

Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»
 Отделение ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Влияние параметров Q-каскада для получения высокообогащенного селена-74 на его профиль и изменение концентрации изотопов

УДК 661.691:621.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Бережная Анастасия Руслановна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Орлов А.А.	д.т.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

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

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы, осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в физике кинетических явлений, наукоёмких промышленных технологиях (разделения изотопов, жидких и газовых смесей, получения высокочистых веществ)..
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов для экспресс-контроля технологических параметров, мониторинга технического состояния технологического оборудования, переработки, утилизации и обезвреживания промышленных отходов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств производства

	разделения изотопов, тонкой очистки, переработки веществ, программного обеспечения тренажерных комплексов для поддержания готовности технологического персонала предприятия к работе в нештатных и критических ситуациях, к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей плазменных установок, приборов анализа и систем управления разделительными каскадами.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции, анализу рынка изотопномодифицированной, мембранной продукции, стабильных изотопов и услуг.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований в области физики селективных процессов, разделения изотопных и молекулярных смесей.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в области разделения изотопных и молекулярных смесей, молекулярно-селективных технологий и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем получения моноизотопной и изотопно-модифицированной продукции, глубокой очистки трудно разделяемых веществ.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования плазменных, мембранных, ионообменных установок, а также приборов анализа и систем управления разделительными каскадами.

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 «Ядерная физика и технологии»

Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Бычков П.Н.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0A7Д	Бережная Анастасия Руслановна

Тема работы:

Создание программного обеспечения для проектирования и расчета ректификационных колонн	
Утверждена приказом проректора-директора (директора) (дата, номер)	22.01.2021 № 22-69/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	12.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Задание. Литературные источники по расчету параметров Q-каскада, физико-химическим свойствам селена, фторидов селена, по ядерным свойствам изотопов селена, их применению.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы. 2. Расчет параметров Q-каскада, получение необходимых зависимостей. 3. Анализ полученных зависимостей. 4. Экономический расчет. 5. Охрана труда и техника безопасности. 6. Выводы. Заключение.
Перечень графического материала	Рисунки: решетка кристалла гексагонального селена, капсула для облучения исходного изотопа,

	<p>внешний вид источника гамма-излучения на основе ^{75}Se, классификация модельных каскадов при симметричном разделении, система нелинейных уравнений для расчета количества ступеней в обогатительной и регенеративной частях каскада до и после замены переменных.</p> <p>Графики: профиль каскада, зависимости: изменения концентрации изотопов Se по ступеням каскада, потоков отбора легкой и тяжелой фракции каскада от коэффициента деления потока, разделительной способности каскада от коэффициента деления потока, изменения профиля каскада от удельного коэффициента обогащения.</p>
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Описание объекта исследований	Профессор ОЯТЦ, д.т.н. Орлов Алексей Алексеевич
Параметры Q-каскада для получения высокообогащенного ^{74}Se .	
Анализ полученных данных	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН, к.э.н. Клемашева Елена Игоревна
Социальная ответственность	Доцент ОЯТЦ, к.т.н. Тимченко Сергей Николаевич

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Орлов А.А.	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Бережная Анастасия Руслановна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Д	Бережная Анастасия Руслановна

Школа	ИШЯТ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 330510,4 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 209259,6 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Районный коэффициент для города Томска равен 1,3. Премимальный коэффициент равен 0,3.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды- 30,2%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Описание потенциальных потребителей SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение трудоемкости работ и разработка графика проведения научного исследования. Бюджет научно-технического исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Карта сегментирования
матрица SWOT-анализа
календарный план-график проведения научного исследования

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон.наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Бережная Анастасия Руслановна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Д	Бережная Анастасия Руслановна

Инженерная школа	ИШЯТ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавр	Направление	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<i>Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</i>	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды: микроклимат, шум, вибрация, освещение, электромагнитные поля и ионизирующее излучение от ПЭВМ; – опасных проявлений факторов производственной среды: электрического тока, пожарная и взрывная безопасность;
<i>Перечень законодательных и нормативных документов по теме</i>	требования охраны труда при работе на ПЭВМ; электробезопасность; пожаровзрывобезопасность;
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	действие фактора на организм человека; приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защиты).
<i>Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</i>	электробезопасность (причины, средства защиты); пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко Сергей Николаевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Бережная Анастасия Руслановна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 93 страницы, 14 рисунков, 19 таблиц, 45 источников, 70 формул.

Ключевые слова: гексафторид селена, Q-каскад, изотоп, профиль каскада, разделительная способность.

Объектом исследования является Q-каскад для получения высокообогащенного по ^{74}Se гексафторида селена.

Цель работы – расчет параметров Q-каскада для получения высокообогащенного ^{74}Se и исследование зависимостей: разделительной способности δU , потоков отбора легкой и тяжелой фракций каскада от коэффициента деления потока; изменения профиля каскада и концентрации целевого изотопа ^{74}Se по ступеням каскада от удельного коэффициента обогащения.

В ходе выполнения работы проведен расчет параметров Q-каскада для получения селена с обогащением выше 98% по ^{74}Se , в результате которого получен профиль Q-каскада и зависимость распределения концентрации изотопов селена по его ступеням. Рассчитаны зависимости: разделительной способности δU , потоков отбора легкой и тяжелой фракций каскада от коэффициента деления потока; изменения профиля каскада и концентрации целевого изотопа ^{74}Se по ступеням каскада от удельного коэффициента обогащения; изменения профиля каскада от потока основного питания.

В результате исследования установлено, что заданного обогащения (более 98% по ^{74}Se) можно достигнуть за один этап разделения. Изотопы селена распределяются по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Наибольшее изменение концентрации изотопов селена имеет место на концевых ступенях каскада, наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания.

Показано, что максимальная разделительная способность наблюдается при $\theta = 0,5$, поток отбора легкой фракции каскада линейно увеличивается с увеличением θ , а поток отбора тяжелой фракции каскада – линейно

уменьшается.

Установлено, что с увеличением удельного коэффициента обогащения, количество ступеней каскада, необходимое для достижения заданной концентрации, уменьшается, ступень подачи питания смещается к отвальному концу каскада, поток питания каскада также уменьшается.

Область применения: полученные в ходе расчетов параметры модельного каскада могут быть использованы в АО «ПО ЭХЗ» при отработке технологии получения высокообогащенного селена-74.

Содержание

Введение.....	13
1 Теоретическая часть.....	15
1.1 Свойства селена и его фторидов.....	15
1.2 Свойства изотопов селена и их применение	17
1.3 Восстановление элементарного селена из гексафторида селена	22
1.4 Мировое производство селена	24
1.4 Модельные каскады и их свойства.....	26
2 Методика расчета	29
3 Практическая часть	37
3.1 Расчет параметров Q -каскада.....	37
3.2 Исследование влияния коэффициента деления потока на разделительную способность каскада.....	43
3.3 Исследование влияния удельного коэффициента обогащения на профиль каскада и распределение концентрации изотопов селена по его ступеням....	46
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 49	
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	49
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений	50
4.1.2 SWOT-анализ.....	53
4.2 Планирование управления научно-техническим проектом.....	56
4.2.1 Контрольные события проекта	56
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР	57
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования	58
4.3 Бюджет научного исследования	62
4.3.1 Расчёт материальных затрат	62

4.3.2 Прочие прямые расходы.....	63
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	63
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	65
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	66
4.3.6 Накладные расходы.....	67
4.3.7 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	67
4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта.....	68
4.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	69
5 Социальная ответственность	70
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	71
5.1.1 Правовые нормы трудового законодательства	71
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	72
5.2 Производственная безопасность.....	75
5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов	75
5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов.....	76
5.2.3 Отклонение показателей микроклимата.....	76
5.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения.....	77
5.2.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны	78
5.2.6 Превышение уровня шума	79
5.2.7 Психофизиологические факторы	80
5.2.8 Электробезопасность	81

5.2.9 Пожарная безопасность	82
5.2.10 Экологическая безопасность.....	84
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	85
5.3.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования.....	85
5.3.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и порядок действий в случае возникновения ЧС.....	86
5.4 Выводы по разделу «Социальная ответственность»	87
Выводы	88
Список литературы	89

Введение

Изотопами называются атомы (или ядра атомов) одного химического элемента, различающиеся массовым числом (числом нейтронов N) и имеющие одинаковый заряд. Моноизотопным называют такой химический элемент, который имеет один стабильный изотоп. Если элемент имеет более двух стабильных изотопов, то он называется полиизотопным. Для использования в полной мере свойств целевого изотопа необходимо осуществить процесс разделения изотопной смеси, в результате которого получается целевая фракция – продукт с повышенной или пониженной концентрацией целевого изотопа относительно исходной (обычно природной). В настоящее время газоцентрифужный метод стал основным для концентрирования изотопов более 20 химических элементов, в том числе и селена.

Изотопная продукция находит всё большее применение не только в прикладных научных исследованиях, но и в таких областях как сельское хозяйство, биология, медицина, ядерная энергетика, экология, гидрогеология и т. д. Например, широко распространён метод «меченых» атомов, с помощью которого стало возможным: исследование процесса биосинтеза и обмена веществ в биологических молекулах, изучение усвояемости удобрений, солей и водных ресурсов и многое другое. Значительная часть всех произведенных радиоактивных и стабильных изотопов используется в медицине, в частности, для диагностики.

Одним из изотопов, который нашёл широкое применение в медицине и различных отраслях промышленности, является ^{74}Se . Он является стартовым материалом для производства радиоизотопа ^{75}Se , который в перспективе повысит безопасность переносных дефектоскопов. В медицине ^{75}Se применяют для диагностики метаболизма и онкологии. В связи с этим актуальной является разработка технологии получения высокообогащенного ^{74}Se .

Природный селен имеет шесть стабильных изотопов. В отличие от каскадов для разделения двухкомпонентных смесей, теория расчета каскадов для разделения многокомпонентных смесей менее проработана, и в ней нельзя использовать характерные величины, введенные для двухкомпонентных смесей. Для оценки затрат и возможности получения высокообогащенных целевых изотопов из многокомпонентной смеси как правило используются модельные (идеальные, не реализуемые на практике) каскады. В данной работе для этих целей нами использован Q -каскад.

1 Теоретическая часть

1.1 Свойства селена и его фторидов

Селен был открыт в 1817 г. шведским ученым Берцелиусом. Содержание селена в земной коре составляет $1 \cdot 10^{-5} \dots 8 \cdot 10^{-5} \%$.

В периодической таблице Менделеева селен находится в IV группе главной подгруппы, имеет порядковый номер 34 и атомную массу 78,96 а.е.м. Близкие места в таблице занимают кислород, сера и полоний (халькогены), поэтому их химические и физические свойства похожи. Селен принимает различные кристаллические формы, наиболее устойчивой из которых является форма бесконечных цепей атомов с расстоянием между ними 0,23 нм [1].

Молекула селена состоит из 8 атомов и имеет формулу Se_8 . При испарении имеет темно-красный цвет, а также проявляют меньшее сродство к кислороду, чем пары серы. В газообразном состоянии селен представляет собой молекулу Se_2 , которая диссоциирует до атомного состояния при температурах от $1500^\circ C$, энергия диссоциации составляет 264,6 кДж/моль. Равновесие между Se_8 , Se_6 , Se_4 и Se_2 наблюдается при $900^\circ C$ и ниже. Для молекул кислорода, серы, селена и теллура термическая диссоциация происходит слева направо, что связано с соответствующим изменением энергий диссоциации и ядерных расстояний в этом ряду.

Селен имеет электронную структуру в виде $4s^2 4p^4$ с расположением электронов по орбитам 6; 8; 18; 2. В твёрдом состоянии селен имеет несколько аллотропических форм. При комнатной температуре существуют все модификации селена как аморфные, так и кристаллические, хотя термодинамически устойчива при этой температуре только фаза гексагонального селена, решетка и структура которого представлена на рисунке 1.

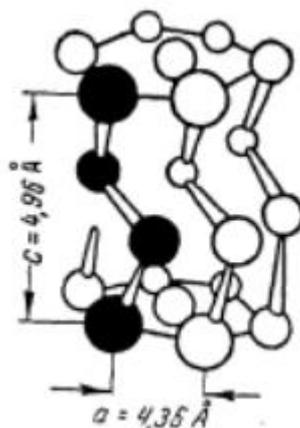


Рисунок 1 – Решетка кристалла гексагонального селена

При взаимодействии селена со фтором возможно образование двух соединений: SeF_6 (40,9 вес. % Se) и SeF_4 (50,9 вес. % Se).

SeF_6 – бесцветный газ, молекула которого представляет собой октаэдр с атомом селена в центре и расстоянием $\text{Se} - \text{F}$, равным 1,70 Å. Шестифтористый селен имеет высокую упругость пара в твердом состоянии; температура плавления SeF_6 минус 39,0°C, температура сублимации минус 46,6°C и определяется только под некоторым избыточным давлением. Кипит шестифтористый селен при минус 34,6°C под давлением 0,2 МПа; критическая температура равна 72°C. Плотность при минус 10°C и при минус 195°C соответственно равна 2,108 и 3,478 г/см³. Газообразный SeF_6 – термически стойкий газ, индифферентный к стеклу. Синтезирование SeF_6 происходит при непосредственном контакте селена со фтором. Данная реакция экзотермична и идет с выделением тепла. Энтальпия образования SeF_6 приблизительно равна 1029 кДж/моль, плавления 7,1 кДж/моль, кипения 18,3 кДж/моль. Синтезирование SeF_6 ведется в стеклянной посуде, не имеющей резиновых уплотнений и соединений. Отходящие газы конденсируются в ловушке при минус 183°C. Конденсат пропускается через 10%-ный раствор едкого калия и высушивается над P_2O_5 . Для получения чистого SeF_6 исходный продукт подвергается фракционированию. Хранится SeF_6 в стеклянных колбах или в газометрах под слоем воды.

SeF_4 представляет собой бесцветную дымящуюся жидкость. Он менее устойчив, по сравнению с SeF_6 . Температура плавления SeF_4 около минус $13,5^\circ\text{C}$, кипения плюс $107,7^\circ\text{C}$, критическая температура равна 70°C [2]. Существуют разные способы получения SeF_4 , например, фторированием селена фторидами галогенов (трифторидом хлора) [3-6], при взаимодействии SF_4 с оксидами селена (или селенидами металлов). Возможен также способ получения SeF_4 при обработке селенидов урана растворенным фтором. Однако, все эти способы не нашли широкого применения из-за значительного количества примесей в продукте, поэтому чаще применяют способ, заключающийся во фторировании селена элементарным фтором. Реакция проводится при пониженной температуре от плюс 5 до минус 10°C и атмосферном давлении. Скорость подачи газообразной смеси варьируется от 20 до 80 л/ч при объемном соотношении фтора и инертного газа 1:4...5. Соединение не реагирует со стеклом, парафиновым маслом, резиной, серой, но чернит ртуть. SeF_4 находит применение в медицине, в частности, для избирательного фторирования при синтезе медицинских препаратов [7].

Для разделения газодиффузионным методом используют SeF_6 , так как он менее агрессивен к конструкционным материалам, а также является более термически стойким газом.

