наиболее общем виде они представлены:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0; \quad (1.14)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F}; \quad (1.15)$$

где  $\rho$  – плотность  $\mathbf{u}$  – вектор скорости,  $p$  – давление,  $\mathbf{I}$  – единичная матрица  $\mathbf{K}$  – тензор вязких напряжений,  $\mathbf{F}$  – вектор объёмной силы.

Когда добавляется интерфейс Laminar Flow, в построителе моделей также добавляются следующие узлы по умолчанию: Fluid Properties , Wall и Initial Values. Другие узлы, реализующие, например, граничные условия и объёмные силы, можно добавить с панели инструментов Physics. Интерфейс Laminar Flow представлен на рисунке 1.12.

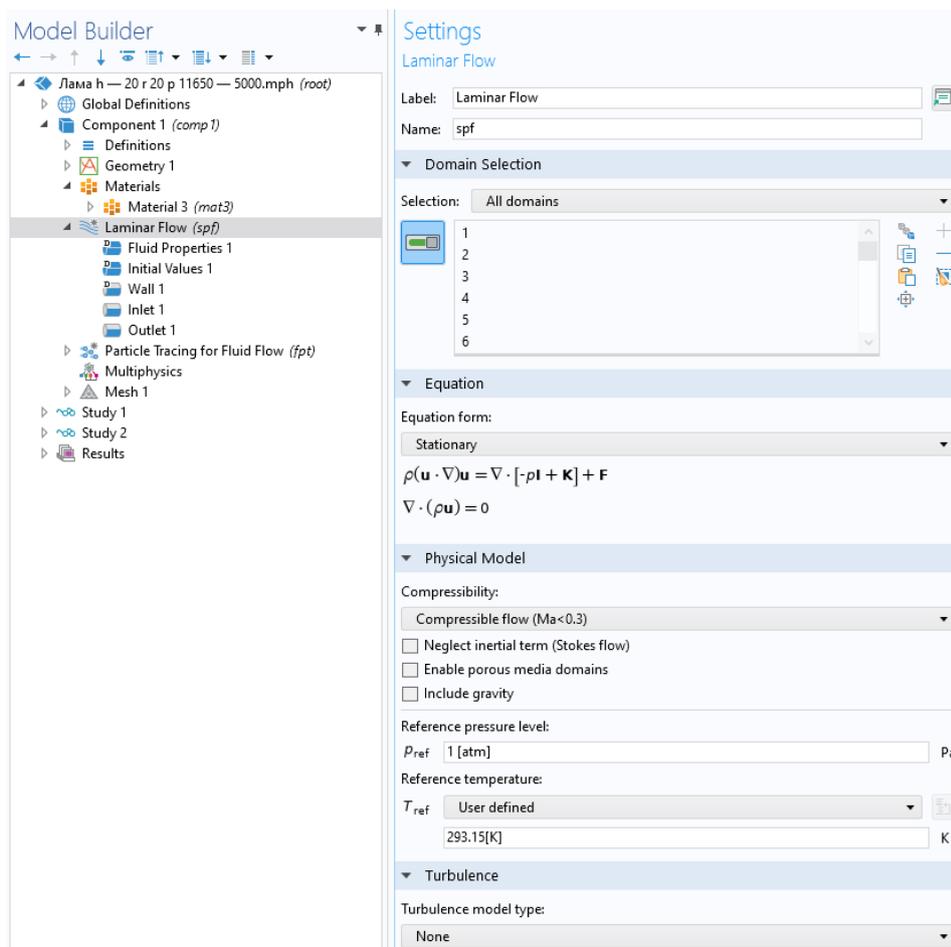


Рисунок 1.12 – Интерфейс Laminar Flow

Узел **Fluid Properties** добавляет уравнения импульса и неразрывности, решаемые физическим интерфейсом. Узел также предоставляет интерфейс для определения свойств материала жидкости.

Узел **Initial Values** служит начальными условиями для нестационарного моделирования или начальным предположением для нелинейного решателя в стационарном моделировании.

Узел **Wall** включает в себя набор граничных условий, описывающих условия течения жидкости на неподвижных, движущихся и протекающих стенках.

Узел **Inlet** следует использовать на границах, для которых существует чистый поток в домен. Чтобы получить численно корректную задачу, рекомендуется также учитывать выходные условия при задании входного условия. Например, если давление указано на выходе, скорость может быть

указана на входе, и наоборот. Задание вектора скорости как на входе, так и на выходе может вызвать трудности сходимости. Доступные параметры граничных условий для входа: скорость, полностью развитый поток и давление.

Узел **Outlet** следует использовать на границах, для которых существует чистый отток из домена. Доступные параметры граничных условий для выхода те же что и для узла Inlet.

### 1.6.2 Интерфейс «Отслеживание частиц в потоке»

Интерфейс Particle Tracing for Fluid Flow (fpt), используется для имитации движения частиц в фоновом газе. Движение частиц может быть вызвано комбинацией сил, включая сопротивление, гравитацию, электрические, магнитные, акустофоретические и определяемые пользователем силы. Также можно задавать распределение частиц по размеру или массе, вычислять температуру частиц и моделировать двунаправленно связанные взаимодействия частиц с жидкостью.

Движение частиц в жидкости подчиняется второму закону Ньютона, который гласит, что результирующая сила, действующая на объект, равна производной по времени его импульса в инерциальной системе отсчета:

$$\frac{d}{dt}(m_p v) = F_D + F_g + F_{ext}; \quad (1.16)$$

$$v = \frac{dq}{dt};$$

где  $m_p$  – масса частицы,  $v$  – скорость частицы,  $q$  – положение частицы,  $F_D$ ,  $F_g$ ,  $F_{ext}$  – силы сопротивления, гравитации и другие силы соответственно.

Когда добавляется этот физический интерфейс, по умолчанию также добавляются в построитель моделей эти узлы: Wall и Particle Properties. Затем из панели инструментов Physics добавляются другие узлы, реализующие, например, граничные условия и объемные силы. Интерфейс Particle tracing for fluid flow представлен на рисунке 1.13.

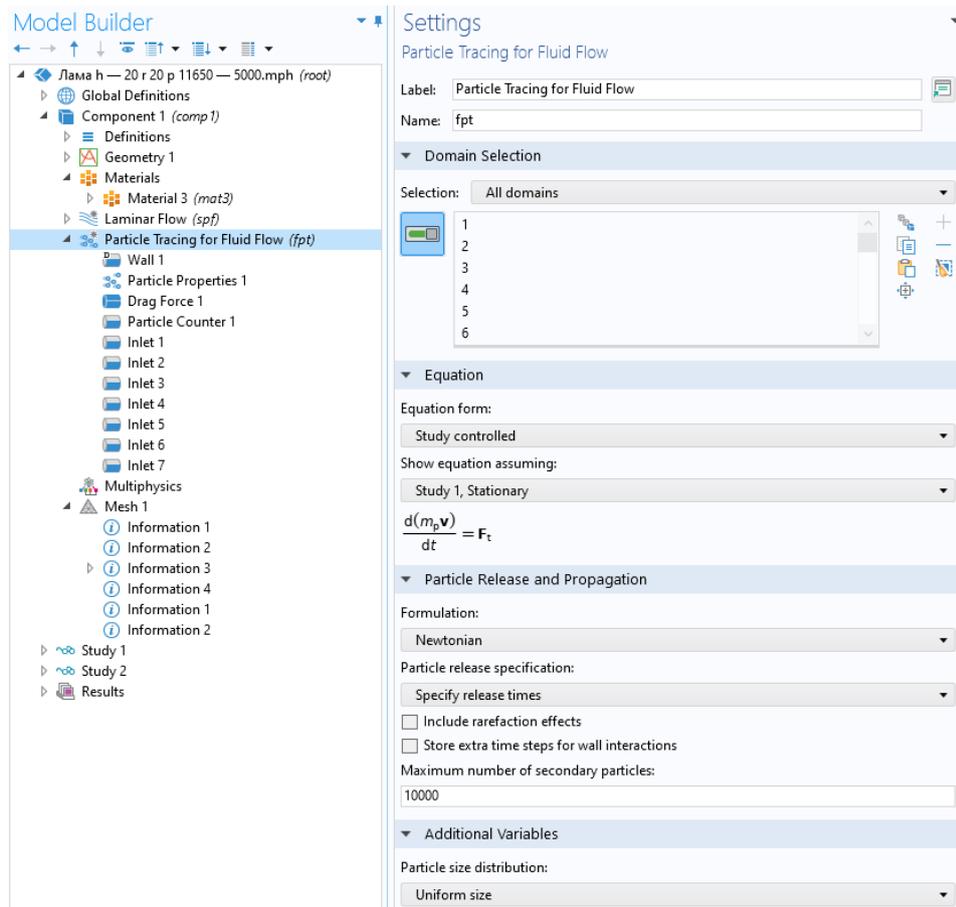


Рисунок 1.13 Интерфейс Particle tracing for fluid flow

Узел **Wall**, чтобы определить, что происходит с частицами при контакте со стеной.

Узел **Particle Properties**, предназначен для того чтобы задать в нём размер частиц, плотность, число зарядов и скорость частиц в зависимости от того, выбрана ли ньютоновская формула или безмассовая формула.

Узел **Drag Force** предназначен для задания силы сопротивления к частицам в газе. Сила сопротивления в данном узле как:

$$F_D = \frac{m_p(u - v)}{\tau_p}, \quad (1.17)$$

где  $m_p$  – масса частицы,  $\tau_p$  – время отклика скорости частицы,  $v$  – скорость частицы,  $u$  – скорость жидкости в месте нахождения частицы.

Время отклика частиц определяется из соотношения:

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_D Re_r}, \quad (1.18)$$

где  $\rho_p$  – плотность частиц,  $d_p$  – диаметр частицы,  $\mu$  – вязкость частиц,  $C_D$  – безразмерный коэффициент сопротивления,  $Re_r$  – относительное число Рейнольдса.

Безразмерный коэффициент сопротивления в свою очередь определяется как кусочная функция относительного числа Рейнольдса (рис. 1.14)

RANGE	CORRELATION
$Re_r \leq 0.01$	$C_D = \frac{24}{Re_r} \left(1 + \frac{3}{16} Re_r\right)$
$0.01 < Re_r \leq 20$	$C_D = \frac{24}{Re_r} (1 + 0.1315 Re_r^{0.82 - 0.05w})$
$20 < Re_r \leq 260$	$C_D = \frac{24}{Re_r} (1 + 0.1935 Re_r^{0.6305})$
$260 < Re_r \leq 1500$	$\log C_D = 1.6435 - 1.1242w + 0.1558w^2$
$1500 < Re_r \leq 1.2 \times 10^4$	$\log C_D = -2.4571 + 2.5558w - 0.9295w^2 + 0.1049w^3$
$1.2 \times 10^4 < Re_r \leq 4.4 \times 10^4$	$\log C_D = -1.9181 + 0.6370w - 0.0636w^2$
$4.4 \times 10^4 < Re_r \leq 3.38 \times 10^5$	$\log C_D = -4.3390 + 1.5809w - 0.1546w^2$
$3.38 \times 10^5 < Re_r \leq 4 \times 10^5$	$C_D = 29.78 - 5.3w$
$4 \times 10^5 < Re_r \leq 1 \times 10^6$	$C_D = 0.1w - 0.49$
$1 \times 10^6 < Re_r$	$C_D = 0.19 - \frac{8 \times 10^4}{Re_r}$

Рисунок 1.14 – Кусочная функция относительного числа Рейнольдса

Из узла **Inlet** выпускаются частицы в область моделирования из выбранных границ. Можно задать начальную скорость частицы в глобальных координатах или в другой системе координат.

Узел **Particle Counter** предназначен для вычисления информации о частицах, расположенных в наборе выбранных доменов или на наборе выбранных границ. Счетчик может обнаруживать все частицы или только частицы, высвобождаемые определенной функцией высвобождения.

### 1.6.3 Процедура решения задач в COMSOL

Для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений в COMSOL используется метод Ньютона-Рафсона. Причём для решения этих

дифференциальных уравнений можно использовать 2 подхода – Fully Coupled и Segregated.

Суть метода Ньютона:

Пусть  $L(U) = 0$  – система алгебраических уравнений, полученная после дискретизации математической модели, где  $L$  – оператор, описывающий систему нелинейных уравнений,  $U$  – вектор решения. Для того чтобы решить эту систему запишем:

$$-\frac{dL}{dU}(U_{j-1})(U_j - U_{j-1}) = L(U_{j-1}), \quad (1.19)$$

где  $\frac{dL}{dU} = J$  – якобиан,  $U_j - U_{j-1}$  – разность решений на текущей и предыдущей итерациях.

Отсюда следует что, для старта метода необходимо начальное приближение  $U_0$ .

Различие подходов Fully Coupled и Segregated состоит в том как именно рассчитывается якобиан системы и как осуществляется переход к решению систем линейных алгебраических решений.

В подходе Fully Coupled общий якобиан включает все уравнения и переменные:

$$J = \frac{dL}{dU} = \begin{pmatrix} \partial L_1 / \partial U_1 & \partial L_1 / \partial U_2 \\ \partial L_2 / \partial U_1 & \partial L_2 / \partial U_2 \end{pmatrix}, \quad (1.20)$$

и решается единая система уравнений

$$-J\Delta U = L. \quad (1.21)$$

В подходе Segregated якобиан рассчитывается отдельно для каждой отдельной группы уравнений:

$$J_1 = \frac{dL_1}{dU_1}, \quad J_2 = \frac{dL_2}{dU_2}, \quad (1.22)$$

и группы уравнений решаются последовательно в итерационном процессе

$$-J_1\Delta U_1 = L_1, \quad -J_2\Delta U_2 = L_2. \quad (1.23)$$

Также в подходе Segregated используются только диагональные элементы полного якобиана.