1.2 Свойства изотопов селена и их применение

Селен в природе состоит из шести изотопов: ^{74}Se , ^{76}Se , ^{77}Se , ^{78}Se , ^{80}Se , ^{82}Se . Из них пять стабильны, а ^{82}Se испытывает двойной бета-распад с периодом полураспада $9,7 \cdot 10^{19}$ лет. По величине массы изотопы селена относятся к средним ($50 < A < 100$). Четно-четными, т.е. наиболее устойчивыми, являются ^{74}Se , ^{76}Se , ^{78}Se , ^{80}Se , ^{82}Se . Сечения захвата тепловых нейтронов для природных изотопов селена равны: $\sigma_{74} = 50 \pm 8$ барн, $\sigma_{76} = 85 \pm 7$ барн, $\sigma_{77} = 41 \pm 4$ барн, $\sigma_{78} = 0,41 \pm 0,04$ барн, $\sigma_{80} = 0,61 \pm 0,06$ барн, $\sigma_{82} = 2,1 \pm 1,5$ барн. Благодаря своим ядерным свойствам, изотопы селена способны

вступать в различные ядерные реакции, например, радиационный захват с испусканием гамма-излучения или двух дочерних нейтронов, вследствие чего и находят своё применение. Зачастую, из стабильных изотопов селена получают радиоактивные ядра, которые уже непосредственно используют в медицине или промышленности.

^{74}Se является стартовым материалом для получения радиоизотопа ^{75}Se , который используют в качестве гамма-излучателя в дефектоскопии (гамма-радиографии) материалов, для неразрушающего контроля сварных швов и целостности конструкций [8–9].

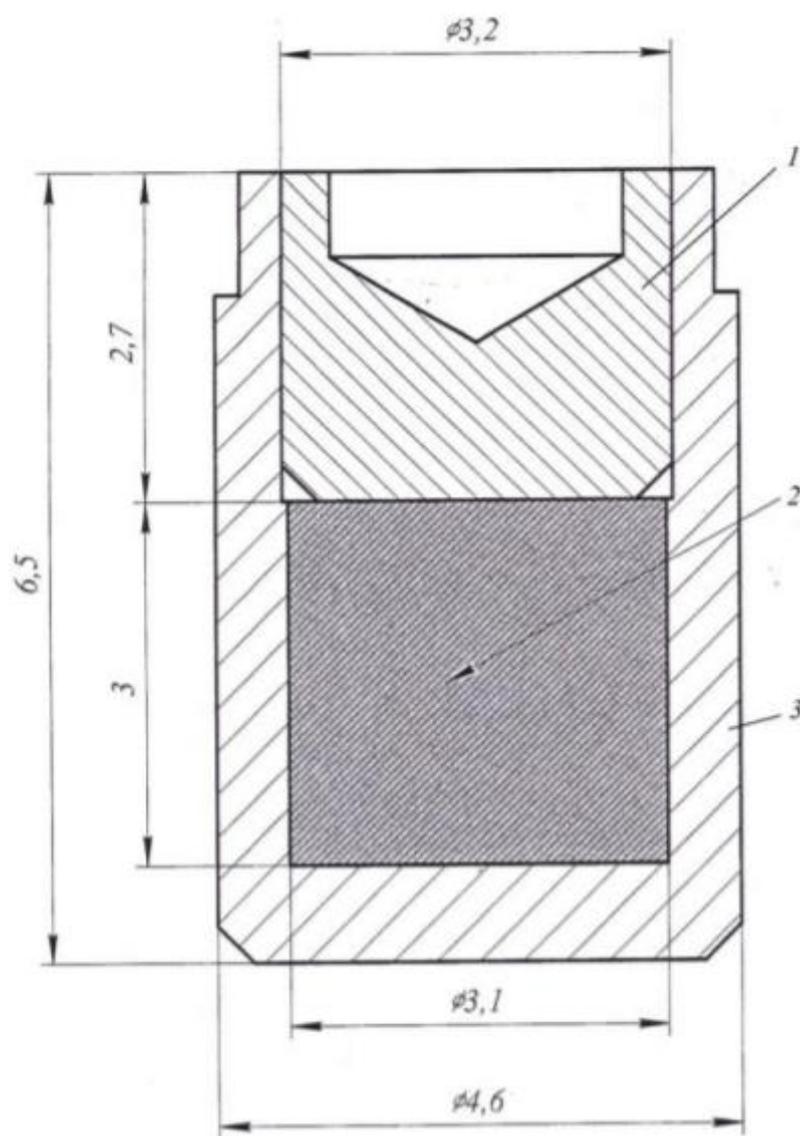


Рисунок 2 – Капсула для облучения исходного изотопа: 1 – крышка;
2 – металлический селен; 3 – корпус капсулы

В работе [10] говорится об источнике гамма-излучения на основе ^{75}Se , который в перспективе повысит безопасность переносных дефектоскопов. Сырьём является ^{74}Se , из которого формируют таблетку с высокой плотностью, после чего помещают в ампулу, а затем в реактор. При этом внутренний объём ампулы рассчитывается с учетом свободного объёма, который компенсирует избыточное давление без деформации. Также объём рассчитывается из требуемой удельной мощности экспозиционной дозы от $5 \cdot 10^8$ А/кг мм³ и выше объёма активной части. При облучении ампулы в реакторе обеспечивается такой режим, который позволяет достичь не менее 1000 Ки/г удельной активности ^{75}Se , после чего продукт помещают во вторую ампулу. Материал первой ампулы выбирается из металлов, которые после облучения в реакторе имеют меньшую энергию гамма-излучения, чем у ^{75}Se . Возможно использование металлов, образующих изотопы с периодом полураспада менее 1 ч.

^{75}Se образуется по реакции $^{74}\text{Se} (n, \gamma) ^{75}\text{Se}$ при облучении ^{74}Se в ядерном реакторе. Он является уникальным излучателем «мягкого» гамма-излучения ($E = 0,26; 0,28; 0,40$ МэВ). По сравнению с использованием источников на основе иридия-192 применение источников ионизирующего излучения на основе радионуклида ^{75}Se при гамма-дефектоскопии имеет определённые преимущества в диапазоне значений толщины контролируемого материала, например, стали, от 5 до 30 мм. Основные линии энергетического спектра гамма-излучения ^{75}Se находятся в диапазоне от 0,066 до 0,401 МэВ. Это позволяет за счёт уменьшения толщины радиационной защиты существенно снизить габариты гамма-дефектоскопов и изготавливать их переносными и удобными для использования в полевых условиях и труднодоступных местах.

Другое применение ^{75}Se – это использование его в качестве радиотрассера в исследованиях головного мозга или при сцинтиграфии, а также в брахотерапии.

Атомарный селен достаточно сильно подвержен химическим и физическим воздействиям [9]. При температуре свыше 400°C селен реагирует со многими металлами, обладающими низкой степенью активации, то есть потенциально пригодными для изготовления капсулы источника: алюминием, титаном, молибденом, ванадием. Поэтому требуется тщательно выбирать материал капсулы-мишени и поддерживать её температуру в ходе облучения ниже 400°C во избежание химического взаимодействия с селеном и коррозии её стенок.

В АО «ГНЦ НИИАР» функционирует производство закрытых источников промышленного назначения на основе ^{75}Se (рисунок 3) широкой номенклатуры [11].



Рисунок 3 – Внешний вид источника гамма-излучения на основе ^{75}Se

В качестве материала первой капсулы используют ванадиевый сплав. Вторую капсулу изготавливают из стали марки 12Х18Н10Т. Швы первой капсулы выполняют с помощью импульсивной лазерной сварки, второй – аргонодуговой сварки. Плотность полученной таблетки равна 4 г/см^3 , в ходе облучения селен плавится и кристаллизуется в гексагональную форму, плотность которой равна $4,8 \text{ г/см}^3$. Дальнейшее увеличение плотности таблетки нежелательно, так как это приводит к образованию пустот в капсуле, что приводит к понижению интенсивности излучения относительно активной части и, в конечном счете, ухудшению разрешающей способности дефектоскопа. Решением данной проблемы может стать замена селена

селенидом металла. Данный материал химически устойчив при рабочих температурах реактора, а также при облучении не образует побочных радионуклидов (т.е. отсутствует дополнительное гамма-излучение). Селенид металла имеет температуру плавления около температуры плавления металла, и такая замена оправдывается экологической безопасностью производства [12–15].

В системе ванадий–селен имеется несколько устойчивых фаз в области селенидов ванадия: VSe , VSe_2 , V_2Se_3 . Все эти фазы однородны в довольно широких пределах значений массовой доли селена – от 61 до 75 % [11]. Данные соединения можно получить синтезом из простых веществ. Такой способ является наиболее удобным и обеспечивающим минимальные потери дорогостоящего обогащённого ^{74}Se .

^{76}Se используется в различных ядерно-физических исследованиях, а также для получения радиоизотопов ^{75}Br и ^{76}Br , востребованных в медицине.

^{77}Se и ^{78}Se используются для получения радиоизотопа ^{77}Br . Они также применяются для изготовления стекол, поликристаллов и керамики, обогащенных магнитными ядрами. Для получения данных о строении и нерегулярностей в структуре материалы исследуют методами ядерного гамма-резонанса (ЯГР) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР).

Радионуклиды ^{75}Br , ^{76}Br , ^{77}Br , относящиеся к группе галогенов, не нашли такого широкого применения, как, например, 8F или ^{123}I , но они в ряде случаев используются как метка для некоторых радиофармпрепаратов (РФП) из-за более прочной связи брома с углеродом по сравнению с йодом. Вследствие этого их РФП обладают большей стабильностью и находят применение в изучении отдельных биологических параметров [16]. Наиболее благоприятным для этих целей считают ^{77}Br , т.к. его относительно большой период полураспада позволяет проводить достаточно длительные исследования. Другие изотопы имеют ограничения в применении: ^{75}Br ($T_{1/2} = 98$ мин, β^+ (75%)) при распаде образует ^{75}Se ($T_{1/2} = 120$ сут), примесь которая

нежелательна при *in-vivo*-исследованиях; ^{76}Br ($T_{1/2} = 16,1$ ч; β^+ (57%)) из-за высокой энергии позитронов (до 3,9 МэВ).

^{80}Se используют для получения медицинского радиоизотопа $^{80\text{m}}\text{Br}$.

^{82}Se используют в научных исследованиях безнейтринного двойного бета-распада.

Из вышесказанного следует, что ^{74}Se наиболее востребован, так как имеет несколько областей применения.

1.3 Восстановление элементарного селена из гексафторида селена

В литературе описаны химические свойства и поведение SeF_6 в реакциях с восстановителями-металлами Na, K, Si, Ca, аммиаком, раствором KJ и т. п. Реализация реакций взаимодействия газообразного SeF_6 и щелочных металлов связана с ведением процесса при высоких температурах, использованием неудобных в промышленном применении веществ, из-за взрывоопасности таких производств и трудоемкой очистки получаемого селена от примесей, вносимых восстановителем и продуктами коррозии оборудования.

Se получают также при помощи реакции между газообразными SeF_6 и NH_3 при температурах 200...300°C. Реакция происходит в реакторе. В указанном диапазоне температур селен конденсируется на его стенках и реагирует с конструкционными материалами, поэтому после завершения процесса поверхность реактора необходимо очищать. Это приводит к необходимости дополнительной очистки продукта и к его потерям. На сегодняшний день изучены различные восстановители для получения элементарного селена. Примерами являются Si, NH_3 , H_2 .

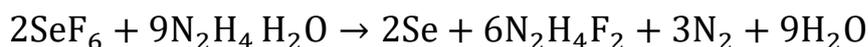
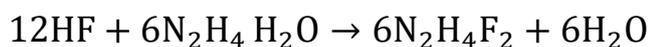
Способ восстановления SeF_6 с использованием водного раствора гидразин-гидрата [17] заключается в следующем:

Реакция SeF_6 с водным раствором гидразин-гидрата сопровождается повышением температуры реактора до 60...80°C с одновременным образованием осадка селена. Поскольку селен частично растворяется в

гидразин-гидрате, операция формирования осадка проводится в кристаллизаторе, в среде соляной кислоты с pH 1...3. При температуре 60...80°C в течение 3 часов в кристаллизаторе полностью заканчивается формирование осадка.

Следующие операции – это операции отмывки селена-от примесей и следов соляной кислоты и ее солей. Заканчивается технологический процесс вакуумной сушкой порошка от следов воды и затариванием селена в ампулы в атмосфере сухого аргона.

Наилучшие результаты восстановления получены при условиях, когда реакция идет в две стадии



Подробный пример осуществления процесса выглядит так [18]:

Кварцевую ампулу откачивают до давления 3,3 Па, после чего заполняют газом SeF₆ до 66,5 кПа, при этом процесс проводится при комнатной температуре. Определяют вес закаченного SeF₆ (в работе [18] он равен 2,82 г), и вводят 28,2 г 25%-ного раствора гидразин-гидрата. Вес SeF₆ необходим для расчета нужного количества раствора гидразин-гидрата, так как выполняется их массовое соотношение 1:10. Реакция является экзотермической, температура смеси изменяется от 60 до 90°C, после окончания которой температура снижается до комнатной через 1...1,5 ч. После реакция считается завершенной.

В ходе реакции образуется взвесь Se в растворе и часть его растворяется в гидразин-гидрате, исходный же SeF₆ в газе отсутствует. Полученную смесь соединяют с 40%-ной соляной кислотой и доводя раствор до 1рН, после чего, как в первой реакции, при температуре от 60 до 90°C 1...1,5 часа выдерживают в колбе-кристаллизаторе. После указанного времени появляется осадок, который извлекают из раствора трехэтапным промыванием: сначала горячей соляной 4...5%-ной кислотой, после –

горячей дистиллированной водой, затем – спиртом. После промывания осадок сушат под вакуумом при температуре менее 90°C и получают продукт необходимыми для дальнейших манипуляций свойствами.

Сухой охлажденный порошок селена взвешивают и анализируют. Вес селена составил 1,149 г или 99,6% от теоретического выхода. Полученный селен по чистоте соответствует марке СТО по ГОСТ 10298-79 "Селен. Технические условия".

В работе [19] представлен способ восстановления SeF_6 , который заключается в том, что смесь SeF_6 и H_2 помещают в тлеющий разряд переменного тока с частотой 50 Гц. Реакция происходит в сосуде из фторопласта-4 в форме трубы, на концах которой расположены металлические электроды, после чего полученный осадок промывают и сушат при температуре около 120°C.

Реакция восстановления происходит в ядерном реакторе, при этом отношение $\text{SeF}_6:\text{H}_2$ должно составлять 1:5. Газ SeF_6 подают со скоростью 3,5 г/ч. Процесс проходит под давлением $4,0 \cdot 10^2$ Па. После взвешивания и анализа продукта вес Se составляет 99,6% от теоретического выхода, а чистота соответствует марке СТО по ГОСТ 10298-79 "Селен. Технические условия".

1.4 Мировое производство селена

Япония является мировым лидером по производству селена. Четыре компании: «Mitsubishi Materials Corp.», «Nippon Mining and Metals Co.», Shinko Kagaku Kogyo Co.» и «Sumitomo Metal Mining Co.» обеспечивали в разные годы от 30 до 50 % его мирового производства.

Канада – второй по величине производитель селена. На фирмы «Noranda Inc» и «Falconbridge» приходится 16...20% мирового производства Se. Компания «Expatriate Resources Ltd.» в 2004 г. объявила о создании на базе разработанного ею месторождения в Wolverine (Юкон, Аляска) новой

фирмы «Yukon Zink Corp.», которая, помимо производства цинкового концентрата, планирует выпускать с 2006 г. по 343 т/год Se. Лидером на европейском рынке выступает компания «Umicore S. A.» (Бельгия, до 2001 г. – «Union Miniere»), производящая 100...115 т/год селена, что составляет 10...14 % от всего объема его выпуска в мире.

Фирма «Retorte GmbH» (Германия, дочернее предприятие медеплавильной компании «Norddeutsche Affinerie AG») также производит селен. Компания «Tradium GmbH» (Германия) с 2000 г. вступила в права преемника бельгийского предприятия «Savi Allows» и перерабатывает селен. В целом доля предприятий Германии в мировом производстве селена оценивается в 7 %. Английская фирма «Mining and Chemical Products Ltd.» также является крупным производителем селена.

В США производители меди (Rio Tinto и др.) направляют медеелектролитные шламы для переработки на азиатские предприятия, и только фирма «ASARCO» выпускает селен самостоятельно.

Крупнейшими производителями селена в СНГ являлись:

– ОАО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (Узбекистан);

– Карагайлинский ГОК (Казахстан);

– ОАО «Уральская горно-металлургическая компания»;

– ЗАО «Кыштымский медеелектролитный завод».

С 2004 г. наблюдается стремительный взлет цен с достижением в 2005 г. нового исторического максимума – 80...120 \$/кг. На конец 2013 года стоимость селена на мировом рынке составляла около 60 \$/кг.

Что касается непосредственно изотопной продукции, то в источнике [20] приведены следующие цены в €/мг: 700,25 (⁷⁴Se), 27,70 (⁷⁶Se), 31,32 (⁷⁷Se), 10,55 (⁷⁸Se), 4,53 (⁸⁰Se), 33,98 (⁸²Se). Из предложенных цен видно, что ⁷⁴Se является самым дорогостоящим.

1.4 Модельные каскады и их свойства

Схематично классификацию всех известных моделей каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных смесей можно представить в следующем виде (рисунок 4):

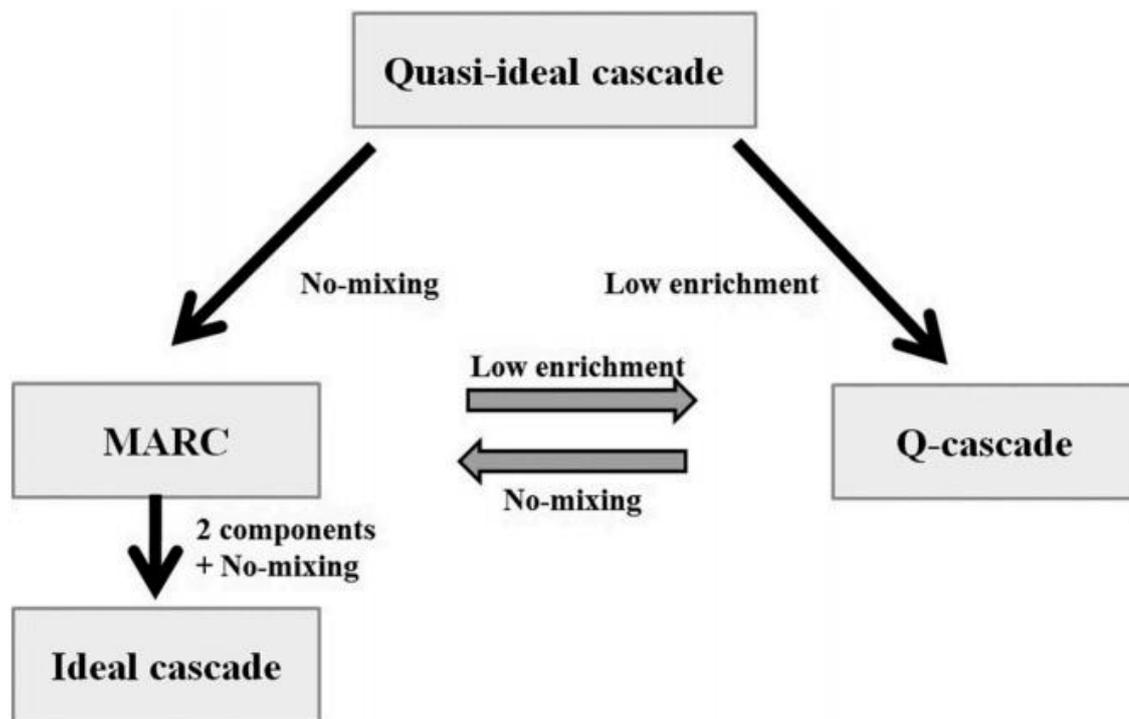


Рисунок 4 – Классификация модельных каскадов при симметричном разделении

«Квазиидеальный» каскад («Quasi-ideal» cascade) – это каскад, в котором относительные коэффициенты разделения q_{ik} , β_{ik} , α_{ik} и величины, введенные для описания данного каскада (срезы парциальных компонентов и параметры g_i , g_k) остаются неизменными по всей длине каскада [21].

$$g_i = q_{ik} = 1 + \varepsilon_{ik} \quad (1.1)$$

Квазиидеальные каскады делятся на каскады без смешения потоков с разными концентрациями на питании (no-mixing) и на каскады с малым обогащением (low enrichment). Первый случай представляет собой аналогию с «идеальным» каскадом в теории бинарных смесей [22]. Для разделения

многокомпонентных смесей он получил название MARC (Matched abundance ratio cascade). Условие отсутствия смешения относительных концентраций для выбранных компонентов с индексами i и k выглядит следующим образом:

$$R'_{ik}(l-1)=R_{ik}(l)=R''_{ik}(l+1) \quad (1.2)$$

Q -каскад фактически является частным случаем «квазиидеального» каскада или каскада с постоянными коэффициентами разделения ступеней при условии малого обогащения. В случае многокомпонентного разделения изотопов модельный Q -каскад широко используется с середины 1960-х годов. Он так назван поскольку для каждого компонента в многокомпонентной смеси изотопов, подлежащего разделению, вводится параметр Q в функции для замены концентрации другой функцией. [23–26].

Модельные каскады непрерывного профиля (КНП) широко используются при изучении разделения изотопов для быстрой оценки параметров разделительных каскадов и их оптимизации. Для быстрой оценки параметров разделительного каскада и его оптимизации целесообразно использовать Q -каскад, так как он позволяет аналитически определить количество ступеней в обогатительной и регенеративной частях каскада, распределение потоков и концентрации компонентов по ступеням [27].

Q -каскады позволяют проанализировать процесс концентрирования изотопов в определенной части изотопного спектра при соответствующем выборе величины Q_i . Это вытекает из следующих рассуждений. Предположим для определенности, что для i -го изотопа параметр $Q_i > 0$. Кроме того, естественно принять, что мы имеем дело с длинными каскадами, у которых S^P и S^W велики. При оценке эффекта разделения наблюдается различие в поведении компонентов, для которых Q_n больше или меньше нуля [28–29].

Для случая $Q_i > 0$ нетрудно получить оценочные соотношения:

$$\frac{c_{iP}}{c_{jP}} \approx \frac{c_{iF}}{c_{jF}}, \quad (1.3)$$

аналогично, если $Q_i < 0$

$$\frac{c_{iP}}{c_{jP}} \gg \frac{c_{iF}}{c_{jF}}. \quad (1.4)$$

Для регенеративной части каскада аналогичные оценки получаются при $Q_i < 0$. Учитывая, что выражение для коэффициента ε_{ik} можно представить в виде $\varepsilon_{ik} = \varepsilon_0 (M_k - M_i)$, постоянную Q_i для любого компонента $i = \overline{1, N_c}$, можно записать как

$$Q_i = \varepsilon_0 (M - M_i), \quad (1.5)$$

где M – параметр, задание которого позволяет определить одновременно постоянную Q для всех компонентов смеси, ε_0 – коэффициент обогащения, приходящийся на единичную разность массовых чисел, M_i – массовое число i -го компонента смеси. Тогда все концентрации компонентов с массовыми числами $M_i < M$ будут возрастать, концентрации компонентов с массовыми числами $M_i > M$ – убывать на отборном конце каскада. Следовательно, Q -каскады позволяют разделять все изотопы данного элемента на две группы, причем в первой группе концентрации всех компонентов одновременно растут, а во второй группе падают. Из полученных результатов непосредственно следует, что в одном Q -каскаде нельзя неограниченно увеличивать концентрацию промежуточного компонента в отборе, поскольку сумма концентрации обогащаемых изотопов не должна превышать единицу [30-33]. Процесс разделения природной смеси изотопов селена соответствует случаю малого обогащения на ступенях, поэтому в работе рассчитывается Q -каскад для обогащения выше 98% по ^{74}Se .

2 Методика расчета

Рассмотрим противоточный КНП для разделения многокомпонентной изотопной смеси с потоком питания F , потоком отбора P и потоком отвала W с соответствующими концентрациями ценного компонента C_i^F , C_i^P , C_i^W , где $i=\overline{1, N_c}$ и N_c – номер компонента смеси в порядке увеличения массовых чисел. Лёгкие компоненты обогащаются в потоке лёгкой фракции (концентрация лёгких компонент выше, чем в потоке питания), тяжёлые компоненты обогащаются в потоке тяжёлой фракции каскада. При этом относительное изменение концентрации максимально для крайнего лёгкого и/или тяжёлого компонента. В случае «слабого обогащения», когда относительный коэффициент разделения q_{ij} близок к единице стационарный массоперенос компонентов смеси по каскаду при отсутствии потерь рабочего вещества описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений (2.1) и (2.2) в обогатительной и регенеративной частях каскада [34]

$$\frac{dC_i}{dl} = -C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j + \frac{2P}{L(l)} (C_i^P - C_i),$$

$$0 \leq l \leq S^P; i=1, 2, \dots, N_c-1; \sum_{j=1}^{N_c} C_j = 1, \quad (2.1)$$

$$\frac{dC_i}{dl} = -C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j + \frac{2W}{L(l)} (C_i^W - C_i),$$

$$0 \leq l \leq S^W; i=1, 2, \dots, N_c-1; \sum_{j=1}^{N_c} C_j = 1, \quad (2.2)$$

где l – номер рассматриваемой ступени, C_i – концентрация i -го компонента на рассматриваемой ступени, $\varepsilon_{ij} = q_{ij} \ll 1$ – коэффициент относительного обогащения пары компонентов с номерами i и j , $L(l)$ – профиль каскада, а S^P и S^W – количество ступеней от отбора лёгкой и тяжёлой фракции до подачи питания соответственно.

Численный расчет модельного каскада с заданным значением отбора и его концентрацией целевого компонента состоит в определении следующих параметров: количества ступеней, потоки в каждой ступени, потоки питания и отвала [35–36]. Эти параметры каскада должны соответствовать выбранным критериям эффективности. При решении в качестве предварительной модели целесообразно использовать различные КНП, которые позволяют определять аналитически число ступеней в обогатительной и регенеративной частях каскада, распределение потока $L(l)$ и концентраций $C_i(l)$ по ступеням каскада при заданных значениях P , C_k^P и C_k^W , где k – номер целевого компонента. В замене концентрации $C_i(l)$ некоторой характеристической функцией $\varphi_i(l)$, система уравнений (2.1) сводится к следующему интегральному уравнению [37]:

$$G_i(l) = L(l)C(l) = \frac{\left(L(0)C_i^P(0) + 2PC_i^P \int_0^l \varphi_i(t) dt \right)}{\varphi_i(l)}, \quad (i = \overline{1, N_c}), \quad (2.3)$$

где $L(0)$ – поток рабочего вещества на отборном конце каскада при $l = 0$, $\varphi_i(l)$ – характеристические функции, которые можно вычислить как

$$\varphi_i(l) = \varphi_k(l) \exp(\varepsilon_{ik}l), \quad (i \neq k). \quad (2.4)$$

Практический интерес представляет выражение (2.3).

В случае Q -каскада характеристические функции (2.4) задают в виде

$$\varphi_i(l) = \exp(Q_i l), \quad (2.5)$$

где Q_i – некоторые постоянные, связанные условиями $Q_i - Q_k = \varepsilon_{ik}$. Если $L(0) = 0$ (условие минимизации суммарного потока), то подставив выражение (2.3) в соотношение (2.5), и одновременно учитывая выражения $L(l) = \sum_{j=1}^{N_c} G_j(l)$ и $C_i(l) = G_i(l) / \sum_{j=1}^{N_c} G_j(l)$, можно получить следующие соотношения для распределения концентраций и потока в обогатительной части каскада

$$G_j(l) = \frac{2P_i^P}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)], \quad (2.6)$$

$$L(l) = 2P \sum_{i=1}^m \frac{C_i^W}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)], \quad (2.7)$$

$$C_j(l) = \frac{\frac{C_i^P}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)]}{\sum_{i=1}^{N_c} \frac{C_i^P}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)]}. \quad (2.8)$$

Подобные выражения можно записать и для регенеративной части каскада.

$$G_j(l) = \frac{2W_{iW}}{Q_i} [\exp(Q_i l) - 1], \quad (2.9)$$

$$L(l) = 2W \sum_{i=1}^m \frac{C_i^W}{Q_i} [\exp(Q_i l) - 1], \quad (2.10)$$

$$C_j(l) = \frac{\frac{C_i^W}{Q_i} [\exp(Q_i l) - 1]}{\sum_{i=1}^m \frac{C_i^W}{Q_i} [\exp(Q_i l) - 1]}. \quad (2.11)$$

Используя уравнения материального баланса

$$F = P + W, \quad (2.12)$$

$$FC_i^F = PC_i^P + WC_i^W, \quad (i = \overline{1, N_c}), \quad (2.13)$$

получают соотношения, связывающие внутренние и внешние параметры Q -каскада [38]. Анализ этих отношений показывает, что Q -каскады концентрируют крайние или промежуточные компоненты смеси в отборе легкой или тяжелой фракции каскада. Иногда максимальная концентрация промежуточных компонентов наблюдается в средней части каскада [39–41].

Одна из возможностей получения аналитического решения уравнений (2.1) и (2.2) – их линеаризация. Для линеаризации этих уравнений достаточно преобразовать нелинейный член $C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j$ к следующему виду:

$$C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j = Q_i C_i, \quad (2.14)$$

где $Q_i = C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j$ ($i = \overline{1, N_c}$) константа, одинаковая для всех ступеней каскада; $C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j$ – увеличение концентрации i -го компонента на ступени, поэтому

$$\delta_i = C'_i - C''_i = C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j, \quad (2.15)$$

где C'_i , C''_i и C_i – концентрации i -го компонента в потоке отбора, отвала и питания соответственно. Таким образом, линеаризация системы уравнений (2.1) и (2.2) приводит к требованию постоянства значений $\delta_i / C_i = Q_i$ ($i = \overline{1, N_c}$) по ступеням каскада. Одновременно значения

$$\begin{aligned} \frac{\delta'_i}{C_i} &= \frac{C'_i - C_i}{C_i} = \frac{1}{2} \frac{\delta_i}{C_i} = \frac{1}{2} Q_i, \\ \frac{\delta''_i}{C_i} &= \frac{C_i - C''_i}{C_i} = \frac{1}{2} \frac{\delta_i}{C_i} = \frac{1}{2} Q_i \end{aligned} \quad (2.16)$$

остаются постоянными для всего каскада.

К тому же, из условий аддитивности и антисимметрии относительного обогащения для множителей выполняется следующее равенство

$$Q_i - Q_k = \varepsilon_{ik} \quad (i, k = \overline{1, N_c}). \quad (2.17)$$

Выясним какие ограничения на параметры разделения накладывает константа $Q_i = C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j = const$.

$$\varepsilon_{ijk} = \varepsilon_0 (M_j - M_i), \quad (2.18)$$

где ε_0 – масштабированный коэффициент обогащения, а M_i , M_j – масса i -го и j -го компонентов соответственно. Данное уравнение справедливо для молекулярно-кинетических процессов разделения (термодиффузия, массовая диффузия, газовая диффузия, центрифугирование и т.д.). С учетом соотношения (2.18) выражение для $Q_i = C_i \sum_{j=1}^{N_c} \varepsilon_{ij} C_j$ можно переписать как

$$Q_i = \varepsilon_0 \left(\sum_{j=1}^{N_c} M_j C_j - M_i \right) \quad (2.19)$$

Очевидно, что $\bar{M} = \sum_{j=1}^{N_c} M_j C_j$ – среднее массовое число. Следовательно, равенству $Q_i = \text{const}$ ($i, k = \overline{1, N_c}$) соответствует условие постоянного значения \bar{M} на всей длине каскада. Итак, выбор значения \bar{M} в диапазоне $M_1 \leq \bar{M} \leq M_{N_c}$ позволяет определить все значения Q_i и, как показано ниже, найти распределение потока $L(l)$, обеспечивающее реализацию условия $Q_i = \text{const}$ или $\bar{M} = \text{const}$ на всех этапах каскада.