На рисунке 1.15 представлена простая иллюстрация метода Ньютона. Имеется некая нелинейная корень которой необходимо найти. Мы задаём начальное приближение  $U_0$ , рассчитываем значение функции в этой точке и дальше с помощью линеаризации находим следующее приближение и повторяем эту процедуру пока мы не получим за какое-то количество итераций сошедшееся решение

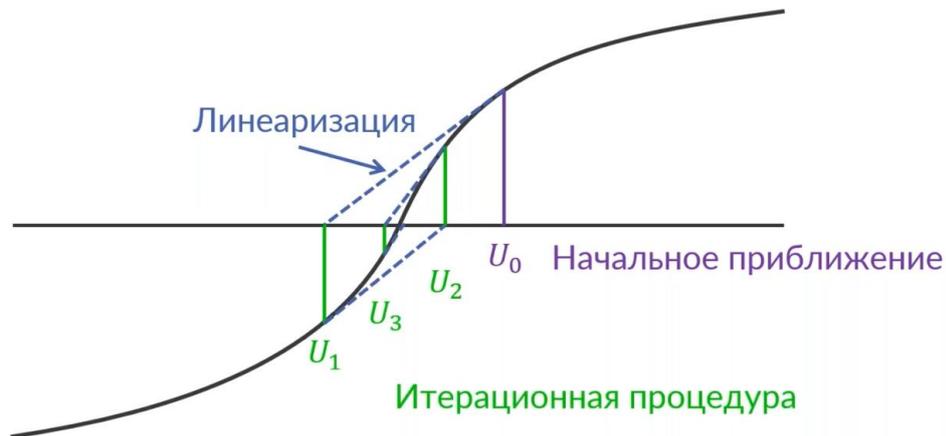


Рисунок 1.15 – Наглядная иллюстрация метода Ньютона

Критерием сходимости решения нелинейной задачи является оценка ошибки решения. После того как было получено новое значение вектора решения мы заново решаем систему линейных алгебраических уравнений относительно переменной  $E$ :

$$-J(U_{k-1})E = L(U_{k-1}), \quad (1.24)$$

где  $E$  – оценка ошибки решения.

Далее  $E$  используется для расчёта критерия остановки:

$$e_U^2 = \frac{1}{M} \sum_j \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \frac{|E_{i,j}|^2}{W_{i,j}^2}, \quad (1.25)$$

где  $M$  – число полевых переменных  $N_j$  – число степеней свободы в  $j$ -ом уравнении  $W$  – весовой коэффициент.

Итерации останавливаются если выполняется условие:

$$e_U < kR, \quad (1.26)$$

где  $k$  – коэффициент погрешности,  $R$  – относительная погрешность.

## 2 Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента по определению химических свойств 112-го и 114-го элементов в лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований в г. Дубна на ускорительном комплексе ДЦ-280 создана установка. Установка включает в себя газонаполненный сепаратор продуктов ядерных реакций, газовую камеру сбора отсепарированных ядер отдачи, систему быстрого газового транспорта летучих элементов и детектирующий модуль - криодетектор. На установке будет изучаться летучесть и адсорбция на поверхности золота элементов 112 и 114 методом газовой термохроматографии.

### 2.1 Моделирование газовых потоков

В качестве прототипа для моделирования была использована камера сбора ядер отдачи разработанная для другого сепаратора SHELS ускорительного комплекса ЛЯР (рис. 2.1).

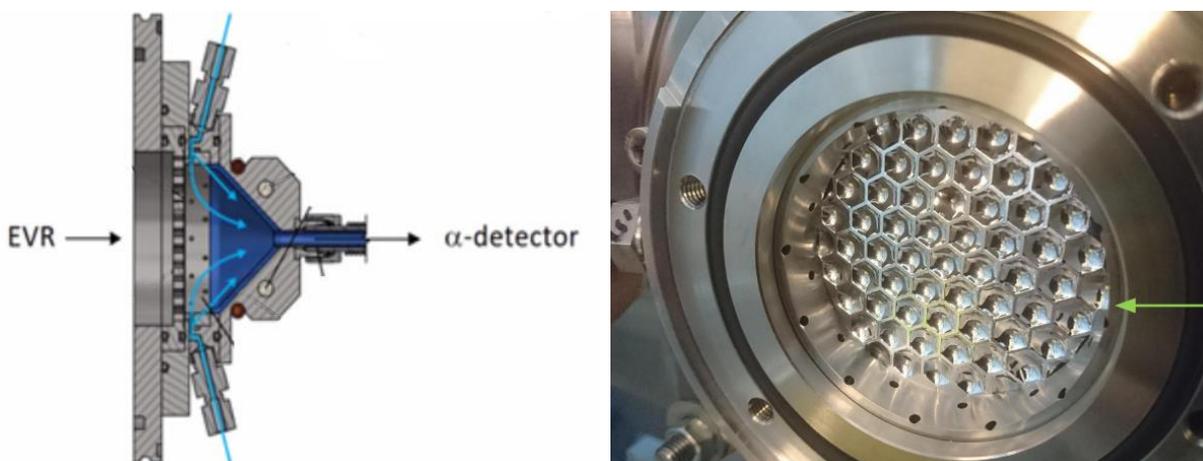


Рисунок 2.1 – Камера сбора ядер отдачи сепаратора SHELS

Для построения геометрии были использованы встроенные в COMSOL инструменты моделирования (рис. 2.2).

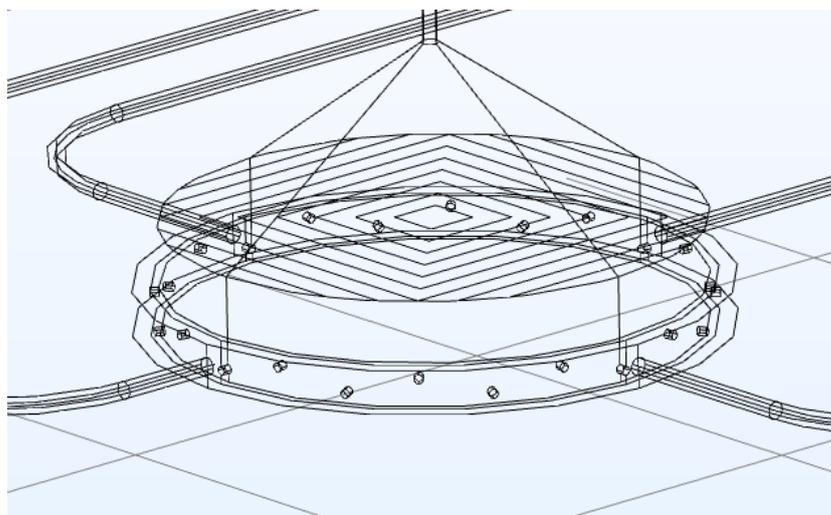


Рисунок 2.2 – Геометрия камеры диаметром 60 мм в COMSOL

Данная камера состоит из четырёх капилляров диаметром 2 мм подсоединяемых к распределительному кольцу, в котором предварительно проделаны 24 отверстия диаметром 1 мм, и выводящего капилляра диаметром также 2 мм и длиной 1000 мм, высота цилиндрической и конической частей – 12 и 20 мм соответственно. Между камерой и газонаполненным сепаратором установлена майларовая фольга.

В камеру подаётся смесь газов, состоящая из гелия и аргона в соотношении 70:30. Данная смесь задаётся в интерфейсе Materials (рис. 2.3).

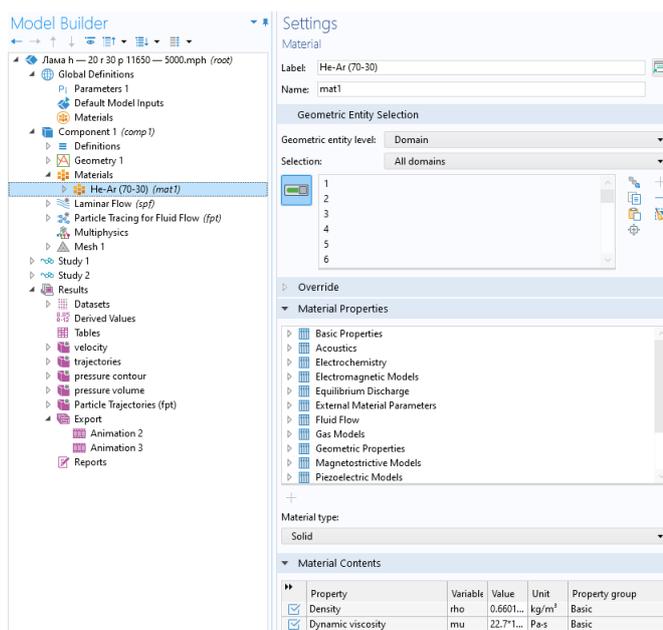


Рисунок 2.3 – Узел Materials

Далее подключаем для расчёта физический интерфейс **Laminar Flow** для расчета полей скорости и давления. В узле inlet задаём скорость потока 16 м/с, так насос в газовом контуре обеспечивает объёмный поток 3 л/м. В узле Outlet задаём избыточное давление 5000 Па.

Затем переходим к построению сетки. В инструкциях ПО COMSOL указано, что наиболее подходящая сетка для расчёта – это тетраэдр. Размеры сетки выбирались из соображений того чтобы, при полностью построенной сетке не менялась форма мельчайших деталей. На рисунке 2.4 представлена полностью построенная сетка.

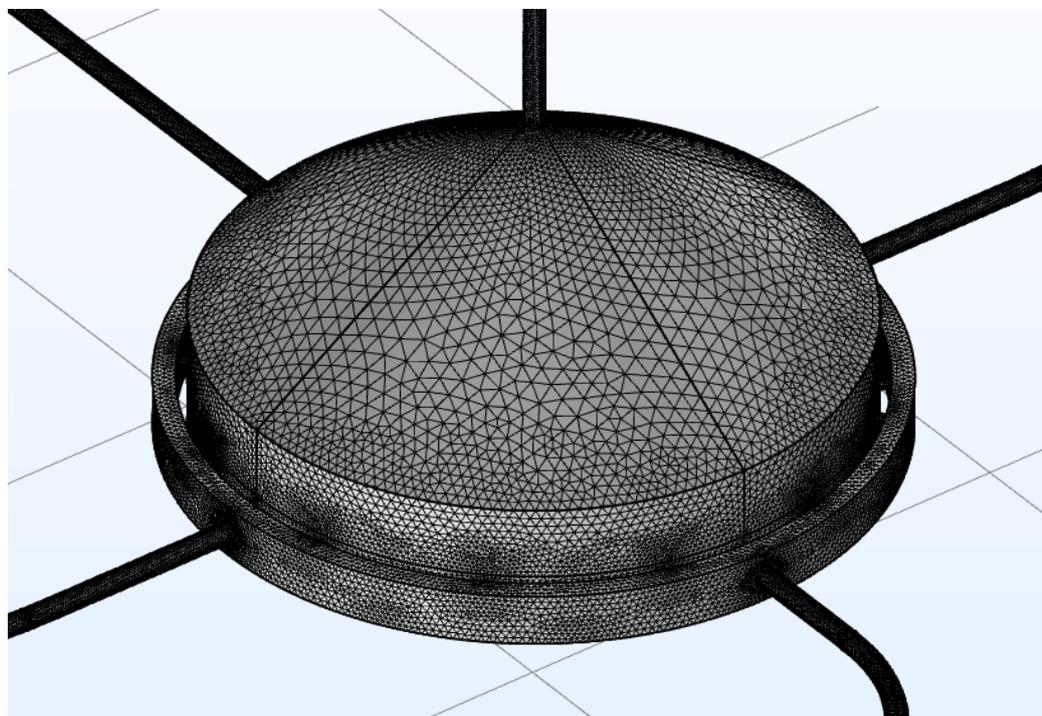


Рисунок 2.4 – Построенная сетка для камеры диаметром 60 мм в COMSOL

После построения сетки запускаем стационарный решатель и рассчитываем профиль скоростей и давлений.

На рисунке 2.5 представлен профиль скоростей на котором видно, как меняется скорость внутри камеры и капилляров.