Линеаризованная система дифференциальных уравнений (2.20) запишется как

$$\frac{dC_i}{dl} = -Q_i C_i + \frac{2P}{L(l)} (C_i^P - C_i). \quad (2.21)$$

Вычтем из уравнения (2.21) уравнения для остальных $N_c - 1$ компонентов

$$\frac{dC_i}{dl} - \frac{dC_k}{dl} = -Q_i + Q_k + \frac{2PC_i^P}{L(l)C_i} - \frac{2PC_k^P}{L(l)C_k}. \quad (2.22)$$

Замена $G_i(l) = L(l)C_i(l)$ приводит уравнение (2.22) к следующему виду:

$$\left(\frac{dG_i}{dl} + Q_i G_i - 2PC_i^P \right) - \left(\frac{dG_k}{dl} + Q_k G_k - 2PC_k^P \right) = 0. \quad (2.23)$$

Поскольку уравнение (2.23) справедливо для каждой пары компонентов i и k ($i, k = \overline{1, N_c}$), это значит, что выражение в первой скобке должно быть инвариантой для Q -каскада

$$\frac{dG_i}{dl} + Q_i G_i - 2PC_i^P = \text{invar}, \quad (i = \overline{1, N_c}). \quad (2.24)$$

Данную инварианту можно приравнять нулю, что дает новую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dG_i}{dl} + Q_i G_i - 2PC_i^P = 0, \quad (i = \overline{1, N_c}) \quad (2.25)$$

со следующим граничным условием:

$$G_i(0) = 2PC_i^P. \quad (2.26)$$

Решение уравнения (2.25) с граничным условием (2.26) имеет следующий вид:

$$G_i(l) = 2PC_i^P \exp(-Q_i l) + \frac{2PC_i^P}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)]. \quad (2.27)$$

Используя условие $Q_i \ll 1$, получаем

$$L(l) = 2P \sum_{j=1}^{N_c} \frac{C_j^P}{Q_j} [1 - \exp(-Q_j l)], \quad (2.28)$$

$$C_i(l) = \frac{G_i(l)}{\sum_{j=1}^{N_c} G_j(l)} = \frac{\frac{C_i^P}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)]}{\sum_{j=1}^{N_c} \frac{C_j^P}{Q_j} [1 - \exp(-Q_j l)]}. \quad (2.29)$$

Соотношения (2.27)–(2.29) являются решением линейризованной системы уравнений (2.1).

Таким образом, методика расчета Q-каскада сводится к следующему:

1. Определяем константы M и Q_i и средневзвешенное массовое число

$$M = \begin{cases} \frac{M_k + M_{k+1}}{2}, & C_k^P > C_k^F \\ \frac{M_k + M_{k-1}}{2}, & C_k^P < C_k^F \end{cases} \quad (2.30)$$

$$Q_i = \varepsilon_0 \cdot (M - M_i), \quad i = \overline{1, N_c} \quad (2.31)$$

$$\bar{M} = \sum_{j=1}^{N_c} M_j C_j. \quad (2.32)$$

2. Решаем систему уравнений, из которой определяем величины S^P и S^W :

$$C_k^P = \frac{\frac{1 - \exp(Q_k S^W)}{\exp(-Q_k S^P) - \exp(Q_k S^W)} C_k^F}{\sum_{l=1}^{N_c} \frac{1 - \exp(Q_l S^W)}{\exp(-Q_l S^P) - \exp(Q_l S^W)} C_l^F}, \quad (2.33)$$

$$C_k^W = \frac{\frac{\exp(-Q_k S^P) - 1}{\exp(-Q_k S^P) - \exp(Q_k S^W)} C_k^F}{\sum_{l=1}^{N_c} \frac{\exp(-Q_l S^P) - 1}{\exp(-Q_l S^P) - \exp(Q_l S^W)} C_l^F}. \quad (2.34)$$

3. Определяем концентрации нецелевых изотопов C_i^P и C_i^W :

$$C_i^P = \frac{\frac{1 - \exp(Q_i S^W)}{\exp(-Q_i S^P) - \exp(Q_i S^W)} C_i^F}{\sum_{l=1}^{Nc} \frac{1 - \exp(Q_l S^W)}{\exp(-Q_l S^P) - \exp(Q_l S^W)} C_l^F}, \quad (2.35)$$

$$C_i^W = \frac{\frac{\exp(-Q_i S^P) - 1}{\exp(-Q_i S^P) - \exp(Q_i S^W)} C_i^F}{\sum_{l=1}^{Nc} \frac{\exp(-Q_l S^P) - 1}{\exp(-Q_l S^P) - \exp(Q_l S^W)} C_l^F}. \quad (2.36)$$

4. С помощью заданных концентраций компонентов и уравнения материального баланса определяем потоки P и W :

$$P = F \cdot \left/ \frac{C_k^F - C_k^W}{C_k^P - C_k^W} \right/ , \quad (2.37)$$

$$W = F - P .$$

5. Вычисляем суммарный поток каскада:

$$L_Q = 2 \sum_{l=1}^{Nc} \left\{ \frac{PC_l^P [\exp(-Q_l S^P) - 1] + WC_l^W [\exp(-Q_l S^W) - 1]}{Q_l^2} + \frac{PC_l^P S^P - WC_l^W S^W}{-Q_l} \right\}. \quad (2.38)$$

6. Вычисляем производительность ступени подачи потока питания:

$$G^F = 2W \sum_{l=1}^{Nc} \frac{C_l^W}{Q_l} [\exp(Q_l S^W) - 1] \quad (2.39)$$

7. Определяем профиль каскада для регенеративной части

$$G(l) = 2W \sum_{l=1}^{Nc} \frac{C_l^W}{Q_l} [\exp(Q_l l) - 1], \quad 0 \leq l \leq S^W \quad (2.40)$$

8. Определяем профиль каскада обогатительной части

$$G(l) = 2P \sum_{l=1}^{Nc} \frac{C_l^P}{Q_l} [1 - \exp(-Q_l l)], \quad 0 \leq l \leq S^P . \quad (2.41)$$

9. Определяем концентрацию компонентов смеси регенеративной части каскада

$$C_i(l) = \frac{\frac{C_i^W}{Q_i} [\exp(Q_i l) - 1]}{\sum_{l=1}^{N_c} \frac{C_l^W}{Q_l} [\exp(Q_l l) - 1]} \quad 0 \leq l \leq S^W, \quad i = \overline{1, N_c} . \quad (2.42)$$

10. Определяем концентрацию компонентов смеси обогащительной части каскада

$$C_i(l) = \frac{\frac{C_i^P}{Q_i} [1 - \exp(-Q_i l)]}{\sum_{l=1}^{N_c} \frac{C_l^P}{Q_l} [1 - \exp(-Q_l l)]} \quad 0 \leq l \leq S^P, \quad i = \overline{1, N_c} \quad (2.43)$$

На этом расчет параметров Q -каскада заканчивается.

3 Практическая часть

3.1 Расчет параметров Q-каскада

Расчеты проведены с помощью Wolfram Mathematica 11.2, при этом использовались операторы Nsolve и FindRoot, а система уравнений (2.35) – (2.36) решалась методом секущих.

Исходные данные и природные концентрации изотопов селена приведены в таблицах 3.1 и 3.2, соответственно.

Таблица 3.1 – Исходные данные

Целевой изотоп	ε	θ	F , кг/с	Требуемая концентрация C_{74Se} , %
^{74}Se	0,2	0,5	5	>98

Таблица 3.2 – Природные концентрации изотопов Se

Изотоп	Исходная концентрация, %
^{74}Se	0,89
^{76}Se	9,37
^{77}Se	7,63
^{78}Se	23,77
^{80}Se	49,61
^{82}Se	8,73

По формуле (2.30) рассчитано средневзвешенное массовое число:

$$\overline{M}_{74} = \frac{74 \cdot 0,89}{100} = 0,6586,$$

$$\overline{M}_{76} = \frac{76 \cdot 9,37}{100} = 7,1212,$$

$$\overline{M}_{77} = \frac{77 \cdot 7,63}{100} = 5,8751,$$

$$\overline{M}_{78} = \frac{78 \cdot 23,77}{100} = 18,5406,$$

$$\overline{M}_{80} = \frac{80 \cdot 49,61}{100} = 39,688,$$

$$\overline{M}_{82} = \frac{82 \cdot 8,73}{100} = 7,1586,$$

$$\overline{M} = \sum_{j=1}^{Nc} M_j C_j = 79,0421.$$

По формулам (2.31) и (2.32) рассчитаны параметры M и Q :

$$M = \frac{M_k + M_{k+1}}{2} = \frac{74 + 76}{2} = 75,$$

$$Q_{74} = \varepsilon_0 \cdot (M - M_i) = 0,2 \cdot (75 - 74) = 0,2,$$

$$Q_{76} = 0,2 \cdot (75 - 76) = -0,2,$$

$$Q_{77} = 0,2 \cdot (75 - 77) = -0,4,$$

$$Q_{78} = 0,2 \cdot (75 - 78) = -0,6,$$

$$Q_{80} = 0,2 \cdot (75 - 80) = -1,$$

$$Q_{82} = 0,2 \cdot (75 - 82) = -1,4.$$

Далее решена система нелинейных уравнений (2.33) и (2.34) для определения количества ступеней в обогатительной и регенеративной частях каскада, при этом приняты следующие значения концентраций: $C^P = 0,001$, $C^W = 0,99$. Система уравнений приведена на рисунке 5.

$$-0.01 \rightarrow \frac{0.0089 (1 - x^1)}{\left(-x^1 + \frac{1}{y^1}\right) \left(\frac{0.0089 (1-x^1)}{-x^1 + \frac{1}{y^1}} + \frac{0.0927 (1-\frac{1}{x^1})}{-\frac{1}{x^1} + y^1} + \frac{0.0763 (1-\frac{1}{x^2})}{-\frac{1}{x^2} + y^2} + \frac{0.2377 (1-\frac{1}{x^3})}{-\frac{1}{x^3} + y^3} + \frac{0.4961 (1-\frac{1}{x^5})}{-\frac{1}{x^5} + y^5} + \frac{0.0873 (1-\frac{1}{x^7})}{-\frac{1}{x^7} + y^7}\right)}$$

функция для расчета количества ступеней тяжелой фракции

$$-0.99 \rightarrow \frac{0.0089 \left(-1 + \frac{1}{y^1}\right)}{\left(-x^1 + \frac{1}{y^1}\right) \left(\frac{0.0089 \left(-1 + \frac{1}{y^1}\right)}{-x^1 + \frac{1}{y^1}} + \frac{0.0927 (-1+y^1)}{-\frac{1}{x^1} + y^1} + \frac{0.0763 (-1+y^2)}{-\frac{1}{x^2} + y^2} + \frac{0.2377 (-1+y^3)}{-\frac{1}{x^3} + y^3} + \frac{0.4961 (-1+y^5)}{-\frac{1}{x^5} + y^5} + \frac{0.0873 (-1+y^7)}{-\frac{1}{x^7} + y^7}\right)}$$

Рисунок 5 – Система нелинейных уравнений для расчета количества ступеней в обогатительной и регенеративной частях каскада

Для упрощения решения системы уравнений (2.33) и (2.34) проведена замена переменных, тем самым показательные функции числа степеней приведены к полиномиальному виду:

$$S^W = \frac{\text{Log}[x]}{Q_i}, \quad (3.1)$$

$$S^P = \frac{\text{Log}[y]}{Q_i}. \quad (3.2)$$

Полученные корни должны быть вещественными и положительными, то есть удовлетворять следующим требованиям:

$$\text{Re}(x) > 0, \text{Re}(y) > 0, \text{Im}(x) = 0, \text{Im}(y) = 0. \quad (3.3)$$

Система уравнений (3.1) и (3.2), в которой произведена замена числа степеней, представлена на рисунке 6.

$$-0.99 + \frac{0.0089 (1 - x^{1.})}{\left(-x^{1.} + \frac{1}{y^{1.}}\right) \left(\frac{0.0089 (1 - x^{1.})}{-x^{1.} + \frac{1}{y^{1.}}} + \frac{0.0937 \left(1 - \frac{1}{x^{1.}}\right)}{-\frac{1}{x^{1.}} + y^{1.}} + \frac{0.0763 \left(1 - \frac{1}{x^{2.}}\right)}{-\frac{1}{x^{2.}} + y^{2.}} + \frac{0.2377 \left(1 - \frac{1}{x^{3.}}\right)}{-\frac{1}{x^{3.}} + y^{3.}} + \frac{0.4961 \left(1 - \frac{1}{x^{5.}}\right)}{-\frac{1}{x^{5.}} + y^{5.}} + \frac{0.0873 \left(1 - \frac{1}{x^{7.}}\right)}{-\frac{1}{x^{7.}} + y^{7.}} \right)}$$

$$-0.001 + \frac{0.0089 \left(-1 + \frac{1}{y^{1.}}\right)}{\left(-x^{1.} + \frac{1}{y^{1.}}\right) \left(\frac{0.0089 \left(-1 + \frac{1}{y^{1.}}\right)}{-x^{1.} + \frac{1}{y^{1.}}} + \frac{0.0937 \left(-1 + y^{1.}\right)}{-\frac{1}{x^{1.}} + y^{1.}} + \frac{0.0763 \left(-1 + y^{2.}\right)}{-\frac{1}{x^{2.}} + y^{2.}} + \frac{0.2377 \left(-1 + y^{3.}\right)}{-\frac{1}{x^{3.}} + y^{3.}} + \frac{0.4961 \left(-1 + y^{5.}\right)}{-\frac{1}{x^{5.}} + y^{5.}} + \frac{0.0873 \left(-1 + y^{7.}\right)}{-\frac{1}{x^{7.}} + y^{7.}} \right)}$$

Рисунок 6 – Система нелинейных уравнений для расчета количества ступеней каскада после замены переменных

Полученные в результате расчета корни представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Полиномиальные корни

х	у
8,96402	1043,19
9,11291 + 18,1734 i	-0,00340898 + 0,438618 i
9,11291 - 18,1734 i	-0,00340898 - 0,438618 i
11,4776 + 3,66762 i	-1,01244 + 1,48176 i
11,4776 - 3,66762 i	-1,01244 - 1,48176 i
6,32018 + 5,53652 i	0,560902 + 1,17121 i
6,32018 - 5,53652 i	0,560902 - 1,17121 i
-1,26839	0,778479
-1,06484 + 0,61192 i	0,791325 + 0,0482467 i

$-1,06484 - 0,61192 i$	$0,791325 - 0,0482467 i$
$-0,876173 + 0,658812 i$	$0,805877 + 0,0539125 i$
$-0,876173 - 0,658812 i$	$0,805877 - 0,0539125 i$
$-0,485465 + 1,04425 i$	$0,832773 + 0,091954 i$
$-0,485465 - 1,04425 i$	$0,832773 - 0,091954 i$
$-0,132642 + 1,13016 i$	$0,862305 + 0,107042 i$
$-0,132642 - 1,13016 i$	$0,862305 - 0,107042 i$
$0,372969 + 0,97336 i$	$0,915349 + 0,103616 i$
$0,372969 - 0,97336 i$	$0,915349 - 0,103616 i$
$0,712217 + 0,755333 i$	$0,957152 + 0,0875323 i$
$0,712217 - 0,755333 i$	$0,957152 - 0,0875323 i$

Корни системы уравнений, отвечающие критериям (3.3), находятся в первой строчке и выделены жирным шрифтом. Подставляем полученные значения в систему уравнений (3.1) и (3.2). Количество ступеней не округлялось, так как рассчитываемый каскад является модельным.

$$S^W = \frac{\text{Log}[8,96402]}{0,2} = 10,9660,$$

$$S^P = \frac{\text{Log}[1043,19]}{0,2} = 34,75018.$$

К значению S^W необходимо добавить 1, так как при расчете нумерация ступеней начиналась с 0:

$$S^W = 10,96609 + 1 = 11,96609,$$

$$S^P = 34,75018.$$

С помощью полученных значений рассчитаны концентрации изотопов в отборе легкой и тяжелой фракций каскада. Результаты представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Распределение концентраций изотопов Se в отборе легкой и тяжелой фракций каскада

	^{74}Se	^{76}Se	^{77}Se	^{78}Se	^{80}Se	^{82}Se
$C^P, \%$	98,9996	0,00998	$8,66822 \cdot 10^{-6}$	$2,61762 \cdot 10^{-8}$	$5,027111 \cdot 10^{-14}$	$8,12916 \cdot 10^{-21}$
$C^W, \%$	0,10001	0,094374	0,076914	0,239614	0,500095	0,088003

По формулам (2.40), (2.41) с использованием значений S^W и S^P определен профиль каскада, который изображен на рисунке 7.