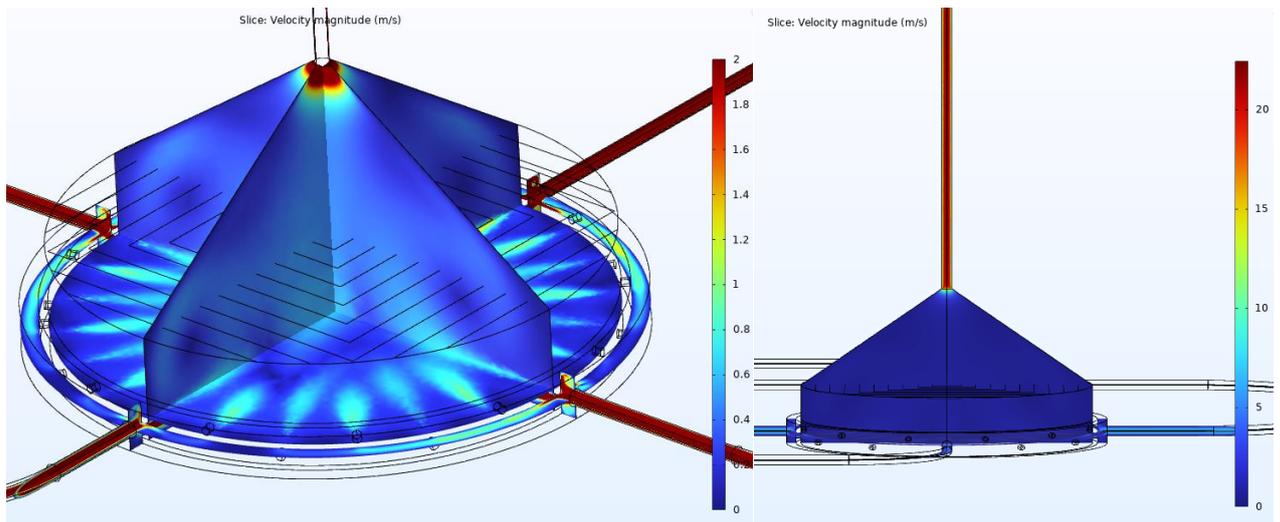


Рисунок 2.5 – Профиль скоростей внутри камеры диаметром 60 мм

Для того чтобы более наглядно видеть, как движется смесь газов внутри был построен дополнительный график линий тока (рис. 2.6)

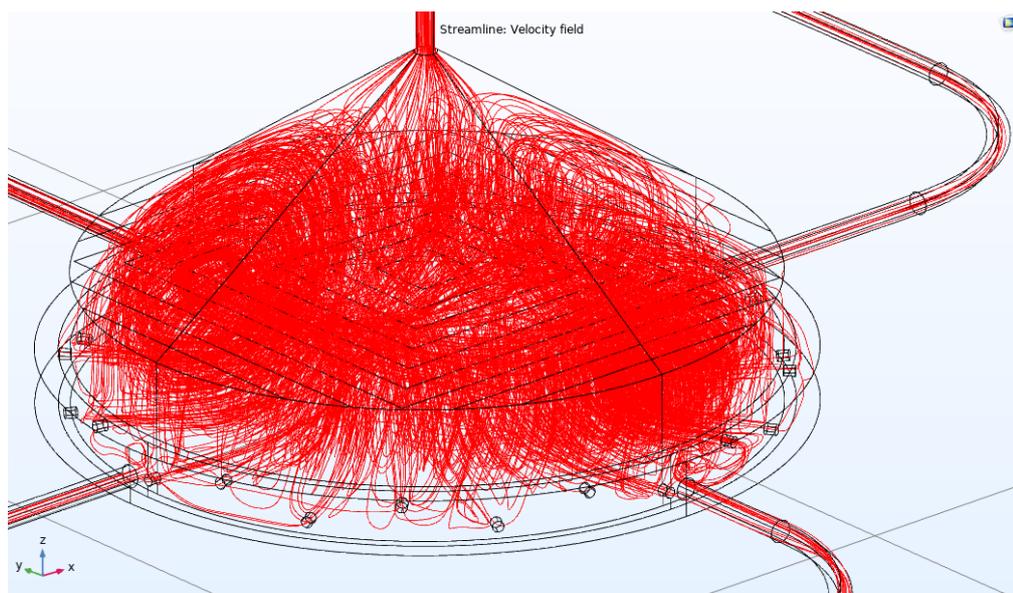


Рисунок 2.6 – Линии тока

Распределение давлений представлено на рисунке 2.7. Из графика видно, что по всему газовому контуру создается градиент давлений равный 6500 Па.

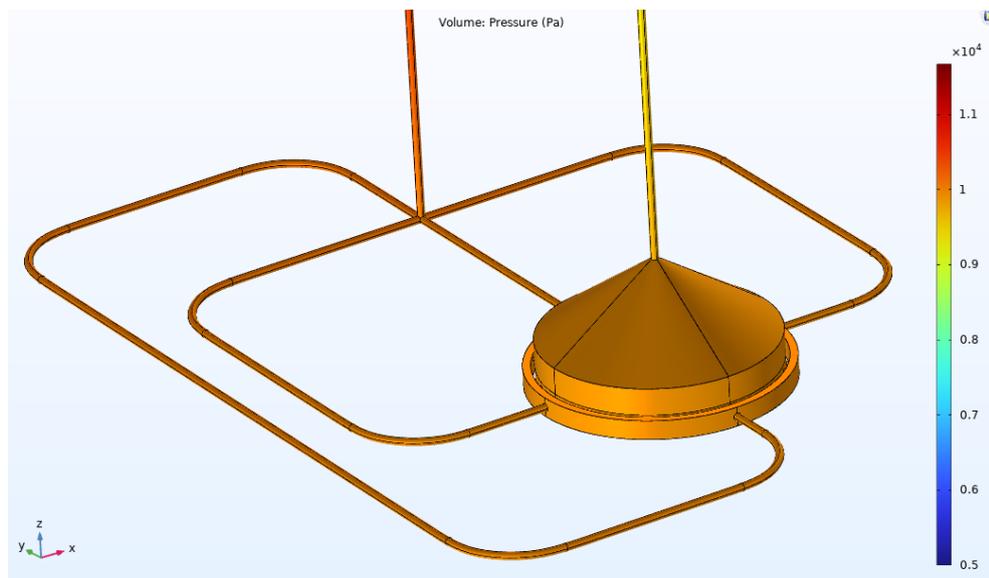


Рисунок 2.7 – Распределение давлений

Таким образом был проведён расчёт полей скорости и градиентов давлений для камер диаметрами 30, 40, 50, и 60 мм.

## 2.2 Моделирование трассировки частиц

Для моделирования трассировки частиц были получены данные по вертикальному и горизонтальному распределению продуктов ЯР в фокальной плоскости сепаратора Grand (рис 2.8, 2.9). На основе этих данных был проведён расчёт количества продуктов ЯР попадающих в камеру при различных диаметрах входного окна. Для этого были проинтегрированы аппроксимирующие линии и за максимум был взят размер рамки составляющий 60x60 мм. В целях ускорения расчёта максимальное количество частиц, попадающих в эту рамку было принято равным 200. Далее для более точного задания термализовавшихся частиц были проинтегрированы рамки размерами от 6x6 мм до 60x60 мм с шагом 6 мм. А отношение интеграла меньшей рамки к интегралу наибольшей рамки и есть доля частиц, попадающих в меньшую рамку.

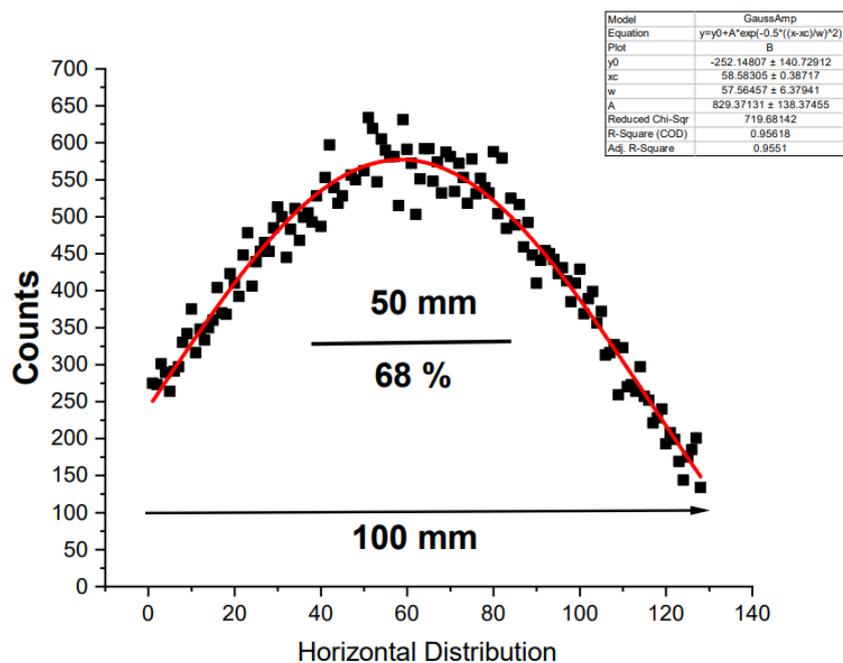


Рисунок 2.8 – Горизонтальное распределение продуктов ЯР в фокальной плоскости сепаратора Grand

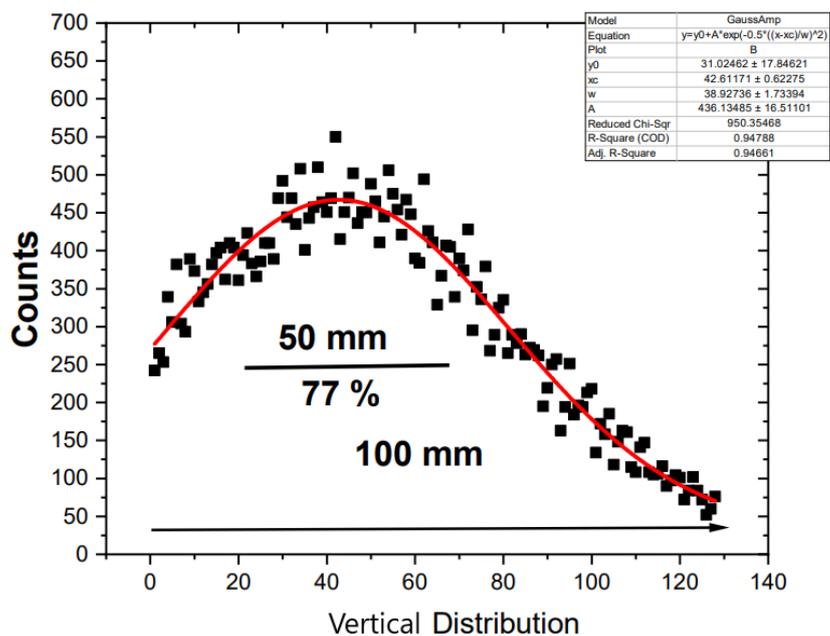


Рисунок 2.9 – Вертикальное распределение продуктов ЯР в фокальной плоскости сепаратора Grand

Таким образом было подсчитано сколько частиц попадает в каждую из областей. На рисунке 2.10 представлен пример распределения частиц для камеры диаметром 60 мм.

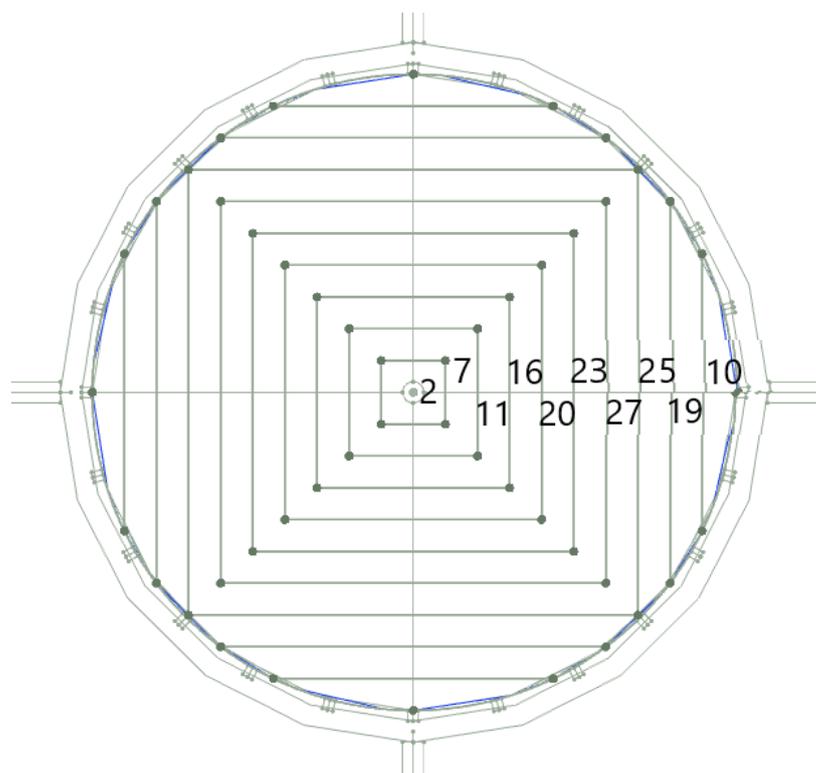


Рисунок 2.10 – Количество частиц попадающих в каждую из областей

Далее подключаем интерфейс Particle tracing for fluid flow.

В узле Wall задаём freeze, так как из-за короткого периода полураспада если частица попадает на стенку, то фактически мы её теряем. В узле Particle Properties задаём массу и диаметр частиц. Подключаем узел Drag Force, в котором для фонового газа задаём плотность и динамическую вязкость и уже рассчитанное поле скоростей. В сечении на глубине 12 мм задаём несколько узлов Inlet и на выходе узел Particle Counter.

В случае с камерой диаметром 60 мм задаём 10 узлов inlet со случайным распределением внутри рамок (рисунок 2.11) и проводим несколько расчётов и высчитываем среднее время транспорта.

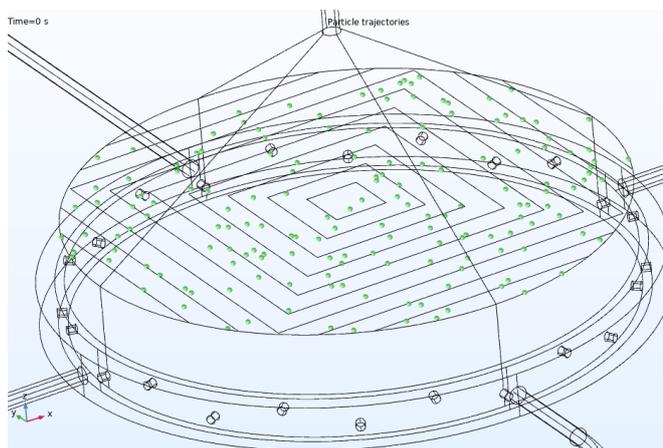


Рисунок 2.11 – Начальное распределение внутри камеры диаметром 60 мм

Результаты расчётов транспорта частиц внутри камеры сбора ядер отдачи представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчёта транспорта частиц

D, мм	t, с	$N_{max}$	$N_0$	$\sum N_0$	$N(T_{1/2})$	$\sum N(T_{1/2})$	$\eta(N_{max}), \%$	$\eta(T_{1/2}), \%$
30	0,2	43	15	30	11,24	17,31	0,40	0,11
	0,4		5		2,81			
	0,6		5		2,10			
	0,8		2		0,63			
	1		0		0,00			
	1,2		3		0,53			
40	0,2	79	15	52	11,24	26,07	0,33	0,16
	0,4		12		6,73			
	0,6		10		4,20			
	0,8		6		1,89			
	1		7		1,65			
	1,2		2		0,35			
50	0,2	128	11	88	8,24	36,63	0,29	0,23
	0,4		15		8,42			
	0,6		21		8,83			
	0,8		23		7,24			
	1		12		2,83			
	1,2		6		1,06			
60	0,2	160	15	94	11,24	43,12	0,27	0,27
	0,4		25		14,03			
	0,6		23		9,67			
	0,8		14		4,41			
	1		13		3,07			
	1,2		4		0,71			

Обозначения:  $D$  – диаметр камеры,  $t$  – интервал времени,  $N_{\max}$  – количество частиц, заданных при учёте что в рамку 60x60 попадает 200 частиц,  $N_0$  – количество частиц пролетевших к транспортному капилляру за интервал времени  $t$ ,  $\sum N_0$  – общее количество частиц пролетевших к транспортному капилляру за время 1,2 с.,  $N(T_{1/2})$  – количество частиц пролетевших к транспортному капилляру за интервал времени  $t$  с учётом закона радиоактивного распада ( $T_{1/2}$  принят за 0,48 с.),  $\sum N(T_{1/2})$  – общее количество частиц пролетевших к транспортному капилляру за время 1,2 с учётом закона радиоактивного распада,  $\eta(N_{\max})$ ,  $\eta(N_{\max})$  – эффективность сбора камеры относительно максимального числа частиц которое попадает во её входное окно с учётом периода полураспада,  $\eta(D_{\max})$  – эффективность сбора камеры относительно максимального числа частиц которое попадает во входное окно диаметром 60 мм с учётом периода полураспада.

### 2.3 Обсуждение результатов

Анализируя полученные в таблице 2.1 данные можно сделать вывод, что при уменьшении диаметра камеры с 60 до 30 мм эффективность транспорта частиц растёт, однако уменьшается количество частиц, пролетевших к транспортному капилляру в 2.5 раза. Расчет полей скорости и давлений при различных диаметрах тормозящей части камеры показал, что соотношение между давлением и скоростью соответствует числу Рейнольдса, а течение остается ламинарным до тех пор, пока число Рейнольдса ниже 2000, при более высоких числах Рейнольдса возмущения имеют тенденцию к росту и вызывают переход в турбулентность при снижении эффективности сбора ядер отдачи. Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что диаметр в 60 мм является наиболее оптимальным для геометрии камеры сбора ядер отдачи.

### **3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела является определение экономической целесообразности моделирования газовых потоков в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND в COMSOL Multiphysics.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить потенциальных потребителей результатов исследования.
2. Провести анализ конкурентных технических решений.
3. Выполнить SWOT-анализ: описать сильные и слабые стороны проекта, выявить возможности и угрозы для реализации проекта.
4. Оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации.
5. Построить календарный план-график проведения работ научно-исследовательского проекта.
6. Рассчитать бюджет научного исследования.

Определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективности исследования.

### 3.1 Предпроектный анализ

#### 3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В процессе написания магистерской диссертации были определены потенциальные потребители результатов исследования. Для анализа потребителей необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные отрасли научной промышленности, основная цель которых, это использование получение и изучение физико-химических свойств короткоживущих трансактинидов.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данной методики. Результаты сегментирования представлены в рисунке 3.1.

		Математическая модель газовых потоков в камере сбора ядер отдачи		
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Иные отрасли
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Рисунок 3.1. Карта сегментирования рынка услуг по использованию модели

### 3.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В данной работе были рассчитаны газовые потоки в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND в программе COMSOL Multiphythics, а в качестве конкурента выбрано проведение данных расчётов в программе FlowVision.

Проведем данный анализ с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к</sub>
1. Скорость расчёта	0,5	5	4	2,5	2
2. Удобство использования выбранной модели	0,3	5	4	1,5	1,2
3. Простота понимания модели	0,1	5	5	0,5	0,5
4. Надежность модели	0,05	4	4	0,2	0,2
5. Сходимость модели	0,03	4	4	0,12	0,12
6. Адаптивность метода	0,02	4	4	0,08	0,08
Итого	1	27	24	4,9	4,1

Позиция разработки и конкурентов оценивается по пятибалльной шкале. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (3.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента,  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что расчет газовых потоков в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND в программе

COMSOL Multiphythics по многим показателям является наиболее предпочтительным по сравнению расчётом при помощи FlowVision, так как значение 4,9 больше значения 4,1.

### 3.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами компании. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде [29,30].

Приведем матрицу SWOT-анализа для моделирования газовых потоков в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND в программе COMSOL Multiphythics.

Таблица 3.2 – Матрица SWOT - анализа

	<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
	<p>С1. Высокая точность расчета</p> <p>С2. Наличие дополнительного функционала, облегчающего работу пользователей</p> <p>С3. Высокая скорость обработки информации</p> <p>С4. Наличие мануалов для полноценной корректировки ошибок</p> <p>С5. Эксклюзивность работы</p>	<p>Сл1. Высокая потребность ресурсов памяти в моделировании</p> <p>Сл2. Сильная зависимость от мощности и производительности оборудования</p> <p>Сл3. Отсутствие отечественных аналогов программ расчета газовых потоков</p>
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Добавление дополнительных расчетов с учетом пожеланий заказчика</p> <p>В2. Реализация новых способов взаимодействия с другими модулями программы</p>	<p><b>1. В1С2С3</b> Наличие дополнительных расчетов и высокая скорость обработки данных позволяют достаточно в короткое время добавлять дополнительные функциональные предложения, необходимые заказчику</p> <p><b>2.В2С1</b> – высокая скорость расчета и достаточно удобный интерфейс позволяют</p>	<p><b>2. В1В2Сл1Сл2Сл3</b> - добавление новых функциональных возможностей, высокая потребность ресурсов памяти, сильная зависимость от мощности и производительности оборудования могут воспрепятствовать реализации новых способов</p>

<p>ВЗ. Заказ подобной разработки другими заказчиками</p>	<p>моментально переключаться между различными модулями и проводить расчет с несколькими модулями программы  <b>3.ВЗС1С2С3</b> – сильные стороны проекта позволят привлечь потенциальных заказчиков вследствие высоких скоростей построения модели, расчета и обработки данных</p>	<p>взаимодействия с другими модулями программы.  <b>3. ВЗСл3</b> – узкая область применения не всегда позволяет произвести необходимые операции расчета, необходимые заказчикам</p>
<p><b>Угрозы</b>  У1. Неверное выполнение операций моделирования пользователем  У2. Кризис</p>	<p><b>1. У1С4</b>– Наличие мануалов позволяет проводить корректировки моделей  <b>2.У2С2С5</b> – Эксклюзивность расчетов и отсутствие специалистов по решению технических задач данного типа позволяет обеспечить конкуренцию за счет выполнения различных задач по расчету и оптимизации моделей разного типа</p>	<p><b>1.У1У2 Сл4</b> – слабые стороны проекта вследствие санкций могут привести к проблемам потенциальных обновлений программ расчета газовых потоков</p>

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективными в сложившейся ситуации являются следующие стратегии:

1. Создание потенциальных программ расчета моделей с более упрощенной автоматизированной структурой для проведения операций моделирования газовых потоков

2. Необходимо обучить сотрудников навыкам работы с альтернативными программами, обеспечив высокий уровень конкурентоспособности в случае продолжения политических санкций для обеспечения большей мобильности и мультизадачности исполнителей

### **3.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации**

Оценим степень готовности научной разработки к коммерциализации и выясним уровень собственных знаний для ее проведения. Для этого заполним специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности

проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта.

Таблица 3.3 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	1
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2

14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	2
	ИТОГО БАЛЛОВ	42	30

В итоге можно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации находится на среднем уровне. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку бизнес-плана и т.д.

### **3.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования**

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Для данного научно-технического исследования наиболее предпочтительным является такой метод коммерциализации как инжиниринг. Так как консультант имеет знания и опыт в оказании инженерно-технических услуг, но не имеет возможности построить собственное предприятие, заключается договор с заказчиком. Заказчик имеет собственное производство, но нуждается в дополнительном ведении узконаправленных проектов, которые выступают как вспомогательные для реализации рабочего процесса. Хотя методика и доступна в открытом доступе, необходимы ресурсы для найма сотрудников. В данном случае заказчику выгоднее заключать договор с компанией извне, а не создавать собственный отдел по расчету какой-либо составляющей процесса. Консультант же способен к выполнению большого количества задач и гибкости в отношении их количества и потраченного на проект времени.

### 3.2 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

#### 1. Цели и результат проекта.

Приведем информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представим в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИИ	Использование модели для модернизации имеющейся камеры
Компании атомной промышленности	Изучение свойств полученных из камеры элементов и, возможно, создание материалов на их основе
Частные инвесторы	Получение максимальной доходности в зависимости от вложений

Представим информацию об иерархии целей проекта и критерия достижения целей в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Создание математической модели камеры сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора Grand в ПО Comsol Multiphythics
Ожидаемые результаты проекта:	Созданная математическая модель камеры сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора Grand в ПО Comsol Multiphythics
Критерии приемки результата проекта:	Схождение результатов расчетов с реальными измерениями
Требования к результату проекта:	Требование:
	Камера должна обеспечивать максимально эффективный вынос частиц к детектору

## 2. Организационная структура проекта.

Определим участников рабочей группы данного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Представим эту информацию в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Гольцман А.И., ТПУ, магистр	Моделирование газовых потоков в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND в COMSOL Multiphythics	Основной разработчик проекта	492
2	Аксёнов Н.В., ОИЯИ ЛЯР, начальник сектора №3	Консультации по основным вопросам темы	Руководитель проекта	62
ИТОГО:				554

## 3. Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Представим эту информацию в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	865442
3.1.1. Источник финансирования	ОИЯИ ЛЯР
3.2. Сроки проекта:	4 месяца
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2022
3.2.2. Дата завершения проекта	22.05.2022

Таким образом, установлены цели и результаты проекта, рассмотрена организационная структура проекта, определены ограничения и допущения проекта.

### 3.3 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Таблица 3.8 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Внешний	Кризис	5	3	средний	Использование аналоговых альтернативных программ расчета	Изменение условий на мировом рынке
2	Финансовый	Повышение уровня инфляции во время реализации проекта	3	3	средний	Использование более дешевых альтернативных средств ПО для расчета газовых потоков	Изменение условий на мировом рынке
3	Производственный	Изменение объемов или сроков работ	3	2	низкий	Использование более удобных для использования программ для более быстрой работы	В зависимости от задач руководства

### 3.4 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ (рисунок 3.2). В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.



Рисунок 3.2 – Иерархическая структура работ

### 3.5 Планирование научно-исследовательского проекта

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и исполнитель (И). После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	И, НР
	2	Календарное планирование работ по теме	И
	3	Изучение материалов по теме	И
Выбор направления исследований	4	Моделирование камеры сбора ядер отдачи	И
	5	Выбор метода выполнения работы	И, НР
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Модернизация камеры сбора ядер отдачи	И
	7	Анализ результатов работы	И
Обобщение и оценка результатов	8	Составление отчета по работе	И

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Линейный график представлен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	2	02.02.2022	03.02.2022	Гольцман А.И. Аксенов Н.В.
2	Календарное планирование работ по теме	4	04.02.2022	08.02.2022	Гольцман А.И.



2	Календарное планирование работ по теме	Исполнитель	4	■																
3	Изучение материалов по теме	Исполнитель	17		■	■														
4	Моделирование камеры сбора ядер отдачи	Исполнитель	7				■													
5	Выбор метода выполнения работы	Научный руководитель, исполнитель	9				■	■												
6	Модернизация камеры сбора ядер отдачи	Исполнитель	35						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
7	Анализ результатов работы	Исполнитель	16																■	■
8	Составление отчета по работе	Исполнитель	6																	■

■ – исполнитель, ■ – научный руководитель.

Таким образом, построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

### **3.6 Бюджет научного исследования**

При планировании бюджета НИИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НИИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- нематериальные активы НИИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### **3.6.1 Расчёт амортизации оборудования**

Отразим стоимости всех материалов, используемых при разработке проекта, включая расходы на их приобретение и, при необходимости, на доставку.

В работе осуществлялся расчет амортизации оборудования и программного обеспечения, которое было приобретено еще до начала выполнения работ. При выполнении работы использовалась ПЭВМ – персональный компьютер на базе AMD Ryzen 3600 и Nvidia RX780, программное обеспечение «ComsolMultiphysics». Все данные и результаты приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Амортизация активов

№	Наименование оборудования	Количество, шт.	Срок полезного использования, г.	Срок использования в рамках исследования	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.	Амортизация, тыс.руб.
1	ПК	1	3	96	69999	6075,36
2	Программное обеспечение «Comsol Multiphysics»	1	1	67	3500000	557486,2
Итого:						563561,56

Обозначим общую стоимость оборудования или ПО за символ  $M$ , а количество рабочих дней, в течение которых использовался ноутбук или ПО обозначался символом  $d$ .