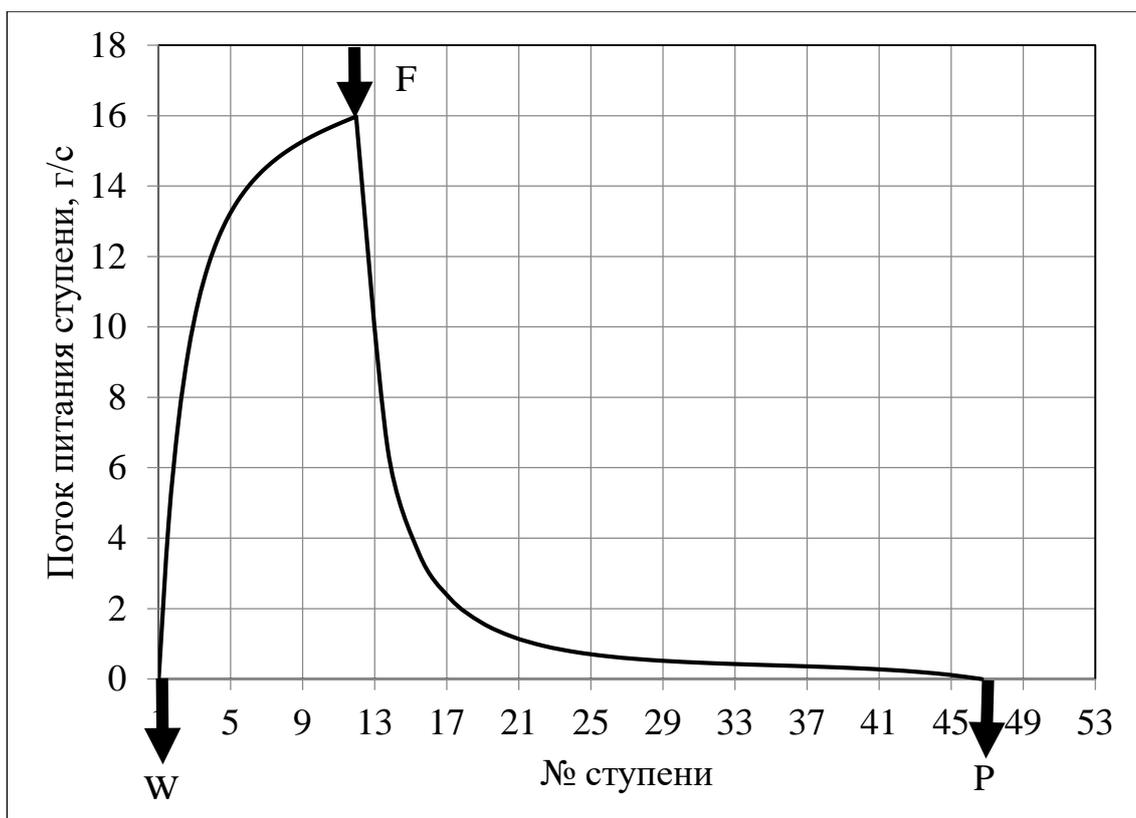


Рисунок 7 – Профиль каскада

Из рисунка 7 видно, что профиль каскада является непрерывным, каскад состоит из 46,7 ступеней, основной поток питания подается в 11,9 ступень.

Дополнительно для целевого изотопа рассчитана относительная погрешность значений C^P и C^W :

$$C_{74}^P = \frac{99 - 99,000000000002}{99} \cdot 100\% = 2 \cdot 10^{-12}\%,$$

$$C_{74}^W = \frac{0,1 - 0,10000000000002}{0,1} \cdot 100\% = 2 \cdot 10^{-11}\%.$$

По формуле (2.37) рассчитаны потоки отбора легкой и тяжелой фракций каскада:

$$P = 5 \cdot \left/ \frac{0,0089 - 0,1}{99 - 0,1} \right/ = 0,0399393 \text{ кг/с},$$

$$W=5-0,0399393=4,9600607 \text{ кг/с.}$$

По формуле (2.38) рассчитан суммарный поток всего каскада

$$L_Q=2 \sum_{l=1}^{N_c} \left\{ \frac{PC_l^P [\exp(-Q_l S^P) - 1] + WC_l^W [\exp(-Q_l S^W) - 1]}{Q_l^2} + \frac{PC_l^P S^P - WC_l^W S^W}{-Q_l} \right\} =$$

$$2 \cdot (0,5102 \cdot (3,2467 \cdot 10^{-22} (-1 + e^{1,4 \cdot 34,75018}) + 0,4365 (-1 + e^{-1,4 \cdot 11,96609})))$$

$$+ 1 \cdot (2,0077 \cdot 10^{-15} (-1 + e^{1 \cdot 34,75018}) + 2,4805 \cdot (-1 + e^{-1 \cdot 11,96609}))$$

$$+ 2,7777 \cdot (1,0454 \cdot 10^{-9} (-1 + e^{0,6 \cdot 34,75018}) + 1,1884 \cdot (-1 + e^{-0,6 \cdot 11,96609}))$$

$$+ 6,2499 \cdot (3,4620 \cdot 10^{-7} (-1 + e^{0,4 \cdot 34,75018}) + 0,3814 (-1 + e^{-0,4 \cdot 11,96609}))$$

$$+ 24,9999 \cdot (0,0003 \cdot (-1 + e^{0,2 \cdot 34,75018}) + 0,4681 \cdot (-1 + e^{-0,2 \cdot 11,96609}))$$

$$+ 24,9999 \cdot (0,0395 \cdot (-1 + e^{-0,2 \cdot 34,75018}) + 0,0049 \cdot (-1 + e^{0,2 \cdot 11,96609}))$$

$$- 1 \cdot (2,0077 \cdot 10^{-15} \cdot 34,75018 - 2,4804 \cdot 11,96609) - 1 \cdot (2,0077 \cdot 10^{-15}$$

$$\cdot 34,75018 - 2,4804 \cdot 11,96609) - 1,6666 \cdot (1,0454 \cdot 10^{-9} \cdot 34,75018$$

$$- 1,1884 \cdot 11,96609) - 5 \cdot (0,0003 \cdot 34,75018 - 0,4681 \cdot 11,96609)$$

$$- 0,7142 \cdot (3,2467 \cdot 10^{-22} \cdot 34,75018 - 0,4365 \cdot 11,96609) - 2,5 \cdot$$

$$(3,4620 \cdot 10^{-7} \cdot 34,75018 - 0,3814 \cdot 11,96609) + 5 \cdot (0,0395 \cdot 34,75018$$

$$- 0,0049 \cdot 11,96609) = 189,993 \text{ г/с.}$$

Для расчета производительности ступени подачи потока питания использовали формулу (2.39):

$$G^F = 9,9201 \cdot (-0,0628 \cdot (-1 + e^{-1,4 \cdot 10,96609}) - 0,5001 \cdot (-1 + e^{-1 \cdot 10,96609}))$$

$$- 0,3993 \cdot (-1 + e^{-0,6 \cdot 10,96609}) - 0,1922 \cdot (-1 + e^{-0,4 \cdot 10,96609})$$

$$- 0,4718 \cdot (-1 + e^{-0,2 \cdot 10,96609}) + 0,005 \cdot (-1 + e^{0,2 \cdot 10,96609}) = 15,9782.$$

Далее по формулам (2.35), (2.36) рассчитано распределение концентраций изотопов селена по ступеням каскада. Данная зависимость представлена на рисунке 8.

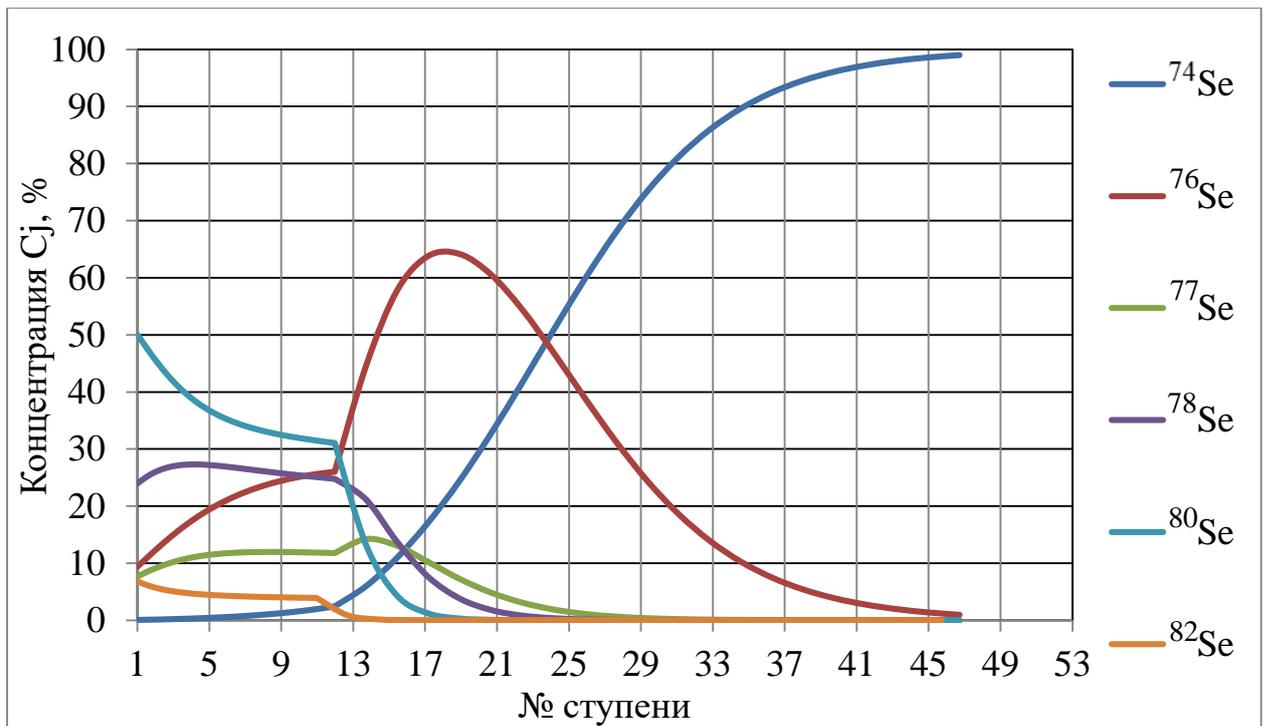


Рисунок 8 – Зависимость изменения концентрации изотопов Se по ступеням каскада

Из рисунка 8 видно, что все кривые имеют перегиб на ступени подачи питания, более тяжелые изотопы накапливаются в регенеративной части каскада, более легкие – в обогатительной. Интересующий нас изотоп достигает максимальной концентрации на последней ступени обогатительной части каскада, так как он является самым легким из природных изотопов селена. По этой же причине одного этапа обогащения оказалось достаточно для достижения необходимой концентрации >98% по ⁷⁴Se.

3.2 Исследование влияния коэффициента деления потока на разделительную способность каскада

Коэффициент деления потока – это отношение потока отбора к потоку питания ступени:

$$\theta = \frac{L'}{L}, \quad (3.4)$$

где θ лежит в диапазоне от 0 до 1.

Тогда, потоки отбора легкой и тяжелой рассчитываются по следующим формулам:

$$L' = L\theta, \quad (3.5)$$

$$L'' = (1-\theta)L. \quad (3.6)$$

Воспользовавшись формулами (3.4) – (3.6), рассчитано изменение разделительной способности δU , потоков отбора легкой и тяжелой фракций каскада при изменении коэффициента деления потока от 0 до 1 с шагом 0,1, поток питания был равен 5 кг/с.

$$\begin{aligned} \theta_1=0 &\rightarrow L'=0\cdot5=0, & L''=(1-0)\cdot5=5, \\ \theta_2=0,1 &\rightarrow L'=0,1\cdot5=0,5, & L''=(1-0,1)\cdot5=4,5, \\ \theta_3=0,2 &\rightarrow L'=0,2\cdot5=1, & L''=(1-0,2)\cdot5=4, \\ \theta_4=0,3 &\rightarrow L'=0,3\cdot5=1,5, & L''=(1-0,3)\cdot5=3,5, \\ \theta_5=0,4 &\rightarrow L'=0,4\cdot5=2, & L''=(1-0,4)\cdot5=3, \\ \theta_6=0,5 &\rightarrow L'=0,5\cdot5=2,5, & L''=(1-0,5)\cdot5=2,5, \\ \theta_7=0,6 &\rightarrow L'=0,6\cdot5=3, & L''=(1-0,6)\cdot5=2, \\ \theta_8=0,7 &\rightarrow L'=0,7\cdot5=3,5, & L''=(1-0,7)\cdot5=1,5, \\ \theta_9=0,8 &\rightarrow L'=0,8\cdot5=4, & L''=(1-0,8)\cdot5=1, \\ \theta_{10}=0,9 &\rightarrow L'=0,9\cdot5=4,5, & L''=(1-0,9)\cdot5=0,5, \\ \theta_{11}=1 &\rightarrow L'=1\cdot5=5, & L''=(1-1)\cdot5=0. \end{aligned}$$

Разделительная способность рассчитывается по формуле:

$$\delta U = \frac{1}{2} L \theta (1-\theta) \varepsilon_0^2 \quad (3.7)$$

Для каждого коэффициента деления потока приведен расчет соответствующей разделительной способности:

$$\begin{aligned} \delta U_1 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_1 (1-\theta_1) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0 \cdot (1-0) \cdot 0,2^2 = 0, \\ \delta U_2 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_2 (1-\theta_2) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,1 \cdot (1-0,1) \cdot 0,2^2 = 0,009, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta U_3 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_3 (1 - \theta_3) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,2 \cdot (1 - 0,2) \cdot 0,2^2 = 0,016, \\ \delta U_4 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_4 (1 - \theta_4) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,3 \cdot (1 - 0,3) \cdot 0,2^2 = 0,021, \\ \delta U_5 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_5 (1 - \theta_5) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,4) \cdot 0,2^2 = 0,024, \\ \delta U_6 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_6 (1 - \theta_6) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5) \cdot 0,2^2 = 0,025, \\ \delta U_7 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_7 (1 - \theta_7) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,6 \cdot (1 - 0,6) \cdot 0,2^2 = 0,024, \\ \delta U_8 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_8 (1 - \theta_8) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,7 \cdot (1 - 0,7) \cdot 0,2^2 = 0,021, \\ \delta U_9 &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_9 (1 - \theta_9) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,8) \cdot 0,2^2 = 0,016, \\ \delta U_{10} &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_{10} (1 - \theta_{10}) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 0,9 \cdot (1 - 0,9) \cdot 0,2^2 = 0,009, \\ \delta U_{11} &= \frac{1}{2} \cdot L \cdot \theta_{11} (1 - \theta_{11}) \varepsilon_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 1 \cdot (1 - 1) \cdot 0,2^2 = 0. \end{aligned}$$

Результаты расчета представлены на рисунках 9 и 10.