Срок полезного использования ноутбука по паспорту составляет 3 года. Количество рабочих дней, в течении которых использовался ПК составляет 96. Рассчитаем норму амортизации для ПК, с учётом того, что срок полезного использования составляет 3 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0,33$$

Общую сумму амортизационных отчислений для ПК находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \times M}{365} d = \frac{0,33 \times 69999}{365} \times 96 = 6075,36$$

Норма амортизации для программного обеспечения «ComsolMultiphysics» при СПИ 1 год

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{1} = 1$$

Общую сумму амортизационных отчислений для программного обеспечения «ComsolMultiphysics» находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \times M}{365} d = \frac{3500000}{365} \times 67 = 557486,2$$

### 3.6.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя (исполнителя) от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (3.2)$$

где  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (3.3)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: 10,4;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}}) \cdot k_p, \quad (3.4)$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3;  $k_p$  – районный коэффициент, равный 1,15 (г. Дубна).

Таблица 3.13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней выходные дни/праздничные дни	66	66
Потери рабочего времени: отпуск/невыходы по болезни	56	56
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	243

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$Z_m = 70000 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,15 = 104650 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{104650 \cdot 10,4}{243} = 4478,85 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 4478,85 \cdot 11 = 49267,35 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для исполнителя:

$$Z_M = 14800 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,15 = 22126 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{дн}} = \frac{22126 \cdot 10,4}{243} = 946,96 \text{ руб.}$$

$$Z_{\text{осн}} = 946,96 \cdot 96 = 90908,16 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_p$	$Z_M$ , руб	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Научный руководитель	70000	0,3	1,15	104650	4478,85	11	49267,35
Исполнитель	14800	0,3	1,15	22126	946,96	96	90908,16
Итого:							<u>140175,51</u>

### 3.6.3 Отчисления во внебюджетные фонды

Отразим обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (3.5)$$

$k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Отчислений во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Научный руководитель	49267,35
Исполнитель	90908,16
Коэффициент отчислений	0,302
Итого:	<u>42333,01</u>

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при

формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 3.16.

### 3.6.4 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергию и т.д. Рассчитывается общая сумма накладных расходов следующим образом:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \times (\text{сумма статей 1 – 3})$$

$$= 0,16 \times (42333,01 + 140175,51 + 563561,56) = 119371,21 \text{ руб}$$

$k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы, 16%

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

### 3.6.5 Бюджет научно-исследовательской работы

Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Амортизационные отчисления	563561,56
2. Основная заработная плата	140175,51
3. Отчисления во внебюджетные фонды	42333,01
4. Накладные расходы	119371,21
Бюджет затрат:	865441,29

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и исполнителя, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) и накладные расходы предприятия. Бюджет затрат составил 865441,29 рублей.

### 3.7 Организационная структура проекта

Для оценки общей экономической эффективности используются основные показатели:

- чистая текущая стоимость (NPV);
- индекс доходности (PI);
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- срок окупаемости (DPP).

#### 3.7.1. Чистая текущая стоимость

Чистая текущая стоимость (NPV) – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0$$

где:  $ЧДП_{опt}$  – чистые денежные поступления от операционной деятельности;  $I_0$  – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;  $t$  – номер шага расчета ( $t= 0, 1, 2 \dots n$ )  $n$  – горизонт расчета;  $i$  – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Расчёт NPV позволяет судить о целесообразности инвестирования денежных средств. Если  $NPV > 0$ , то проект оказывается эффективным.

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, тыс. руб.	0	1000	1000	1000	1000
2	Итого приток, тыс. руб.	0	1000	1000	1000	1000
3	Инвестиционные издержки, тыс. руб.	865,44	0	0	0	0
4	Операционные затраты, тыс. руб.	0	150	150	150	150
5	Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0	850	850	850	850
6	Налоги, тыс. руб. (20%)	0	170	170	170	170
7	Чистая прибыль, тыс. руб.(5-6)	-865,44	680	680	680	680
8	Чистый денежный поток (ЧДП), тыс. руб.(чистая прибыль+амортизация)	-865,44	766,54	766,54	766,54	766,54
9	Коэффициент дисконтирования при $i=10\%$ (КД)	1	<u>0,909</u>	<u>0,826</u>	<u>0,751</u>	<u>0,683</u>
10	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), тыс. руб. (8*9)	-866,44	696,85	633,54	575,91	523,56
11	$\sum$ ЧДД, тыс. руб.			1563,17		
12	Итого NPV, тыс. руб.			698,95		

### 3.7.2. Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока.

Таблица 3.18 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Дисконтированный чистый денежный поток, руб.	-866	695,85	633,54	575,91	523,56
2	То же нарастающим итогом, руб.	-866	-170,15	463,39	1039,30	1563,17
3	Дисконтированный срок окупаемости	<b>DPP<sub>дск</sub></b> = 1+170,15/633,54.=1.27 года				

### 3.6.3. Внутренняя ставка доходности

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR). Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования ( $i$ ) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 3.18 и графика, представленного на рисунке 3.3.

Таблица 3.19 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименования показателя	0	1	2	3	4	NPV
1	Чистые денежные потоки	-866000	766540	766540	766540	766540	
2	Коэффициент дисконтирования						
	$i=0,1$	1	0,909	0,826	0,751	0,683	
	$i=0,2$	1	0,833	0,694	0,578	0,482	
	$i=0,3$	1	0,769	0,592	0,455	0,35	
	$i=0,4$	1	0,714	0,51	0,364	0,26	
	$i=0,5$	1	0,667	0,444	0,295	0,198	
	$i=0,6$	1	0,625	0,390	0,244	0,153	
	$i=0,7$	1	0,588	0,335	0,203	0,12	
	$i=0,8$	1	0,555	0,308	0,171	0,095	

3	Дисконтированный денежный поток						
	$i=0,1$	-866000	696785	633162	575672	523547	1563165
	$i=0,2$	-866000	638528	531979	443060	369472	1117039
	$i=0,3$	-866000	589469	453792	348776	268289	794326
	$i=0,4$	-866000	547310	390935	279021	199300	550566
	$i=0,5$	-866000	511282	340344	226129	151775	363530
	$i=0,6$	-866000	479088	298951	187036	117281	216354
	$i=0,7$	-866000	450726	256791	155608	91985	89109
	$i=0,8$	-866000	425430	236094	131078	72821	-576

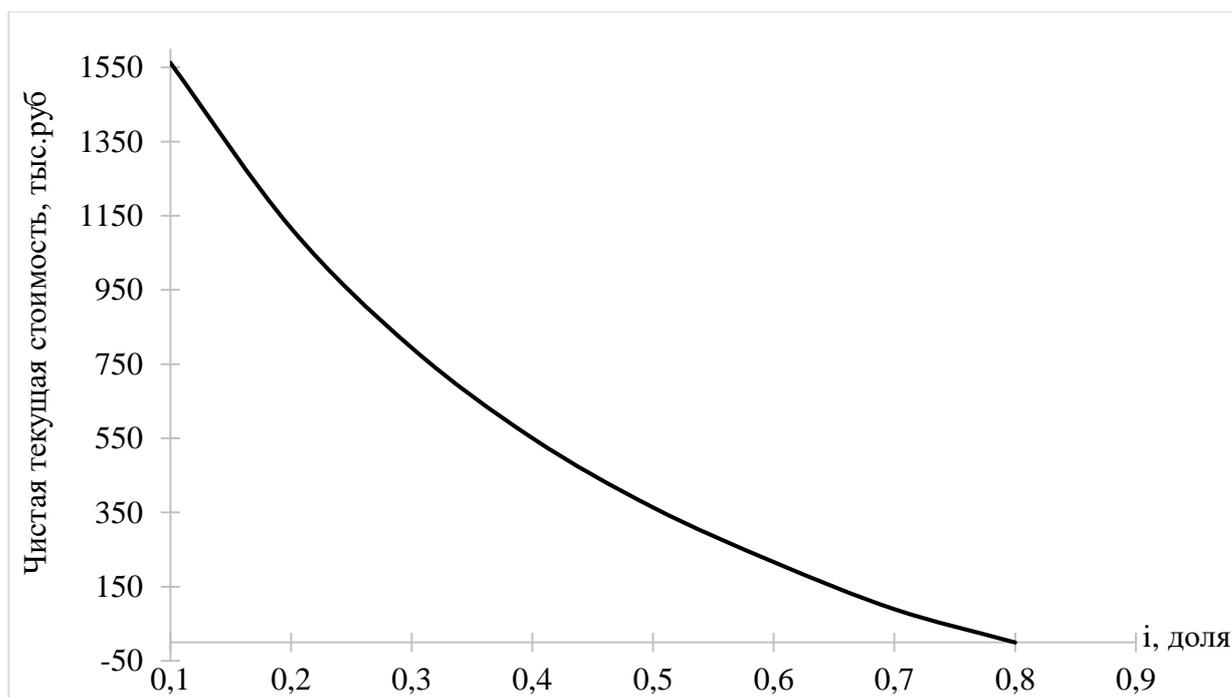


Рисунок 3.3 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы 3.19 и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,65.

### 3.8 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности научного исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин:

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{финр}}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (3.6)$$

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения,  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (3.7)$$

где  $a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки,  $b_i$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 3.20.

Таблица 3.20. Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО \ Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,10	5	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4
3. Помехоустойчивость	0,20	4	4
4. Энергосбережение	0,20	4	4
5. Надежность	0,25	4	4
6. Материалоемкость	0,10	3	3
Итого:	1	25	23

$$I_{\text{ТП}} = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 = 4,15$$

$$I_{\text{аналог}} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 = 3,9$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки  $I_{\text{исп.}i}$  определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп.}i}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}} \quad (3.8)$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.}1}}{I_{\text{исп.}2}} \quad (3.9)$$

Таблица 3.21 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,15	3,9
	Интегральный показатель эффективности	4,15	3,9
	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,065	

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской диссертации технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности.

Таблица 3.22. Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответствие»	Консультант по языковому разделу	Исполнитель
Разработка технического задания	О				
Составление и утверждение технического задания	О				
Выбор направления исследований	О				И
Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	О				И
Изучение возможностей расчетной модели					И
Освоение методики расчета на практике					И
Проведение расчетов	О				И
Анализ полученных данных	О				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

## **Выводы по разделу**

1. Потенциальными потребителями результатов исследования являются инвестиционные компании, частные инвесторы.

2. В результате проведения анализа конкурентных технических решений сделан вывод о том, что выбранный метод моделирования газовых потоков в камере в силу своей простоты и уникальности является наиболее предпочтительным, чем альтернативные технологии, используемые в расчете на данный момент.

3. Определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта. По итогам выполнения SWOT-анализа выбраны наиболее эффективные стратегии.

4. Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации показала средний уровень, который можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта.

5. В процессе планирования научно-исследовательского проекта построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

6. При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 865441,29рублей.

7. Оценка эффективности исследования показала, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

## **4 Социальная ответственность**

Социальная ответственность - ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом. Первостепенное значение при этом имеет безопасность применения технологий, которые создаются на основе достижений науки, предотвращение или минимизация возможных негативных последствий их применения, обеспечение безопасного как для испытуемых, как и для окружающей среды проведения исследований.

Расчёт газовых потоков в камере сбора ядер отдачи проводился в помещении №408 Лаборатории ядерных реакций им. Флёрва (ОИЯИ). Раздел также включает в себя оценку условий труда на рабочем месте, анализ вредных и опасных факторов труда, разработку мер защиты от них.

### **4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства**

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;

- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником [32].

## 4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как изображено на рисунке 4.1 [33].

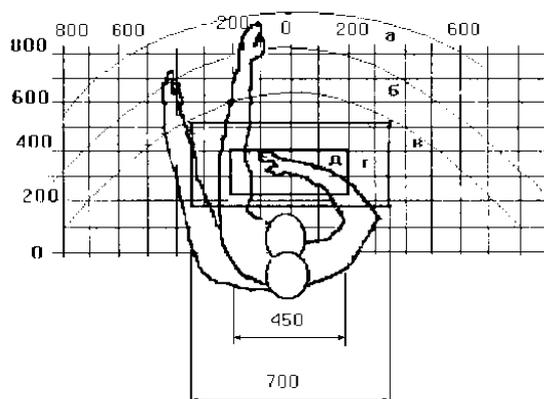


Рисунок 4.1. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- а - зона максимальной досягаемости рук;
- б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;
- в - зона легкой досягаемости ладони;
- г - оптимальное пространство для грубой ручной работы;
- д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- 1) дисплей размещается в зоне а (в центре);
  - 2) клавиатура - в зоне г/д;
  - 3) системный блок размещается в зоне б (слева);
  - 4) принтер находится в зоне а (справа);
  - 5) литература и документация, необходимая при работе находится в зоне легкой досягаемости ладони - в (слева);
- б) в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно.

При выборе рабочего места, а именно письменного стола должны быть учтены следующие требования, которые представлены в таблице 4.1 [33].

Таблица 4.1. Требования к оснащению рабочего места, предусматривающего длительную работу за ПК

Ширина рабочего стола	От 80 до 140 см
Высота рабочего стола	75 см
Глубина рабочего стола	От 60 до 80 см
Расстояние от глаз до монитора	От 50 до 60 см
Расстояние клавиатуры от края стола	От 10 до 30 см
Сидение	Должно позволять регулировку по высоте, повороту и углу наклона спинки (регулировки должны быть независимыми друг от друга)
Пространство для ног	Ширина от 30 см, глубина – от 40 см, с углом наклона до 20 градусов

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [33].

Также должна предусматриваться возможность регулировки экрана монитора [33]:

- 1) по высоте +3 см;
- 2) наклон относительно вертикали 10-20 градусов;
- 3) в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является ее размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырехугольную форму с закругленными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

В случае если работа оператора предполагает однообразную умственную работу, которая требует значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, то лучше всего выбирать неяркие, малоконтрастные цветовые оттенки (слабонасыщенные оттенки холодного голубого или зеленого цветов), которые не ослабляют внимание. Если работа требует большой умственной и физической напряженности, тогда следует использовать более теплые оттенки, которые способствуют повышению концентрации внимания [33].

В помещении №408 все необходимые организационные мероприятия соблюдены.

## **4.2 Производственная безопасность**

### **4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов**

Производственные условия на месте выполнения работы характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые по природе возникновения делятся на следующие группы:

- 1) физические;
- 2) химические;

3) психофизиологические;

4) биологические.

Опасные и вредные факторы, которые могут воздействовать на персонал при работе на ПЭВМ, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [34]
2. Повышенный уровень электромагнитного излучения	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности [35]
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий [36]
4. Превышение уровня шума	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [37]
5. Психофизиологические факторы	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [38]
6. Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [39]
7. Пожаровзрывоопасность	ГОСТ 12.1.044-2018 ССБТ Пожаровзрывоопасность веществ и материалов [40]

К психологически вредным факторам, воздействующим на персонал, можно отнести:

1) нервно - эмоциональные перегрузки;

2) умственное напряжение;

3) физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы отсутствуют.

## 4.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03) они должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м<sup>2</sup> [33].

## 4.2.3 Отклонение показателей микроклимата

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с нормами и приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	23-25	40-60	0,1
Теплый	22-24	40	0,1

Отклонение показателей микроклимата от нормы не вызывает повреждений или нарушений состояния здоровья, но может приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Оптимальная кратность воздухообмена в производственных помещениях находится в достаточно широких пределах: от 3 до 40 раз в час [34]. В используемом помещении установлен кондиционер марки Hisense

AUF-24ER4SCPA производительностью  $Q = 1000 - 1200 \text{ м}^3/\text{час}$ . Объем помещения ЛЯР 221 ОИЯИ составляет:

$$V = a \cdot b \cdot h = 6 \text{ м} \cdot 4 \text{ м} \cdot 3,5 \text{ м} = 84 \text{ м}^3. \quad (4.1)$$

Данный вентилятор обеспечивает следующую кратность воздухообмена (ВО) в лаборатории:

$$BO = \frac{Q}{V} = (1000 \div 1200) / 84 = 11,9 \div 14,29. \quad (4.2)$$

Таким образом установлено, что микроклимат в помещении №408 ЛЯР ОИЯИ соответствует оптимальным условиям работы [34].

#### 4.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение - распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля.

Экран и системные блоки ЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать допустимым нормам [35] приведённым таблице 4.4.

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы [35].

Таблица 4.4 – Допустимые уровни параметров электромагнитного поля

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты [35].

Таким образом установлено, что в помещении 408 ЛЯР ОИЯИ уровень электромагнитного излучения соответствует санитарным нормам [35].

#### **4.2.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

По нормативам освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [36].

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (Кз) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5 %.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться:

- системой общего равномерного освещения.

В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы:

- комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники;
- местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов) [36].

Площадь помещения:

$$S = a \cdot b, \quad (4.3)$$

где А – длина, м; В – ширина, м.

$$S = 6 \cdot 5 = 30 \text{ м}^2,$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор  $\rho_c = 50 \%$ , свежепобеленного потолка  $\rho_{II} = 70 \%$ . Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_3 = 1,5$ . Коэффициент неравномерности для светодиодных лент  $Z = 1,2$ .

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которых равен  $\Phi_{ЛД} = 2600 \text{ Лм}$ .

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две светодиодные ленты мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для светодиодных светильников с защитным рассеивателем лежит в диапазоне 1,1 – 1,3. Принимаем  $\lambda = 1,1$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,5 \text{ м}$ .

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (4.4)$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса,  $h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухлентовых светильников ОДОР:  $h_n = 3,5$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м.} \quad (4.5)$$

Из формулы

$$\Phi_n = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta} \quad (4.6)$$

находим число светодиодных лент N

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_n \cdot \eta} \quad (4.7)$$

$\eta$  определяем через индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{(a \cdot b)}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 5}{2(6 + 5)} = 1,36. \quad (4.8)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР со светодиодными лентами при  $\rho_{\Pi} = 70 \%$ ,  $\rho_c = 50 \%$  и индексе помещения  $i = 1,6$  равен  $\eta = 0,47$ .

Тогда

$$N = \frac{E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_n \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 30 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2600 \cdot 0,47} = 12 \text{ лент.}$$

При этом получается 6 светильников, т.е. 2 ряда по 3 светильника.

Из условий равномерности освещения определяем расстояния  $L_1$  и  $\frac{L_1}{3}$

,  $L_2$  и  $\frac{L_2}{3}$  по следующим уравнениям:

$$6000 = 2L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + 2 \cdot 265; L_1 = 1952 \text{ мм, } \frac{L_1}{3} = 651 \text{ мм;} \quad (4.9)$$

$$6000 = 2 \cdot L_2 + 2 \cdot 1227; L_2 = 1273 \text{ мм, } \frac{L_2}{3} = 637 \text{ мм;} \quad (4.10)$$

На рисунке 4.2 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами в помещении 408 ОИЯИ ЛЯР.

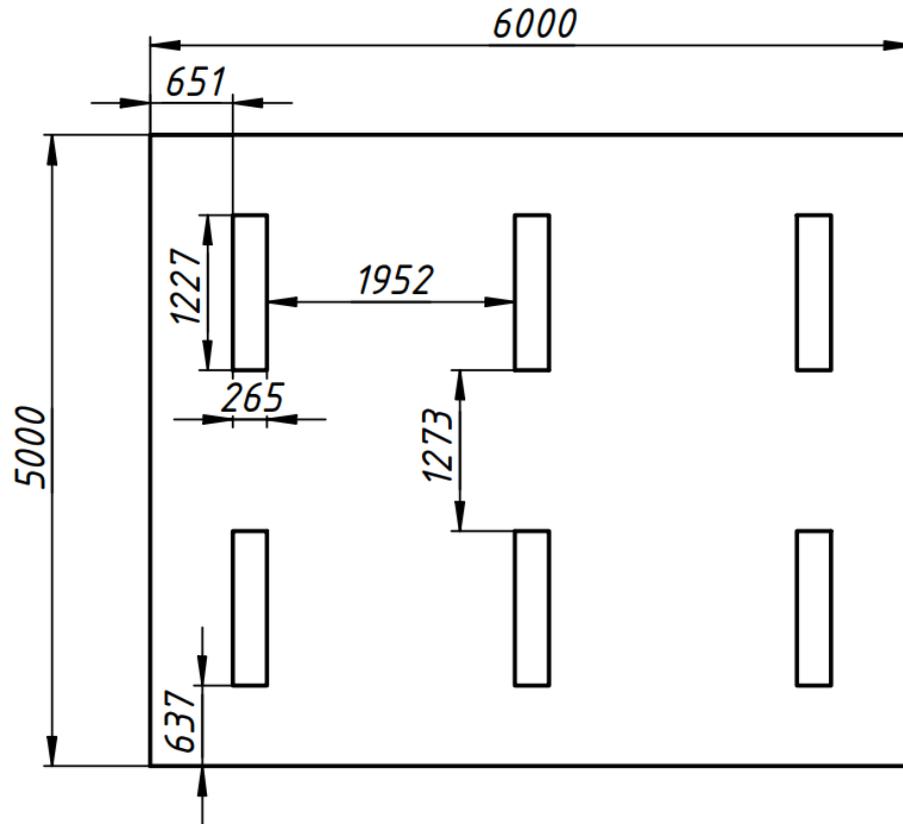


Рисунок 4.2 – План помещения и размещения светильников со светодиодными лентами

Потребный световой поток люминесцентной лампы определяется по формуле:

$$\Phi_l = \frac{(E \cdot S \cdot K_z \cdot Z)}{N \cdot \eta} = \frac{(300 \cdot 30 \cdot 1,5 \cdot 1,1)}{12 \cdot 0,47} = 2632,97 \text{ лм.}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{(\Phi_{л\delta} - \Phi_l)}{\Phi_{л\delta}} \cdot 100\% \leq 20\%; \quad (4.11)$$

$$\frac{(\Phi_{л\delta} - \Phi_l)}{\Phi_{л\delta}} \cdot 100\% = \frac{(2600 - 2632,97)}{2600} \cdot 100\% = -1,26\%.$$

Таким образом, мы получили, что необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Мощность осветительной установки получилась:

$$P = 12 \cdot 40 = 480 \text{ Вт.}$$

Расчётное количество светильников фактически установлено в помещении 408 ОИЯИ ЛЯР.

#### 4.2.6 Превышение уровня шума

Шум, являясь общебиологическим раздражителем, оказывает влияние не только на слуховой анализатор, но действует на структуры головного мозга, вызывая сдвиги в различных функциональных системах организма. Среди многочисленных проявлений неблагоприятного воздействия шума на организм человека выделяются: снижение разборчивости речи, неприятные ощущения, развитие утомления и снижение производительности труда, появление шумовой патологии. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. Уровень шума компрессора и ПЭВМ менее 50 дБ, что соответствует санитарным нормам [37].

В таблице 4.5 приведены нормы уровня шума при различных видах работ [37].

Таблица 4.5. Нормативы уровня шума при различных видах работ

	Максимально допустимый уровень шума (дБ), в полосах следующих октав (Гц)									Эквивалентные уровни шума, дБА
	86	71	61	54	49	45	42	40	38	
Научная работа, расчеты, конструирование										50
Офисы, лаборатории	93	79	70	68	58	55	52	52	49	60

#### **4.2.7 Психофизиологические факторы**

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Трудовая деятельность работников непромышленной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает функциональных на активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [38].

#### **4.2.8 Поражение электрическим током**

Рабочее помещение по опасности поражения электрическим током можно отнести ко 2 классу, т.е. это помещение без повышенной опасности из-за возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т.п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой [39].

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

1) при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;

2) при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);

3) при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

4) при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развертки.

Степень опасного воздействия электрического тока на организм человека зависит от:

1) рода и величины напряжения и тока;

2) частоты электрического тока;

3) пути прохождения тока через тело человека;

4) продолжительности воздействия на организм человека;

5) условий внешней среды.

Электрический ток оказывает на человека термическое, электролитическое, механическое и биологическое воздействие.

Термическое воздействие тока проявляется в ожогах, нагреве кровеносных сосудов и других органов, в результате чего в них возникают функциональные расстройства.

Электролитическое действие тока характеризуется разложением крови и других органических жидкостей, что вызывает нарушения их физико-химического состава.

Механическое действие тока проявляется в повреждениях (разрыве, расслоении и др.) различных тканей организма в результате электродинамического эффекта.

Биологическое действие тока на живую ткань выражается в опасном возбуждении клеток и тканей организма, сопровождающемся произвольными судорожными сокращениями мышц. В результате такого

возбуждения может возникнуть нарушение и даже полное прекращение деятельности органов дыхания и кровообращения.

Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

1) обеспечение недоступности токоведущих частей путем использования изоляции в корпусах оборудования;

2) применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;

3) использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения [42];

4) использование устройств бесперебойного питания.

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год [39].

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

### 4.3 Экологическая безопасность

В работе проводится изучение газовых потоков в камере сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND методом математического моделирования. При этом используется ПЭВМ.

Влияние эксплуатации оборудования на окружающую среду минимально. Наибольший вред от них в работе – потребление электроэнергии. ПЭВМ не производит выбросов вредных веществ, не создает излучения, способного нарушить экологическую безопасность природы. Однако его производство и утилизация составляют серьезную проблему. Так, при производстве ПЭВМ и других устройств используются тяжелые, щелочноземельные металлы, ртуть, пластик и стекло, что без должной утилизации по окончании службы попадает в природу и остается в не переработанном виде от века до полутора тысяч лет [43].

Мероприятия, позволяющие сохранять экологическую безопасность находясь на рабочем месте:

- 1) Правильная утилизация ПЭВМ и других систем, а также их комплектующих;
- 2) Использование энергосберегающих ламп;
- 3) Использование аккумуляторов вместо солевых батареек.

Снижение уровня загрязнения окружающей среды возможно за счет более эффективного и экономного использования электроэнергии самими потребителями. Это использование более экономичного оборудования, а также эффективного режима загрузки этого оборудования. Сюда также включается и соблюдение производственной дисциплины в рамках правильного использования электроэнергии [43].

Из этого можно сделать простой вывод, что необходимо стремиться к снижению энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять системы с малым энергопотреблением, ответственно относиться к утилизации

различных устройств, т.к. они могут разлагаться в окружающей среде от десятков до сотен лет.

#### **4.4 Пожарная и взрывная безопасность**

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [44]. Так как помещение лаборатории по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины возгорания [44]:

- 1) работа с открытой электроаппаратурой;
- 2) короткие замыкания в блоке питания;
- 3) несоблюдение правил пожарной безопасности;
- 4) наличие горючих компонентов.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные [44].

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации [44].

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования [44].

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для

предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [41]:

1) исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

2) правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

3) правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);

4) обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

5) издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

6) соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;

7) правильное размещение оборудования;

8) своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении пожара сообщить руководителю, органам противопожарной безопасности предприятия и приступить к тушению пожара огнетушителем.