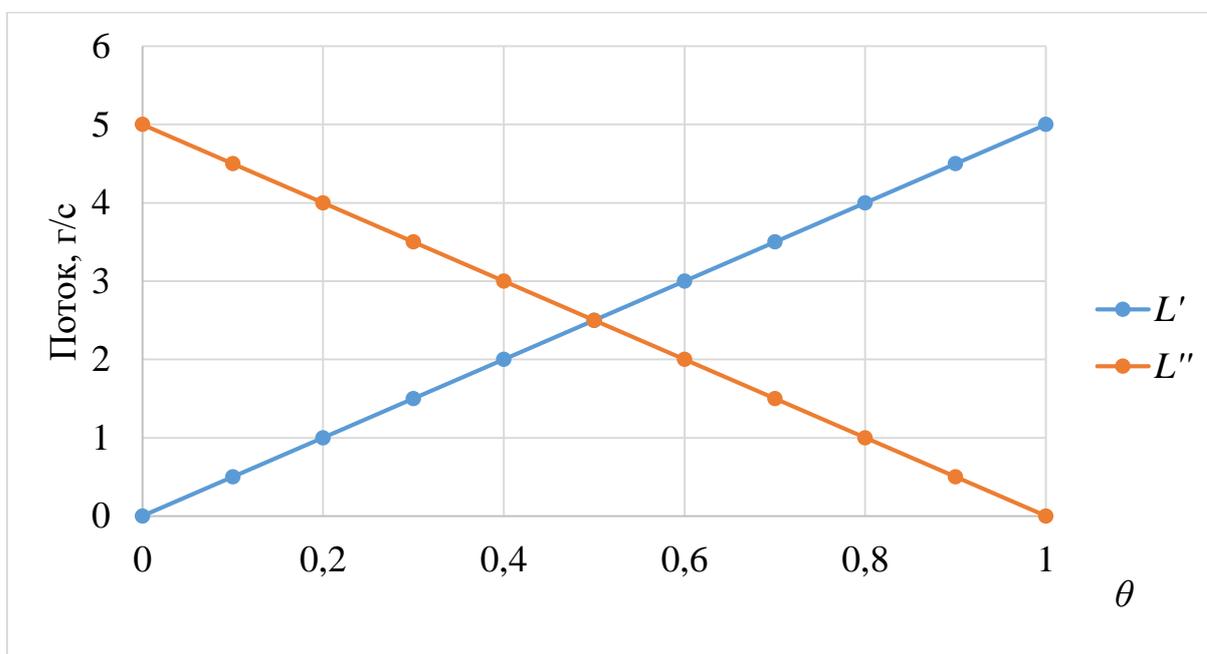


Рисунок 9 – Зависимость потоков отбора легкой и тяжелой фракции каскада от коэффициента деления потока

Из рисунка 9 видно, что при увеличении θ поток легкой фракции линейно увеличивается, а поток тяжелой фракции линейно уменьшается. При $\theta = 0,5$ потоки легкой и тяжелой фракции одинаковы и равны 2,5 г/с. При $\theta = 0$ $L' = 0$ г/с, $L'' = 5$ г/с, то есть поток легкой фракции отсутствует, вся смесь находится в потоке тяжелой фракции. При $\theta = 1$ наоборот, $L' = 5$ г/с, $L'' = 0$ г/с.

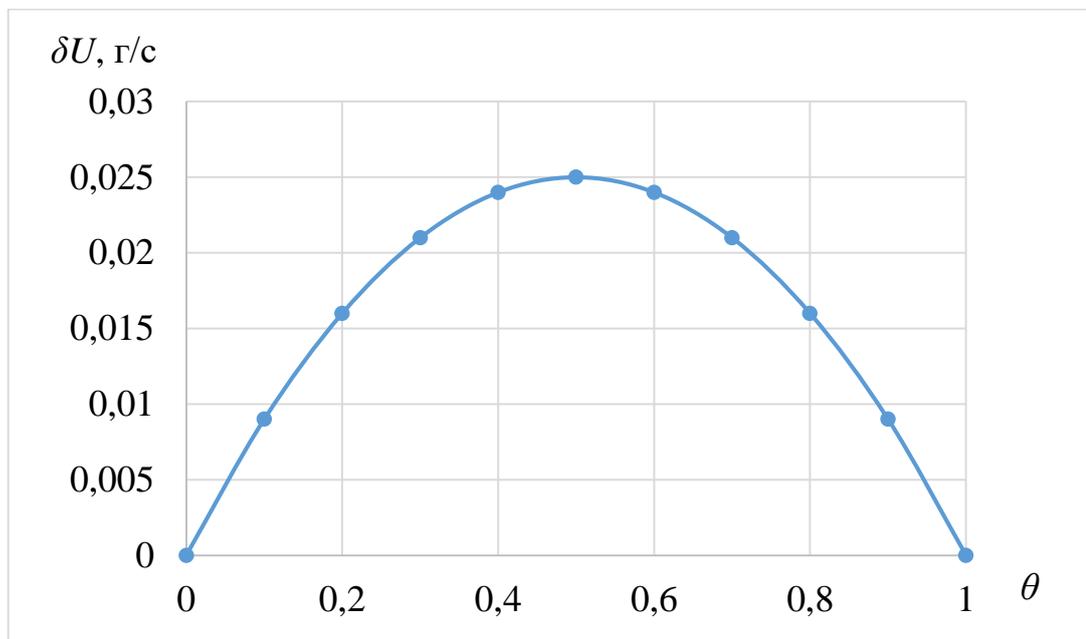


Рисунок 10 – Зависимость разделительной способности каскада от коэффициента деления потока

Из рисунка 10 видно, что максимальная разделительная способность наблюдается при $\theta = 0,5$. При $\theta = 0$ и $\theta = 1$ разделительная способность равна нулю.

3.3 Исследование влияния удельного коэффициента обогащения на профиль каскада и распределение концентрации изотопов селена по его ступеням

В ходе расчета модельного Q -каскада изменялся удельный коэффициент обогащения с 0,1 до 0,25 с шагом 0,05. На рисунке 11 приведены профили каскада в зависимости от величины ε_0 .

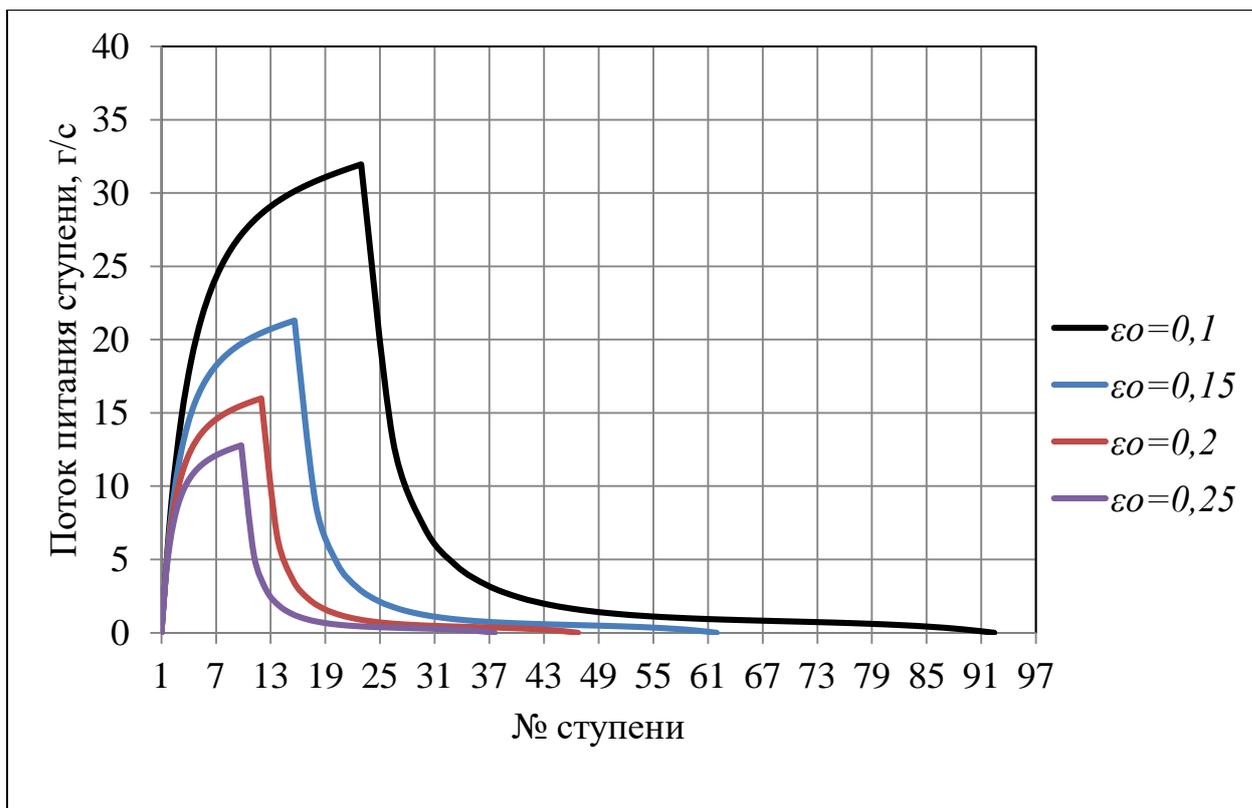


Рисунок 11 – Зависимость изменения профиля каскада от удельного коэффициента обогащения

Из рисунка 11 видно, что с увеличением удельного коэффициента обогащения, количество ступеней каскада, необходимое для достижения заданной концентрации, уменьшается, ступень подачи питания смещается к отвалному концу каскада, поток питания каскада также уменьшается. При увеличении ε_0 с 0,1 до 0,25 номер ступени подачи потока основного питания уменьшается с 22,93 до 9,77, количество ступеней уменьшается с 92,43 до 37,57 (на 59%), а поток питания уменьшается с 31,96 до 12,78 (на 60%).

Затем построены графики распределения концентрации изотопов селена при изменении ε_0 , которые представлены на рисунке 12.

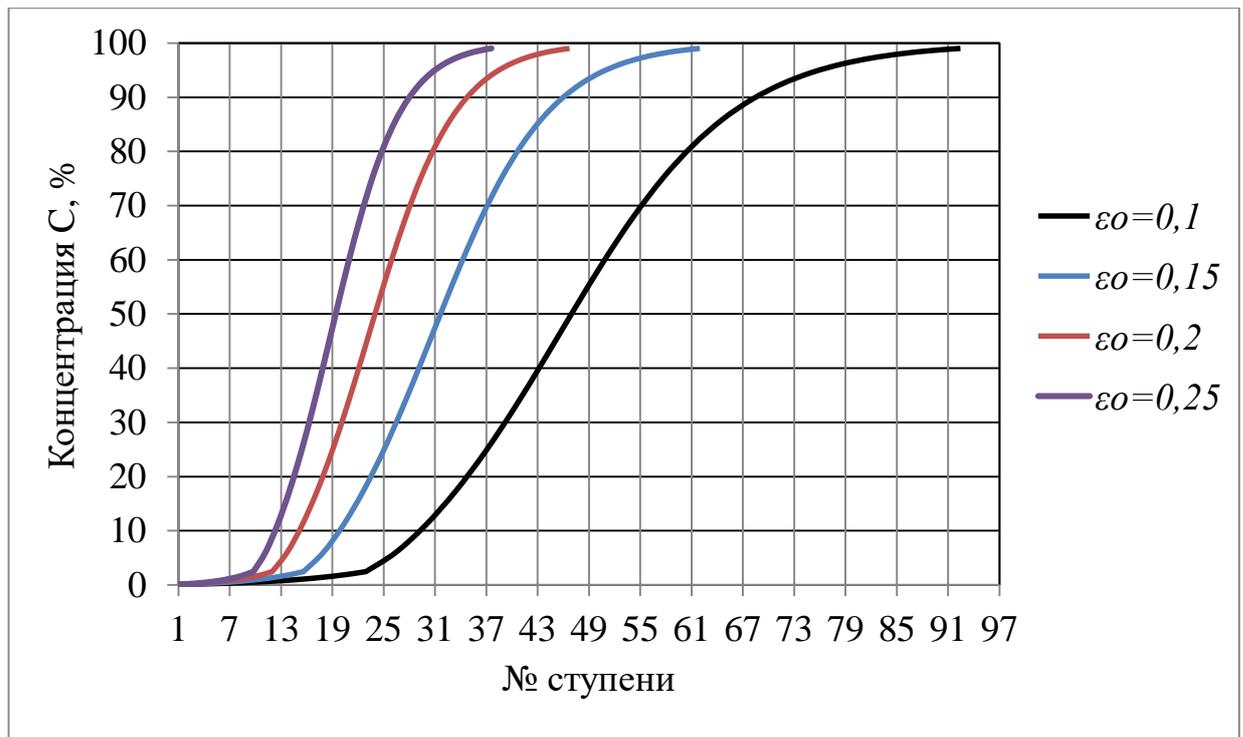


Рисунок 12 – Зависимость изменения концентрации целевого изотопа по ступеням каскада от удельного коэффициента обогащения

Из рисунка 12 видно, что при увеличении удельного коэффициента обогащения с 0,1 до 0,25, количество ступеней уменьшается с 92,43 до 37,57.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является получение зависимостей изменения профиля Q-каскада и концентрации изотопа селена-74 от параметров каскада.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные отрасли научной промышленности, области производства, основная цель которых, это получение изотопной продукции (в частности, изотопов селена).

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности получения селена-74. Результаты сегментирования представлены в рисунке 13.

		Отрасли, использующие зависимости изменения профиля каскада и концентрации изотопа селена-74 от параметров Q-каскада		
		Разделительные предприятия	Исследовательская отрасль	Иные производственные отрасли
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Рисунок 13 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценивать сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Главное преимущество Q -каскадов заключается в возможности предварительной оценки разделительного процесса с достаточной точностью. Расчётная модель позволяет также избавиться от многочисленных экспериментов и крупных финансовых затрат на их реализацию. Исходя из этого конкурентами разработанных зависимостей являются:

- Экспериментальные исследования обогащению селена по ^{74}Se изменением параметров каскада (B_{k1});
- Теоретические зависимости профиля каскада и концентрации, полученные при использовании других модельных каскадов (B_{k2}).

Оценочная карта полученных профиля и концентраций изотопов селена от параметров Q -каскада, представлена в таблице 4.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (4.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Для оценки конкурентных решений были выбраны следующие критерии: повышение производительности труда (насколько данное

техническое решение поможет увеличить производительность труда на предприятии); простота эксплуатации (возможность удобного использования полученных данных для получения необходимых результатов); экономичность (сокращение материальных затрат на получение необходимых данных); надежность (точность и корректность получения данных в любой момент); потребность в материальных ресурсах (получение необходимых данных без высокого уровня затрат); стабильность (безотказность расчетной модели при различных устанавливаемых параметрах в любой момент времени); доступность (возможность приобретения предприятиями полученных зависимостей, либо получения результатов расчета заказчиками); конкурентоспособность (преимущества данной расчетной модели над иными способами получения зависимостей); затраты на разработку (сколько потрачено материальных ресурсов на реализацию модели); предполагаемый срок эксплуатации (в течении какого периода возможно получать необходимые данные тем или иным способом); финансирование разработанного метода (начальное и дальнейшее вложение средств для получения данных различными способами).

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,18	5	4	3	0,9	0,72	0,54
2. Удобство эксплуатации	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
3. Экономичность	0,06	5	2	4	0,3	0,12	0,24

4. Надежность	0,1	5	4	2	0,5	0,4	0,2
5. Закрытость получаемых данных	0,05	5	4	5	0,25	0,2	0,25
6. Потребность в материальных ресурсах	0,05	5	1	5	0,25	0,05	0,25
7. Стабильность	0,03	4	3	3	0,12	0,09	0,09
8. Доступность	0,07	5	4	5	0,35	0,28	0,28
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
2. Затраты на разработку	0,13	5	1	4	0,65	0,13	0,52
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	2	4	0,5	0,2	0,4
4. Финансирование разработанного метода	0,09	5	1	3	0,45	0,09	0,27
Итого	1				4,97	2,84	3,46

Рассмотрены технические критерии оценки ресурсоэффективности и экономические критерии оценки эффективности. Общий вес всех перечисленных критериев равен 1. Каждому критерию была присвоена оценка от 1 до 5, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная.

Для рассчитанных зависимостей Q -каскада, представленной в работе, наиболее важными показателями являются: повышение производительности труда, удобство эксплуатации, надёжность, затраты на разработку и предполагаемый срок эксплуатации (вес критерия больше или равен 0,1)

Менее важными критериями были выбраны: закрытость получаемых данных, потребность в материальных ресурсах, стабильность и конкурентоспособность (вес критерия меньше 0,05).

Итоговые баллы равны 4,97, 2,84 и 3,46 для B_{ϕ} , B_{k1} и B_{k2} , соответственно, из чего можно сделать вывод о достаточной конкурентоспособности выбранного технического решения. Такие недостатки как низкая точность данных (B_{k2}), высокие материальные затраты (B_{k1}), финансирование методов (B_{k1} , B_{k2}) делают экспериментальные исследования и теоретические зависимости, полученные с помощью других модельных каскадов невыгодными для использования. Также стоит отметить, что эксперименты – это длительный процесс, поэтому теоретические расчеты позволяют сократить время на подготовку процесса.

Таким образом, рассчитанные зависимости Q -каскада позволяют существенно снизить потребность в материальных затратах и обеспечивают высокую точность.

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает

недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

В таблице 4.2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями и слабых сторон с угрозами, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки

Таблица 4.2 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	-	+	0	+	+
B2	+	+	-	-	+
B3	+	+	0	+	+
B4	+	+	+	+	+
B5	+	+	+	+	0

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «+» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «-» – слабое соотношение, «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-».

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>С1. Широкое применение ^{74}Se.</p> <p>С2. Применение современного оборудования и программного обеспечения.</p> <p>С3. Бюджетное финансирование.</p> <p>С4. Получение результатов высокой точности.</p> <p>С5. Возможность оптимизации программного кода.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Ограниченное применение полученных зависимостей (только для селена).</p> <p>Сл2. Требуется экспериментальное подтверждение результатов.</p> <p>Сл3. Ограниченный круг потребителей.</p> <p>Сл4. Ограниченные возможности расчёта (только для газоцентрифужного обогащения).</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Расчет зависимостей для других изотопов.</p> <p>В2. Разработка рекомендаций по использованию кода для персонала.</p> <p>В3. Увеличение количества рассчитываемых зависимостей.</p> <p>В4. Возможность дополнительного спроса на результаты исследования.</p> <p>В5. Получение патента на изобретение.</p>	<p>1. Повышение спроса за счет высокой точности результата и удобства эксплуатации.</p> <p>2. Актуальность выбранной тематики, обусловленная появлением дополнительного спроса.</p> <p>3. Усовершенствование кода за счет применения современного оборудования.</p>	<p>1. Увеличение числа потребителей за счет увеличения количества зависимостей.</p> <p>2. Экспериментальное подтверждение осуществить за счет патента.</p> <p>3. Ограниченность применения возможно уменьшить за счет расчета каскада для других изотопов.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Низкий спрос со стороны предприятий.</p> <p>У2. Вероятность разработки подобных расчётных моделей другими организациями.</p> <p>У3. Нежелание предприятий модернизировать производство.</p> <p>У4. Разработка</p>	<p>1. Спрос возможно увеличить за счет дополнительных расчетов, а также увеличения рынка ^{74}Se.</p> <p>2. Повышение конкурентоспособности на рынке за счет оптимизации кода.</p> <p>3. Экспериментальное подтверждение расчетов поможет презентовать расчеты консервативным предприятиям.</p>	<p>1. Низкий спрос, а также ограниченность расчета одним газоцентрифужным методом могут проявить себя в случае появления более совершенного метода разделения (не предвидится).</p> <p>2. Ограниченный круг потребителей, а также нежелание модернизации могут повлечь за собой отсутствие спроса</p>

более совершенных модельных каскадов.		
---------------------------------------	--	--

В таблице 4.3 выявлены сильные и слабые стороны разработки, а также проанализировано влияние возможностей и угроз на них. Выявлено, что большую часть угроз (У1, У2, У3) можно компенсировать открывающимися возможностями, такими как расчет зависимостей для других изотопов, . получение патента на изобретение и др. Можно сделать вывод, что на данный момент сильные стороны возможности разработки значительно преобладают над её слабыми сторонами и угрозами. Также внешние угрозы, как отказ от газодиффузионного метода или от применения ⁷⁴Sev не предвидятся.

4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

4.2.1 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	2.02.2021	Приказ по ИШЯТ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2021	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2021	
№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
4	Подбор и изучение материалов по теме	12.02.2021	Отчёт
5	Календарное планирование работ	13.02.2021	План работ
6	Изучение возможностей расчётной	14.02.2021	Отчёт

	модели		
7	Освоение методики расчёта на практике	15.02.2021	Отчёт
8	Проведение расчётов	15.02.2021- 28.03.2021	Отчёт
9	Анализ полученных данных	31.03.2021	Отчёт
10	Обобщение и оценка результатов	04.04.2021	Отчёт
11	Составление пояснительной записки	04.04.2021- 09.05.2021	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	13.05.2021	
13	Подготовка к защите	13.05.2021- 28.05.2021	

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения НИР

Необходимо спланировать работу каждого участника эксперимента и сроки их проведения. Для оптимизации работ удобнее всего использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Расчет параметров линейного графика требует определение продолжительности работ.

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ $t_{ож}$ используется следующая формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{min\ i} + 2t_{max\ i}}{5} \quad (4.2)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой

работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_{pi} , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (4.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения календарного план–графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k \quad (4.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -ой работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность одной работы в рабочих днях;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{кал}}{T_{кз} - T_{вд} - T_{нд}} \quad (4.5)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вд}$ – количество выходных дней в году;

$T_{нд}$ – количество праздничных дней в году

$$k = \frac{365}{365-118} = 1,478 \quad (4.6)$$

Расчетная величина продолжительности работ T_k округляется до целых чисел.

Таблица 4.5 – Временные показатели проведения НИР

Название	Трудоемкость работ, чел.-дни			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_k
	t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$			
Разработка технического задания	1	2	1,4	Руководитель	1	1
Составление и утверждение технического задания	1	2	1,4	Руководитель	1	1
Выбор направления исследований	1	3	1,8	Руководитель, Бережная А.Р.	2	3
Подбор и изучение материалов по теме	4	6	4,8	Бережная А.Р.	5	7
Календарное планирование работ	1	2	1,4	Руководитель, Бережная А.Р.	1	1
Изучение возможностей расчётной модели	1	2	1,4	Бережная А.Р.	1	1
Освоение методики расчёта на практике	1	2	1,4	Бережная А.Р.	1	1
Проведение расчётов	54	65	58	Руководитель, Бережная А.Р.	29	42
Анализ полученных данных	1	3	1,8	Руководитель, Бережная А.Р.	2	3
Обобщение и оценка результатов	4	8	5,6	Руководитель, Бережная А.Р.	3	4
Составление пояснительной записки	20	30	24	Бережная А.Р.	24	35

Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	4	8	5,6	Руководитель, Бережная А.Р.	3	4
Подготовка к защите	7	14	9,8	Бережная А.Р.	10	15

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ.

Таблица 4.6 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _к , кал.дн.	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль		Март			Апрель			Май			Июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Разработка технического задания	Руководитель	1	1													
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	2													
3	Выбор направления исследований	Руководитель, Бережная А.Р.	3	3													
4	Подбор и изучение материалов по теме	Бережная А.Р.	7	4													
5	Календарное планирование работ	Руководитель, Бережная А.Р.	1	5													
6	Изучение возможностей расчётной модели	Бережная А.Р.	1	6													
7	Освоение методики расчёта на практике	Бережная А.Р.	1	7													
8	Проведение расчётов	Бережная А.Р.	42	8													
9	Анализ полученных данных	Бережная А.Р.	3	9													
10	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, Бережная А.Р.	4	10													
11	Составление пояснительной записки	Бережная А.Р.	35	11													
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, Бережная А.Р.	4	12													
13	Подготовка к защите	Бережная А.Р.	15	13													

 – Руководитель  – Бережная А.Р.

4.3 Бюджет научного исследования

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

- материальные затраты;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.3.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (4.7)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15 – 25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 4.7.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

$$Z = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 3,66 \cdot 0,5 \cdot 880 = 1610, \quad (4.8)$$

где $C_{эл}$ – тариф на промышленную электроэнергию (3,66 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 1610 рубля.

Таблица 4.7 – Материальные затраты (Z_{mat})

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электричество	–	480 кВт·ч	3,66	1610
Доступ в интернет	–	4 месяца	350	1400
Всего за материалы				3010
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого				3010

4.3.2 Прочие прямые расходы

В работе было использовано программное обеспечение Wolfram Mathematica 11.0.

Таблица 4.8 – Прочие прямые расходы

Наименование	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Wolfram Mathematica 11.0	1 год	14600	14600

4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (4.9)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (4.10)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}}, \quad (4.11)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Турбина И.А.
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные дни, праздничные дни)	66	118
Потери рабочего времени:		
отпуск;	56	28
невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	219

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.
- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

– иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью профессор и степенью доктор наук. Оклад профессора составляет 32566 рублей (без учета РК).

Исполнителем является инженер-исследователь Бережная А.Р., оклад инженера составляет 15630 руб. (без учета РК).

Для расчета месячного должностного оклада работника применяется формула:

$$Z_m = Z_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_d) \cdot k_p, \quad (4.12)$$

где Z_{mc} – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_d – коэффициент доплат и надбавок, составляет примерно 0,2-0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15-20 % от Z_{mc});

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Таблица 4.10 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Исполнители	Z_{mc} , руб.	k_{np}	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_k , дни	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	32566	0,3	0,2	1,3	63503,7	2717,9	14	38050,6
Бережная А.Р.	15630	0,3	-	1,3	26414,7	1254,4	116	145510,4
Итого $Z_{осн}$:								183561

4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и

общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (4.13)$$

где $Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{доп}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($k_{доп} = 0,14$);

$Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб.

В таблице 4.11 приведен расчет основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.11 – Заработная плата исполнителей ВКР

Заработная плата	Руководитель	Бережная А.Р.
Основная зарплата $Z_{осн}$, руб.	38050,6	145510,4
Дополнительная зарплата $Z_{доп}$, руб.	5327,1	20371,5
Итого по статье $Z_{зн}$, руб	43377,7	165881,9
Итого	209259,6	

4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30,2 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (4.14)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

Для руководителя:

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 43377,7 = 13100,1 \text{ руб.}$$

Для Бережной А.Р.:

$$Z_{внеб} = 0,302 \cdot 165881,9 = 50096,3 \text{ руб.}$$

4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{накл} = k_{нр} \cdot (Z_{мат} + Z_{внеб} + Z_{осн}), \quad (4.15)$$

Для руководителя:

$$Z_{накл} = 0,16 \cdot (3010 + 13100,1 + 38050,6) = 8665,7 \text{ руб.}$$

Для Бережной А.Р.:

$$Z_{накл} = 0,16 \cdot (3010 + 50096,3 + 145510,4) = 31778,7 \text{ руб.}$$

Величину коэффициента накладных расходов $k_{нр}$ можно взять в размере 16%,

4.3.7 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

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.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб	
	Руководитель	Бережная А.Р.
1. Материальные затраты исследования	3010	
2. Прочие прямые расходы	14600	

3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	38050,6	145510,4
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	5327,1	20371,5
5. Отчисления во внебюджетные фонды	13100,1	50096,3
6. Накладные расходы	8665,7	31778,7
Общие затраты исполнителя	65143,5	247756,9
Общий бюджет затрат исследования	330510,4	

Определенная себестоимость проекта составляет 335182,4 руб., а время, необходимое для ее выполнения 117 календарных дней.

4.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта

Предполагается, что данная разработка поможет предприятию сэкономить на получении экспериментальных данных, при этом получить достаточно точные расчеты в кратчайшие сроки.

При рентабельности 70% цена продукта будет составлять около 569810 руб., что в любом случае меньше, чем реальный эксперимент, так как траты на материалы, оборудование, электроэнергию и заработную плату будут гораздо выше. Поломка в ходе эксперимента нескольких разделительных элементов уже будет оцениваться гораздо выше, чем ориентировочная цена предложенного продукта.

Если использовать теоретические расчеты других модельных каскадов, то значения будут недостаточно точными, что в конечном итоге приведет к убыткам на предприятии: потере рабочего вещества, переработка или простой оборудования, недостаточная или излишняя загруженность разделительных элементов.

4.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

1. Полученные зависимости Q-каскада для обогащения селена по ^{74}Se достаточно конкурентоспособны, так как позволяют получить данные с высокой точностью в короткие сроки, позволяют снизить материальные затраты, в отличие от экспериментальных данных. Благодаря выявленным преимуществам и возможностям, разработка может быть усовершенствована в дальнейшем.

2. Составлена таблицы контрольных событий проекта и временных показателей проведения НИР, на основе которых построен график Ганта. Самыми продолжительными и трудозатратными работами являются проведение расчетов и составление пояснительной записки.

3. Общий бюджет исследования составил 330510,4 руб. Он состоит из материальных затрат (3010 руб.), затрат на оплаты труда (209259,6 руб.), отчислений во внебюджетные фонды (63196,4 руб.) и накладных расходов (40444,4 руб.).

5 Социальная ответственность

Для снижения производственного травматизма и профессиональной заболеваемости повсеместно внедряется комплексная система управления охраной труда. Совместно с внедрением системы охраны труда должно проводиться непрерывное повышение качества и эффективности средств индивидуальной и коллективной защиты от вредных и опасных факторов, с которыми сталкивается рабочий персонал в течение профессиональной деятельности.

Охрана труда – система обеспечения безопасности жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические и иные мероприятия.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого может привести к травме или другому резкому ухудшению здоровья.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работающего может привести к заболеванию или снижению трудоспособности [42].

Сложность обеспечения охраны труда сводится к использованию достижений многих областей человеческой деятельности, связанных с созданием безопасности труда. Так, при разработке требований производственной санитарии используются результаты ряда медико-биологических исследований.

Успешное решение задач по обеспечению безопасности труда во многом зависит от квалификации специалистов в этой области, от их умения оперативно принимать правильные решения в сложных условиях производства.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях профилактики несчастных случаев и являются обязательными для

исполнения рабочими, инженерно-техническим и руководящим составом.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 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 медицинской 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.

5.1.2 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 14.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);

- литература и документация, необходимая при работе находится в зоне легкой досягаемости ладони - в (слева);
- в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

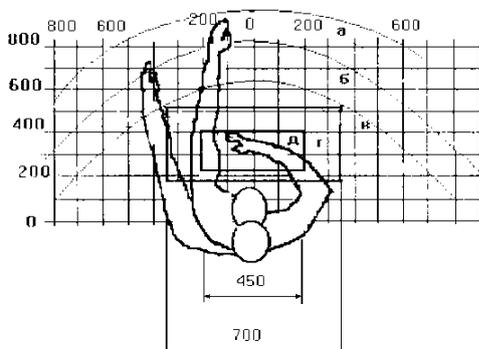


Рисунок 14. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости:

- 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.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 – 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и

глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

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° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

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

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 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:

- физические;
- химические;
- психофизиологические;
- биологические.