При возникновении аварийной ситуации необходимо [44]:

1) сообщить руководству (дежурному);

2) позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС по телефону – 112;

3) принять меры по ликвидации последствий аварии в соответствии с инструкцией.

## 4.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка, сложившаяся на определенной территории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. В таблице 4.6 рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы по их предотвращению и ликвидация их последствий.

Таблица 4.6. Чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий

№	Чрезвычайная ситуация	Методы предотвращения ЧС	Ликвидация последствий ЧС
1	Пожар	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Соблюдение технологических режимов производства; Создание условий для эвакуации персонала	Вызов пожарной службы и спасателей (тел. 112); Вызов скорой медицинской помощи
2	Удар током	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Содержание энергетических сетей в исправном состоянии	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи
3	Травмирование в результате падения с высоты	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа;	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112);

№	Чрезвычайная ситуация	Методы предотвращения ЧС	Ликвидация последствий ЧС
		Создание систем предупреждения падений; Соблюдать требования безопасности при выполнении работ на высоте	Оказание первой помощи

### **Выводы по разделу**

В данной главе проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований:

- 1) микроклимат [34];
- 2) шум и вибрация [37];
- 3) электромагнитное излучение [35];
- 4) освещенность [36];
- 5) психофизиологические факторы [38];
- 6) электробезопасность [39];
- 7) пожаро-взрывобезопасность [44].

Помещение №408 ЛЯР ОИЯИ отнесено:

- 1) по электробезопасности – к 2 классу [39];
- 2) по пожаро-взрывобезопасности – к категории В [44].

Также рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий.

## **Выводы**

1. На основе анализа литературных данных были выбраны методы проведения трехмерных расчетов полей скорости, давлений и времени транспорта частиц.

2. С помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics построена трехмерная компьютерная модель камеры сбора ядер отдачи экспериментальной установки Криодетектор для ядерных исследований на ускорительном комплексе ДЦ-280.

3. Проведен расчет полей скорости и давлений при различных диаметрах тормозящей части камеры, анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что соотношение между давлением и скоростью соответствует числу Рейнольдса, а течение остается ламинарным до тех пор, пока число Рейнольдса ниже 2000, при более высоких числах Рейнольдса возмущения имеют тенденцию к росту и вызывают переход в турбулентность при снижении эффективности сбора ядер отдачи.

4. На основе рассчитанных полей скорости и давлений выполнен расчет времени транспорта частиц, который показывает, что при уменьшении диаметра камеры с 60 до 30 мм эффективность транспорта частиц растет, однако уменьшается количество частиц, пролетевших к транспортному капилляру в 2.5 раза.

5. Сравнительный анализ полученных результатов расчетов показывает, что диаметр в 60 мм является наиболее оптимальным для геометрии камеры сбора ядер отдачи газонаполненного сепаратора GRAND.

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований, полученные при подготовке магистерской диссертации, могут быть использованы в рамках реализуемого проекта "Сверхтяжелые ядра и атомы: пределы масс ядер и границы Периодической таблицы Д.И. Менделеева" радиохимического сектора ЛЯР ОИЯИ г. Дубны.

По результатам проведенных исследований подготовлен доклад на научную конференцию по радиохимии (г. Санкт-Петербург), которая пройдет в сентябре 2022г., а также полученные материалы вошли в статью для журнала «Journal of radioanalytical and nuclear chemistry».

Автор выражает благодарность начальнику радиохимического сектора ЛЯР ОИЯИ, к.х.н. Аксенову Николаю Викторовичу за помощь при проведении теоретических и экспериментальных исследований.

## Список используемой литературы

1. Yu.Ts. Oganessian, *J. Phys. G* 34 (2007) R165..
2. G. Münzenberg et al., *Nucl. Instr. and Meth.* 161 (1979) 65.
3. A.V. Yeremin et al., *Nucl. Instr. Meth. A* 274 (1989) 528.
4. V. Ninov, K.E. Gregorich, in: B.M. Sherrill, D.J. Morrissey, C.N. Davids (Eds.), ENAM98, AIP, Woodbury, 1999, p. 704.
5. Yu. Ts. Oganessian et al., in: *Proceedings of Fourth International Conference on Dynamical Aspects of Nuclear Fission*, 19–23 October 1998, Častá-Papiernička, Slovak Republic, World Scientific, Singapore, 2000, p. 334.
6. K. Morita et al., *Eur. Phys. J. A* 21 (2004) 257.
7. A. Semchenkov et al., *Nucl. Instr. and Meth. B* 266 (2008) 4153.
8. J.P. Omtvedt et al., *Eur. Phys. J. D* 45 (2007) 91.
9. R. Sudowe et al., *Radiochim. Acta* 94 (2006) 123.
10. Yu.Ts.Oganessian. *Lect. Notes Phys.*, 33, 221 (1974).
11. Yu Ts Oganessian, S N Dmitriev, "Synthesis and study of properties of superheavy atoms. Factory of Superheavy Elements ", *RUSS CHEM REV*, 2016, 85 (9), 901–916.
12. Subotic K. et al. Evaporation residue collection efficiencies and position spectra of the Dubna gas-filled recoil separator // *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*. 2002. V. 481. P. 71-80.
13. N. Bohr, *Phys. Rev.* 58 (1940) 654.
14. Zvara, I.: *The Inorganic Radiochemistry of Heavy Elements — Methods for Studying Gaseous Compounds*. Springer, Dordrecht (2008).
15. Zvara, I., Chuburkov, Y.T., Zvarova, T.S., Tsaletka, R.: Experiments on the chemistry of element 104—Kurchatovium I. Development of a method for studying short-lived isotopes. *Sov. Radiochem.* 11, 153 (1969).
16. Eichler, B., Domanov, V.P.: Volatilization of radionuclides in air stream and their separation in temperature-gradient tube. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 28, 143–152 (1975).

17. Rudolph, J., Bächmann, K.: Use of radionuclides for determination of adsorption-isotherms of volatile chlorides. *J. Radioanal. Chem.* 43, 113–120 (1978).
18. Rudolph, J., Bächmann, K.: Gas-chromatography apparatus for the investigation and separation of radioactively labeled inorganic-compounds at high-temperatures. *Mikrochim. Acta* 1, 477–493 (1979).
19. Gäggeler, H.W., Jost, D.T., Baltensperger, U., Weber, A., Kovacs, A., Vermeulen, D., Türler, A.: OLGA II, an on-line gas chemistry apparatus for applications in heavy element research. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* 309, 201–208 (1991).
20. Rudolph, J., Bächmann, K.: Determination of adsorption enthalpies and entropies by online-gas chromatography with short-lived nuclides. *Radiochim. Acta* 27, 105–108 (1980).
21. Eichler, B.: Preparative thermo gas chromatographic separation of radionuclides in hydrogen and air carrier gas stream. *Radiochem. Radioanal. Lett.* 22, 147–155 (1975).
22. Düllmann, C.E., Bröchle, W., Dressler, R., Eberhardt, K., Eichler, B., Eichler, R., Gäggeler, H.W., Ginter, T.N., Glaus, F., Gregorich, K.E., Hoffman, D.C., Jäger, E., Jost, D.T., Kirbach, U.W., Lee, D.M., Nitsche, H., Patin, J.B., Pershina, V., Piguet, D., Qin, Z., Schädel, M., Schausten, B., Schimpf, E., Schött, H.J., Soverna, S., Sudowe, R., Thörle, P., Timokhin, S.N., Trautmann, N., Türler, A., Vahle, A., Wirth, G., Yakushev, A.B., Zielinski, P.M.: Chemical investigation of hassium (element 108). *Nature* 418, 859–862 (2002).
23. Dvorak, J., Bröchle, W., Chelnokov, M., Dressler, R., Düllmann, C.E., Dvorakova, Z., Eberhardt, K., Jäger, E., Krücken, R., Kuznetsov, A., Nagame, Y., Nebel, F., Nishio, K., Perego, R., Qin, Z., Schädel, M., Schausten, B., Schimpf, E., Schuber, R., Semchenkov, A., Thörle, P., Türler, A., Wegrzecki, M., Wierczinski, B., Yakushev, A., Yeregin, A.: Observation of the  $3n$  evaporation channel in the complete hot-fusion reaction  $^{26}\text{Mg} + ^{248}\text{Cm}$  leading to the new superheavy nuclide  $^{271}\text{Hs}$ . *Phys. Rev. Lett.* 100, 132503(4) (2008).

24. Düllmann, C.E.: Chemical investigation of hassium ( $Z = 108$ ). PhD thesis, Bern University (2002).
25. Eichler, R., Aksenov, N.V., Belozero, A.V., Bozhikov, G.A., Chepigin, V.I., Dmitriev, S.N., Dressler, R., Gäggler, H.W., Gorshkov, V.A., Haenssler, F., Itkis, M.G., Laube, A., Lebedev, V.Y., Malyshev, O.N., Oganessian, Y.T., Petrushkin, O.V., Piguet, D., Rasmussen, P., Shishkin, S.V., Shutov, A.V., Svirikhin, A.I., Tereshatov, E.E., Vostokin, G.K., Wegrzecki, M., Yeregin, A.: Chemical characterization of element 112. *Nature* 447, 72–75 (2007).
26. Eichler, R., Aksenov, N.V., Albin, Y.V., Belozero, A.V., Bozhikov, G.A., Chepigin, V.I., Dmitriev, S.N., Dressler, R., Gäggeler, H.W., Gorshkov, V.A., Henderson, R.A., Johnsen, A.M., Kenneally, J.M., Lebedev, V.Y., Malyshev, O.N., Moody, K.J., Oganessian, Y.T., Petrushkin, O.V., Piguet, D., Popeko, A.G., Rasmussen, P., Serov, A.A., Shaughnessy, D.A., Shishkin, S.V., Shutov, A.V., Stoyer, M.A., Stoyer, N.J., Svirikhin, A.I., Tereshatov, E.E., Vostokin, G.K., Wegrzecki, M., Wilk, P.A., Wittwer, D., Yeregin, A.V.: Indication for a volatile element 114. *Radiochim. Acta* 98, 133–139 (2010).
27. Ю. Ц. Оганесян, Ю. Э. Пенионжкевич, В. А. Григорьев. Физика тяжелых ионов и её приложения: Учебное пособие. ОИЯИ Дубна 2021, 366 с.
28. Савельев И.В. Курс общей физики. Том 1. Механика. Молекулярная физика. Учебник – Москва: Лань, 2022. – 436 с.
29. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.
30. Кнышова Е. Н. Экономика организации: учебник / Е. Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форум Инфра-М, 2012. – 334 с.: ил. – Профессиональное образование.
31. Шульмин В. А. Экономическое обоснование в дипломных проектах: учебное пособие для вузов / В. А. Шульмин, Т. С. Усынина. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 192 с.

32. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 №181 – ФЗ.
33. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы».
34. СанПиН 2.2.4.548-96. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
35. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
36. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий».
37. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Санитарные нормы «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки».
38. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
39. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
40. ГОСТ 12.1.044-2018 ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.
41. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
42. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
43. СанПиН 1.2.3685-21 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
44. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность.

## Приложение А

### Modeling of gas flows in the recoil transfer chamber of the gas-filled separator GRAND

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Гольцман Андрей Иванович		

Консультант лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Зеремская Юлия Александровна	к.филол.н.		

The experimental determination of physical and chemical properties of the heaviest known elements represents an interesting and challenging topic in the current research of nuclear chemistry and nuclear physics. The irradiation of actinide targets with intense beams of  $^{48}\text{Ca}$  is the most successful way to produce the heaviest elements in nuclear fusion reactions [1].

Chemistry experiments with superheavy elements formed in complete fusion reactions are usually performed with the gas-jet technique where all reaction products are collected in a gas-filled thermalization chamber adjacent to the target and transported as gaseous species or attached to aerosols. The disadvantage of this technique is that very high chemical separation factors are required to isolate and identify single atoms of very heavy elements from the bulk of other reaction products. [2].

The incorporation of a physical pre-separation device between the target and the collection chamber creates opportunities for performing much cleaner and partly novel chemical studies [3,4]. Magnetic and electrostatic separators [5-10] can be used for physical separation of the evaporation residues (EVRs) from recoil nucleus via kinematic selection from vast amounts of by-products of the nuclear reaction prior to entering a chemistry setup.

The coupling of a gas-filled recoil separator [11] to a chemical separation scheme has been performed for the first time at the Berkeley Gas-filled Separator (BGS) [7] at the Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Berkeley, USA. Recently, such couplings are under development at the Transactinide Separator and Chemistry Apparatus (TASCA) [10] at the Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI), Darmstadt, Germany, at the gas-filled recoil ion separator (GARIS) [9] at RIKEN, Wako, Japan, and at the gas-filled recoil separator (DGFRS) [8] at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (FLNR) in Dubna, Russia. All these gas-filled separators give a momentum separation of unwanted reaction products in a gas-filled magnet array (typically pressure 50-150 Pa  $\text{H}_2$  or He). A gas catcher that stops the EVRs is installed then in the ion optical focal plane of the separator.

Products stopped in the catcher can be subjected to further chemical separation procedures permitting a nearly background-free detection.

One drawback of this technique is the decrease of sensitivity induced by the limited transmission of the physical separator and the lower production rates due to limited target thicknesses applied in physical separators. Due to the pressure difference between the gas-filled separator and the gas catcher, a physical divider in the form of a window foil must be introduced. This foil has to withstand the applied pressure differences but has to be also thin enough to pass efficiently EVRs with low power consumption. Moreover, the foil and the gas conditions in the catcher need to be adjusted to thermalize the EVRs in a gas volume as small as possible to provide the further transportation as fast as possible.

This work is aimed at creating a mathematical model of the chamber for collecting recoil nucleus from gas-filled separator GRAND and identifying the geometric characteristics that ensure the most efficient removal of recoil nuclei to the detector.

### **The aim of the research**

The object of the research is a recoil transfer chamber of the gas-filled separator GRAND (Figure 1). This chamber consists of four capillaries with a diameter of 2 mm connected to a distribution ring where 24 holes with a diameter of 1 mm are previously made, and an outlet channel with a diameter of 2 mm, the height of the cylindrical and conical parts is 12 and 20 mm, respectively. Mylar foil is installed between the chamber and the gas-filled separator. The facility will study the volatility and adsorption of elements 112 and 114 on the surface of gold by gas thermochromatography.

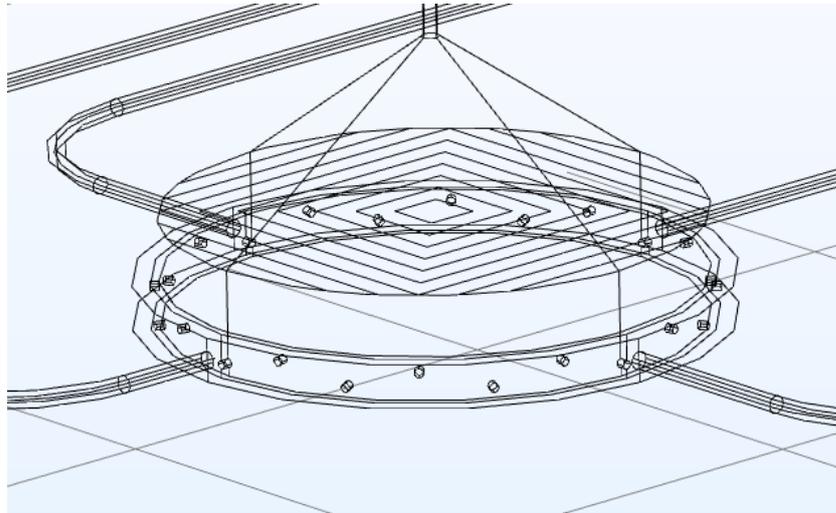


Figure 1 – Recoil transfer chamber

### **Interaction of charged particles with matter**

Charged particles lose their energy through electromagnetic interaction with atoms or molecules of the medium through three main channels:

- losses for ionization and excitation of atoms or molecules of a substance, combined into a common loss channel - ionization losses;
- bremsstrahlung loss;
- losses due to Cherenkov radiation.

All three types of losses are statistically independent, i.e., they occur independently of each other, and their contribution to the total losses is determined by the velocity of the particle, its mass, etc., as it is shown below. Losses due to Cherenkov radiation are not considered here, since they make a contribution at high energies of charged particles [13].

### **Ionization loss**

When a charged particle moves through a substance, regardless of its state of aggregation (gas, liquid, solid), the Coulomb interaction of the electric charge of the particle with the atoms or molecules of the substance leads to the ionization of these atoms or molecules, or their excitation. To describe these energy losses, the

total characteristic  $dE/dx$  is introduced - specific ionization losses, which are measured in MeV/cm or in MeV · cm<sup>2</sup>/g. The latter value is obtained by dividing ( $dE/dx$ ) in MeV/cm by the substance density  $\rho$  in g/cm<sup>3</sup> and is convenient because, for example, for gases it does not depend on the gas pressure.

Let us carry out a comparatively simple calculation of the specific ionization losses for a nonrelativistic particle with a mass exceeding that of an electron. Let us consider the interaction of the electric field of a particle with an individual electron of the medium. The medium is assumed to be non-interacting and disordered. The last remark is applicable to almost any medium, since the direction of the particle motion is random, and the interaction energy of atoms or molecules in any medium is small compared to the energy of the particle. A special case is only the focused motion of a particle along the crystalline axis of the crystal, which can be achieved in specially designed experiments. Therefore, under the formulated conditions, the force of interaction between the electric field of a particle and an individual electron of an atom of the medium is equal to:

$$F = ze^2/b^2 \quad (1)$$

where  $e$  is the electron charge;  $b$  is the impact parameter (the minimum distance a particle approaches an atom).

During the interaction time, which is equal in order of magnitude to  $dt = 2b/V$ , the electron of the medium will receive (and, accordingly, the particle will lose) momentum equal to  $dp = F \cdot dt = 2ze^2/bV$ , which corresponds to the energy acquired by the electron (and lost by the particle)  $dE = (dp)^2/2m$ , where  $m$  is the electron mass.

In this way,

$$dE = \frac{2z^2e^4}{b^2mV^2}. \quad (2)$$

An annular layer with radius  $b$ , width  $db$  and thickness  $dx$  contains electrons  $N_e = ZN \cdot 2\pi b \cdot db \cdot dx$ , then the total energy transfer to the annular layer will be:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{db} = \frac{4\pi z^2 e^4 ZN}{mV^2} \cdot \frac{db}{b}. \quad (3)$$

Whence the specific ionization energy loss of a charged particle per unit path  $dx$  will be equal to:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mV^2} NZ \cdot \ln\left(\frac{b_{max}}{b_{min}}\right). \quad (4)$$

where  $N$  is the density of atoms per unit volume;  $Z$  is the charge of one atom (molecule) of the medium.

What is the physical meaning of the limits  $b_{max}$  and  $b_{min}$ ? In the case of elastic interaction of a heavy particle with an electron, the maximum possible energy transfer from a heavy particle to an electron in the nonrelativistic case, from kinematic considerations, is  $E_{max} = 2mV^2$ , which corresponds to the minimum impact parameter  $b_{min}$ . The maximum impact parameter is usually put in correspondence with some average energy transfer from a particle to an atom, which is called the "average ionization potential". It is approximately equal to  $kZ$ , where  $k \sim 10$  eV.

Taking into account that  $(dE/dx) \sim (db/b)$ , we replace  $b_{max}/b_{min}$  with  $E_{max}/E_{min}$ . Thus, the final formula for the specific ionization loss for nonrelativistic particles is heavier than an electron:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} = \frac{4\pi z^2 e^4 ZN}{mV^2} \ln \frac{2mV^2}{\bar{I}} \quad (5)$$

where  $\bar{I}$  is the average ionization potential (empirical value taken from reference books). It should be emphasized that the average ionization potential  $\bar{I}$  is an empirical adjustable value that has nothing to do with the ionization potential of an atom  $I_{ion}$ , the value of which is a specific physical quantity equal to the energy required to remove the valence electron of an atom to infinity [15].

## Laminar flow interface

The Laminar Flow (spf) interface is used to calculate velocity and pressure fields for single-phase fluid flow in laminar flow. The flow remains laminar as long as the Reynolds number is below a certain critical value. At higher Reynolds numbers, the disturbances tend to increase and cause a transition to turbulence. This critical Reynolds number is model dependent, but a classic example is pipe flow, where the critical Reynolds number is known to be approximately 2000.

The physics interface supports incompressible flow, slightly compressible flow (density depends on temperature but not pressure), and compressible flow at low Mach numbers (typically less than 0.3). It also keeps non-Newtonian fluids flowing.

The equations solved by the Laminar Flow interface are the Navier-Stokes equations for conservation of momentum and the continuity equation for conservation of mass. In their most general form, they are:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F}; \quad (2)$$

where  $\rho$  is the density,  $\mathbf{u}$  is the velocity vector,  $p$  is the pressure,  $\mathbf{I}$  is the identity matrix,  $\mathbf{K}$  is the viscous stress tensor, and  $\mathbf{F}$  is the body force vector.

When the Laminar Flow interface is added, the Model Builder also adds the following default nodes: Fluid Properties, Wall, and Initial Values. Other nodes that implement, for example, boundary conditions and body forces can be added from the Physics toolbar.

## Particle tracing for fluid flow interface

The Particle Tracing for Fluid Flow (fpt) interface is used to simulate particle motion in the background gas. Particle motion can be driven by a combination of forces, including drag, gravity, electrical, magnetic, acoustophoretic, and user-

defined forces. You can also specify particle size or mass distributions, calculate particle temperatures, and model bidirectionally coupled particle-liquid interactions.

The motion of particles in a fluid obeys Newton's second law, which states that the net force acting on an object is equal to the time derivative of its momentum in an inertial frame of reference:

$$\frac{d}{dt}(m_p v) = F_D + F_g + F_{ext}; \quad (3)$$

$$v = \frac{dq}{dt};$$

where  $m_p$  is the mass of the particle,  $v$  is the speed of the particle,  $q$  is the position of the particle,  $F_D$ ,  $F_g$ ,  $F_{ext}$  are the forces of resistance, gravity and other forces, respectively.

When this physics interface is added, these nodes are also added to the model builder by default: Wall and Particle Properties. Then other nodes are added from the Physics toolbar that implement, for example, boundary conditions and body forces.

### Simulation Results

The results after several calculations of particle transportation inside the recoil collection chamber are presented in Table 1.

Table 1

D, MM	t, c	$N_{max}$	$N_0$	$\sum N_0$	$N(T_{1/2})$	$\sum N(T_{1/2})$	$\eta(N_{max}), \%$	$\eta(T_{1/2}), \%$
30	0,2	43	15	30	11,24	17,31	0,40	0,11
	0,4		5		2,81			
	0,6		5		2,10			
	0,8		2		0,63			
	1		0		0,00			
	1,2		3		0,53			
40	0,2	79	15	52	11,24	26,07	0,33	0,16
	0,4		12		6,73			
	0,6		10		4,20			

	0,8		6		1,89			
	1		7		1,65			
	1,2		2		0,35			
50	0,2	128	11	88	8,24	36,63	0,29	0,23
	0,4		15		8,42			
	0,6		21		8,83			
	0,8		23		7,24			
	1		12		2,83			
	1,2		6		1,06			
60	0,2	160	15	94	11,24	43,12	0,27	0,27
	0,4		25		14,03			
	0,6		23		9,67			
	0,8		14		4,41			
	1		13		3,07			
	1,2		4		0,71			

where  $D$  is the chamber diameter;  $t$  is the time interval;  $N_{\max}$  is the number of particles specified taking into account that 200 particles fall into the 60x60 frame;  $N_0$  is the number of particles flying to the transport capillary during the time interval  $t$ ;  $\sum N_0$  is the total number of particles flying to the transport capillary in a time of 1.2 s.;  $N(T_{1/2})$  is the number of particles flying to the transport capillary in a time interval  $t$ , taking into account the law of radioactive decay ( $T_{1/2}$  is taken as 0,48 s.);  $\sum N(T_{1/2})$  is the total number of particles flying to the transport capillary in a time of 1.2, taking into account the law of radioactive decay;  $\eta(N_{\max})$ ,  $\eta(N_{\max})$  is the collection efficiency of the chamber relative to the maximum number of particles that enters its entrance window, taking into account the half-life;  $\eta(D_{\max})$  is the collection efficiency of the chamber relative to the maximum number of particles that enter the entrance window with the diameter of 60 mm, taking into account the half-life.

It can be seen from Table 2.1 that with a decrease in the chamber diameter, the efficiency of particle transportation increases, but quantitatively, with a small diameter, we get fewer particles. It follows that the most optimal diameter is 60 mm.

## **Conclusion**

1. Based on the analysis of literature data, methods were chosen for performing three-dimensional calculations of the fields of velocity, pressure, and time of particle transport.

2. Using the COMSOL Multiphysics software, a three-dimensional computer model of the collection chamber for recoil nuclei of the GRANT gas-filled separator for separating nuclei of superheavy elements of the DC-280 accelerator complex was built.

3. The velocity and pressure fields were calculated for different diameters of the decelerating part of the chamber.

4. Based on the calculated velocity and pressure fields, the calculation of the particle transport time was performed, which shows that with a decrease in the chamber diameter from 60 to 30 mm, the particle transport efficiency increases, but the number of particles flying to the transport capillary decreases by 2.5 times.

5. A comparative analysis of the obtained calculation results shows that a diameter of 60 mm is the most optimal for the geometry of the chamber for collecting recoil nuclei of the GRANT gas-filled separator.

In conclusion, the author expresses his gratitude to the Head of the Radiochemical Sector of the FLNR JINR, Ph.D. Aksenov N.V. for help in carrying out theoretical and experimental studies.

## References

1. Yu.Ts. Oganessian, *J. Phys. G* 34 (2007) R165.
2. M. Schädel, *Angew. Chem. Int. Ed.* 44 (2005) 2
3. J.P. Omtvedt et al., *Eur. Phys. J. D* 45 (2007) 91.
4. R. Sudowe et al., *Radiochim. Acta* 94 (2006) 123.
5. G. Münzenberg et al., *Nucl. Instr. and Meth.* 161 (1979) 65.
6. A.V. Yeremin et al., *Nucl. Instr. Meth. A* 274 (1989) 528.
7. V. Ninov, K.E. Gregorich, in: B.M. Sherrill, D.J. Morrissey, C.N. Davids (Eds.), *ENAM98*, AIP, Woodbury, 1999, p. 704.
8. Yu.Ts. Oganessian et al., in: *Proceedings of Fourth International Conference on Dynamical Aspects of Nuclear Fission*, 19–23 October 1998, Častá-Papiernička, Slovak Republic, World Scientific, Singapore, 2000, p. 334.
9. K. Morita et al., *Eur. Phys. J. A* 21 (2004) 257.
10. A. Semchenkov et al., *Nucl. Instr. and Meth. B* 266 (2008) 4153.
11. M. Leino, *Nucl. Instr. and Meth. B* 204 (2003) 129.
12. Yu. Ts. Oganessian, Yu. E. Penionzhkevich, and V. A. Grigoriev. *Physics of heavy ions and its applications: Textbook*. JINR Dubna 2021, 366 p.