Опасные и вредные факторы, которые могут воздействовать на персонал при работе на ПЭВМ, приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
2. Повышенный уровень электромагнитного излучения	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
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.
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
5. Психофизиологические факторы	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
6. Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

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

- нервно - эмоциональные перегрузки;
- умственное напряжение;
- физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы отсутствуют.

5.2.2 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 м².

5.2.3 Отклонение показателей микроклимата

Основные параметры, характеризующие условия труда – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха.

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека;

при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с нормами и приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

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

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20...25 °С, зимой – 13...15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

5.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока. Согласно [43] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

– в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 25 В/м;

– в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

– в диапазоне частот 5 Гц– 2 кГц – 250 нТл;

– в диапазоне 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.

При работе с ПЭВМ, источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [43] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана не более 100 мкР/час.

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

5.2.5 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 (СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий) 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.

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).

5.2.6 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. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

В таблице 5.3 приведены нормы уровня шума при различных видах работ.

Таблица 5.3. 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

5.2.7 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 (СанПиН

2.2.2/2.4.1340–03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»).

5.2.8 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ПЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ПЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ПЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;

- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей) [44].

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.

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

5.2.9 Пожарная безопасность

Согласно [45], 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. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;

– наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

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.

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

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:

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

– применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;

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

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

– обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;

– издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;

- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

5.2.10 Экологическая безопасность

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.

Мероприятия, позволяющие сохранять экологическую безопасность находясь на рабочем месте:

- Правильная утилизация ПЭВМ и других систем, а также их комплектующих;
- Использование энергосберегающих ламп;
- 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.

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.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.3.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования

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.

К причинам неэлектрического характера относятся халатное и неосторожное обращение с огнем (курение, оставление без присмотра нагревательных приборов).

К причинам электрического характера относятся:

- короткое замыкание;
- перегрузка проводов;
- искрение;
- статическое электричество.

Режим короткого замыкания – появление в результате резкого возрастания силы тока, электрических искр, частиц расплавленного металла, электрической дуги, открытого огня, воспламенившейся изоляции.

Пожарная опасность при перегрузках – чрезмерное нагревание отдельных элементов, которое может происходить при ошибках проектирования в случае длительного прохождения тока, превышающего номинальное значение.

5.3.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и порядок действий в случае возникновения ЧС

Пожарная безопасность помещения должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Должны быть приняты следующие меры противопожарной безопасности:

- обеспечение эффективного удаления дыма, т. к. в помещениях, имеющих оргтехнику, содержится большое количество пластиковых веществ, выделяющих при горении летучие ядовитые вещества и едкий дым;
- обеспечение правильных путей эвакуации;
- наличие огнетушителей и пожарной сигнализации;
- соблюдение всех противопожарных требований к системам отопления и кондиционирования воздуха.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре. Выведение людей из зоны пожара должно производиться по плану эвакуации. План эвакуации представляет собой заранее разработанную схему, на которой указаны пути эвакуации, эвакуационные и аварийные выходы, установлены правила поведения людей, порядок и последовательность действий в условиях чрезвычайной ситуации.

Существует порядок действий и правила поведения в случае возникновения пожара:

- Незамедлительно позвонить в аварийную службу или МЧС (112);
- Поставить в известность руководство (дежурного);
- По возможности принять меры для эвакуации людей и меры для тушения пожара.

5.4 Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В данном разделе приведено описание рабочего места на предмет возникновения чрезвычайных ситуаций, на наличия вредных факторов производственной среды. Приведен перечень законодательных и нормативных документов по требованиям охраны труда при работе на ПЭВМ, электробезопасности и пожаровзрывоопасности. Выявленные вредные факторы проанализированы, даны рекомендации по их устранению.

В первой части проанализированы опасные и вредные факторы рабочей среды, выявлены основные элементы производственного процесса, формирующие данные факторы.

Во второй части рассмотрены основные мероприятия по снижению воздействия или полному устранению влияния опасных и вредных факторов среды.

В третьей части рассмотрены основные мероприятия по предотвращению чрезвычайных ситуаций, а также порядок действий при возникновении ЧС.

Выводы

1. Проведен расчет параметров Q -каскада для получения селена с обогащением выше 98% по ^{74}Se , в результате которого получен профиль Q -каскада и зависимость распределения концентрации изотопов селена по его ступеням.

Показано, что заданного обогащения можно достигнуть за один этап разделения. Изотопы селена распределяются по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Наибольшее изменение концентрации изотопов селена имеет место на концевых ступенях каскада, наименьшее – вблизи ступени подачи потока питания.

2. Рассчитаны зависимости разделительной способности δU , потоков отбора легкой и тяжелой фракций каскада от коэффициента деления потока.

Показано, что максимальная разделительная способность наблюдается при $\theta = 0,5$, поток отбора легкой фракции каскада линейно увеличивается с увеличением θ , а поток отбора тяжелой фракции каскада – линейно уменьшается.

3. Рассчитаны зависимости изменения профиля каскада и концентрации целевого изотопа ^{74}Se по ступеням каскада от удельного коэффициента обогащения.

Показано, что с увеличением удельного коэффициента обогащения, количество ступеней каскада, необходимое для достижения заданной концентрации, уменьшается, ступень подачи питания смещается к отвалному концу каскада, поток питания каскада также уменьшается.

Полученные в ходе расчетов параметры модельного каскада могут быть использованы в АО «ПО ЭХЗ» при отработке технологии получения высокообогащенного селена-74.

Список литературы

1. Патент № 2444074 (13) С1, G21G4/04 (2006.01). Способ получения источников гамма-излучения на основе радионуклида селена-74 для гамма-дефектоскопии / Волчков Ю.Е., Декопов А.С., Злобин Н.Н., Косицин Е.М., Кузнецов Л.К., Шимбарев Е.В., Федотов В.И., Хорошев В.Н. // Бюл., 2017.
2. И. Г. Рысс. Химия фтора и его неорганических соединений / И. Г. Рысс. – Москва: Гос. научно-техн. изд-во хим. лит. – 1956. – 718 с.
3. Никольский Б. П. Справочник химика. В 2 томах. Том 2 / Никольский Б.П. – Ленинград: Химия, 1971. – 1168 с.
4. Gmelin Handbook. Se. Supplement vol. B2, Compounds/ Gmelin Handbook. Springer-Verl. – 1984. – P. 9-10.
5. J.J. Pitts. Inorganic Chemistry/ J.J. Pitts. A.W. Jache. – Amsterdam : Elsevier, 1968. – 1661 p.
6. Cohen B. Advanced Fluorine Chemistry/ Cohen B., Peacock R.D. – London. – 1970. – vol.6. – p. 344.
7. E. E. Aynsley. The Preparation and Properties of Selenium Tetrafluoride and Oxyfluoride/ E. E. Aynsley, R. D. Peacock, P. L. Robinson – University of Durham. – 1952. – 49 p.
8. Русских И. М. Получение радиоактивных изотопов в исследовательском ядерном реакторе для экспериментальных исследований свойств гомогенных радиационно-защитных материалов / Русских И. М., Ташлыков О. Л. // Труды первой научно-технической конференции молодых ученых ФГАОУ ВО. – 2016. – С. 254–257.
9. Оболончик В.А. Селениды. / Оболончик В.А. – М.: Металлургия, 1972. – 296 с.
10. Патент № 2196364 (13) С2 Российская Федерация, (51) МПК G21G4/04 (2001.04). Способ изготовления источника гамма-излучения на основе селена-75: № 2001108917/06: заявл. 04.04.2001: опубл. 10.01.2003 /

Гордеев Я.Н., Карасев В.И., Топоров Ю.Г.; заявитель Научно-исследовательский институт атомных реакторов.

11. Каталог радионуклидных источников ионизирующего излучения и препаратов. – Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2017. — 45 с. – ISBN 978-5-94831-179-1. – URL: http://niiar.ru/sites/default/files/katalog_radionuklidnyh_istochnikov_i_preparatov.pdf. Текст: электронный.

12. Патент № 2614529 (13) С2 Российская Федерация, (51) МПК G21G4/06 (2006.01). Радиоактивный материал с изменённым изотопным составом: № 201410994: заявл. 25.06.2012: опубл. 28.03.2017/ Манро Джон Дж., Шер Кевин Дж. ; патентообладатель СЦЗС ПРОДАКШН ЭНД ЭКВИПМЕНТ КО.

13. Белоусов А. В. Моделирование капсулированных источников с ^{75}Se с целью их потенциального использования в брахитерапии/ Белянов А. А., Крусанов Г. А., Черняев А. П.// Вестн. Моск. ун-та.: Физика. Астрономия. – 2007. – № 3. – С. 104–106.

14. Патент № 2499312 (13) С1 Российская Федерация, (51) МПК G21G4/04 (2006.01). Радионуклидный источник излучения для радиационной гамма-дефектоскопии: № 206427004: заявл. 10.04.2004: опубл. 28.01.2005 / Дуб А.В., Рябов А.Н., Капустин В.И., Хаютин С.Т., Алеханович Е.А., Поезжаева Л.В., Калинин В.Т., Фрейдин Б.М., Кузьмич Ю.В.; заявитель Научно-исследовательский институт атомных реакторов.

15. Патент № 2221293 (13) С1, Российская Федерация, (51) МПК G21G4/04 (2000.01). Источник гамма-излучения: № 20615526: заявл. 15.12.2006: опубл. 27.01.2007 / Шилтон Марк Голдер.; патентообладатель: Сейфгард Интернэшнл Солюшнс Лтд.

16. Багналл К. Химия селена, теллура и полония/ Багналл К. – Москва.: Атомиздат, 1972. – с. 99.

17. Чижиков Д. М. Селен и селениды / Д. М. Чижиков, В. П. Счастливый; Акад. наук СССР. Гос. ком. по черной и цвет. металлургии при

Госплане СССР. Ин-т металлургии им. А. А. Байкова. М.: Наука, 1964. – 320 с

18. Патент № 2078029 С1, Российская Федерация, (51) МКП С01В19/02 (1995.01) Способ получения селена: № 94018604/26: заявл. 1994.05.23: опубл. 1996.05.20 / Змеева Е.В., Калашников А.П., Коробцев В.П., Мариенко Е.П.; заявитель: Сибирский химический комбинат.

19. Лебедь А. Б. Производство селена и теллура на ОАО «Уралэлектромедь»: учебное пособие / Лебедь А. Б., Набойченко С. С., – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 112 с.

20. Смирнов. А. Ю. Q-КАСКАДЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ РАЗДЕЛЯЕМЫХ СМЕСЕЙ/ Смирнов А. Ю., Сулаберидзе Г. А. // Теорет. основы хим. технологии. – 2013. – Т. 47. № 4. – С. 441-446.

20. Current prices for isotopes: Institute for Rare Earths and Metals. – Switzerland. – URL: <https://en.institut-seltene-erden.de>. – Текст: электронный.

21. Афанасьев В. Г. КОМПЛЕКСНАЯ ГАЗОФТОРИДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОТОПОВ СЕЛЕНА// Афанасьев В. Г., Истомин В. Я., Калашников А Л. – Северск: Сибирский химический комбинат, 2001. – 43 с.

22. Zeng, S. Use of a Q-cascade in calculation and optimization of multi-isotope separation / Zeng, S.; Jiang, D.J.; Borisevich, V.; Sulaberidze, G. // Chem. Eng. Sci. – 2011. – № 66. – P. 2997-3002.

23. Borisevich, Calculational study of the enrichment of cadmium isotopes in gas centrifuges // Borisevich, V.; Litvin, Yu.; Sulaberidze, G. // Theor. Found. Chem. Eng.– 2007. – № 41. – P. 851–858.

24. Kucherov R.Ya. Theory of cascades for separating multicomponent isotope mixtures. / Kucherov R.Ya. Minenko, V.P. – Moscow, 1965. – С. 360–367.

25. Сулаберидзе Г.А. Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей. Учеб. пособие / Палкин В.А.,

Борисевич В.Д. и др. Под ред. Бормана В.Д. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2011. – 368 с. – ISBN 978-5-7262-1527-3

26. Zeng S. The Q-cascade explanation / Sulaberidze G.A., Jiang D. et al. // Sep. Sci. Technol. – 2012. – V. 47. № 11. – P. 1591.

27. Kolokoltsov N.A. Design of the cascades for separation of multicomponent isotope mixtures. / Kolokoltsov N.A., Minenko V.P., Nikolaev B.I., Sulaberidze G.A., Tret'yak, S.A. // At. Energ. – 1970. – № 29. – P. 425–430.

28. Sulaberidze G.A. Cascades for separation of multicomponent isotope mixtures/ Sulaberidze G.A., Borisevich, V.D. // Separation Science and Technology. – 2001. – P. 1769–1817.

29. Borisevich, V. New approach to optimize Q-cascades. / Borisevich, V.; Sulaberidze, G.; Zeng, S. // Chemical Engineering Science. – 2011. – № 66. – P. 393–396.

30. Yamamoto I. Multicomponent isotope separating cascade composed of elements with large separation factors / I. Yamamoto, A. Kanagawa // Journal of nuclear science and technology. – 1978. – Vol. 15, № 8. – P. 580-584.

31. Narten A. Separation factors in multicomponent mixtures of isotopes / A. Narten // Journal of chemical physics. – 1961. – Vol. 34. – P. 2198-2199.

32. Wood H.G. Estimation of an overall separation factor of a gas centrifuge for different multicomponent mixtures by separation theory for binary case / H.G. Wood, C. Ying, S. Zeng et al. // Separation science and technology. – 2002. – Vol. 37, № 2. – P. 417-430.

33. Borisevich V.D. On ideal and optimum cascades of gas centrifuges with variable overall separation factors / V.D. Borisevich, M.A. Borschevskiy, S. Zeng et al. // Chemical engineering science. – 2014. – Vol. 116. – P. 465-472.

34. Токманцев В.И. Разделение стабильных изотопов бора в прямоточных газовых центрифугах / В.И. Токманцев, В.А. Палкин // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123, № 1. – С. 40-45.

35. Zeng S. Transient process in gas centrifuge cascades for separation of multicomponent isotope mixtures / S. Zeng, C. Ying // Separation science and technology. – 2001. – Vol. 36, № 15. – P. 3439-3457.
36. Orlov A.A. Modeling of nonstationary processes during separation of multicomponent isotope mixtures / A.A. Orlov, A.A. Ushakov, V.P. Sovach et al. // Separation science and technology. – 2018. – Vol. 53, № 5. – P. 796-806.
37. Орлов А.А. Разделение многокомпонентной изотопной смеси в процессе заполнения каскада газовых центрифуг / А.А. Орлов, А.А. Ушаков, В.П. Совач // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 75-87.
38. Палкин В.А. Определение оптимальных параметров каскада газовых центрифуг с произвольной схемой соединения ступеней / В.А. Палкин, И.С. Игошин // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112, № 1. – С. 38-42.
39. Lehrer-Plamed Y. On the value function for multicomponent isotope separation / Y. Lehrer-Plamed // Journal of nuclear energy. – 1969. – Vol. 23. – P. 559-567.
40. Палкин В.А. Обобщение решения Смородинского для потенциала разделения многокомпонентной смеси изотопов / В.А. Палкин // Атомная энергия. – 2003. – Т. 95, № 5. – С. 373-382.
41. Палкин В.А. Потенциалы разделения многокомпонентной смеси изотопов / В.А. Палкин // Атомная энергия. – 2013. – Т. 115, № 4. – С. 230-235.
42. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 №181 – ФЗ.
43. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
44. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
45. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность