

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический

Направление подготовки 140402 Ядерные физика и технологии

Кафедра Физико-энергетических установок

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы				
ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И РАДИАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ				

УДК 621.039.58:621.039.8:61

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Фам Уиен Тхи		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. ФЭУ	Степанов Б. П.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. менеджмента	Верховская М. В.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О. Ю.	к.ф.-м.н., доцент		

Томск – 2017 г.

Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения
<i>Профессиональные компетенции</i>	
p1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
p2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
p3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
p4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
p5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.

P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<i>Общекультурные компетенции</i>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический
Направление подготовки 140402 Ядерные физика и технологии
Кафедра Физико-энергетических установок

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

О. Ю. Долматов

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Фам Уиен Тхи

Тема работы:

**Технологии безопасного использования радиоактивных веществ
и радиационных источников**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	- нормативно-технические документы,- научно-технические источники
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	- рассмотрение технологий производства радиоизотопов и их применение в медицине; - анализ особенностей производства радиоизотопов на основе генератора

	технеция; - формирование требований по обеспечению безопасности при использовании генератора технеция; - разработка процедур и мероприятий по вопросам учета и контроля радиоактивных веществ и радиационных источников.
Перечень графического материала	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	М. В. Верховская
Социальная ответственность	Т. С. Гоголева
Иностранный язык	
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Введение	
Производство радиоизотопов и их применение в медицине	
Производство молибдена и генератор технеция	
Обеспечение безопасностью при обращении с генератором технеция	
Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследования с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	
Социальная ответственность	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	13.03.2017
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. ФЭУ	Б. П. Степанов	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Фам Уиен Тхи		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Фам Уиен Тхи

Институт	Физико-технический	Кафедра	Физико-энергетических установок
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Ядерные реакторы и энергетические установки

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Формирование плана и графика разработки научного исследования	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. Составление бюджета научного исследования	Бюджет научно – технического исследования: - Расчет материальных затрат; - Основная заработная плата исполнителей темы;
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования	Определение ресурсоэффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Матрица SWOT
3. Иерархическая структура работ
4. Календарный план проекта
5. Линейный план-график проекта
6. Бюджет проекта
7. Определение ресурсоэффективности проекта

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент каф. менеджмента	Верховская М. В.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Фам Уиен Тхи		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM5B	Фам Уиен Тхи

Институт	Физико-технический	Кафедра	Физико-энергетических установок
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Ядерные реакторы и энергетические установки

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	– вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения); – опасных проявлений факторов производственной среды (электрической, пожарной и взрывной природы).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	– требования охраны труда при работе на ПЭВМ; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	– действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности	– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, 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
Ассистент каф. ПФ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM5B	Фам Уиен Тхи		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 123 стр., 15 рис., 31 табл., 40 источник, 1 приложений.

Ключевые слова: производство радионуклидов, применение радионуклидов в медицине, технеций – 99м, молибден– 99, генератор технеция – 99м, безопасность при обращении с радиоактивными источниками.

Объектами исследования являются радиоизотопы, применяемые в медицине.

Цель работы – изучение технологий безопасного использования радиоактивных веществ и радиационных источников.

В процессе исследования проводилось исследование технологий производства радиоизотопов и их применение в медицине, анализ особенностей производства радиоизотопов на основе генератора технеция. Рассмотрены требования по обеспечению безопасности при использовании генератора технеция. Проведена разработка процедур и мероприятий по вопросам учета, контроля и физической защиты радиоактивных веществ и радиационных источников.

В результате исследования разработана технология безопасного использования технеция – 99м при его применении в медицине.

Область применения: диагностическая ядерная медицина.

Практическая значимость работы состоит в том, что предлагаемые технологии использования радиоактивных веществ и радиационных источников позволяют обеспечить безопасную работу с радиационными источниками на основе требований федеральных законов о радиационной безопасности населения, окружающей среды, а также федеральных норм при использовании атомной энергии.

Определения, обозначения, сокращения

Радиоактивные изотопы (РИ): химические элементы, имеющие нестабильные атомные ядра, которые самопроизвольно распадаются, превращаясь в атомные ядра других элементов и при этом испуская частицы (электроны, протоны, позитроны, нейтроны) и кванты электромагнитного излучения, которые могут вызывать мутагенные, канцерогенные, тератогенные и другие изменения в живых организмах, а также негативные экологические явления.

Радиоактивное вещество (РВ): вещество, которое имеет в своем составе радиоактивные элементы.

Медицинская диагностика: процесс установления диагноза, то есть заключения о сущности болезни и состоянии пациента, выраженное в принятой медицинской терминологии. Этим же термином называется и раздел клинической медицины, изучающий содержание, методы и последовательные ступени процесса распознавания болезней или особых физиологических состояний.

Терапия: процесс, целью которого является облегчение, снятие или устранение симптомов и проявлений того или иного заболевания или травмы, патологического состояния или иного нарушения жизнедеятельности, нормализация нарушенных процессов жизнедеятельности и выздоровление, восстановление здоровья.

Радиофармацевтический препарат (РФП): химические вещества, содержащие радиоактивный нуклид и разрешенные для введения человеку с диагностической или лечебной целью.

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ): диагностический метод создания томографических изображений распределения радионуклидов. В ОФЭКТ применяются радиофармпрепараты, меченные радиоизотопами, ядра которых при каждом акте радиоактивного распада испускают только один гамма-квант (фотон).

Позитронно – эмиссионная томография (ПЭТ): радионуклидный томографический метод исследования внутренних органов человека или животного. Метод основан на регистрации пары гамма–квантов, возникающих при аннигиляции позитронов с электронами. Позитроны возникают при позитронном бета–распаде радионуклида, входящего в состав РФП, который вводится в организм перед исследованием.

Генераторы радионуклидные: переносные устройства с локальной радиационной защитой для быстрого получения короткоживущих радионуклидов в условиях медицинского учреждения.

Радиоактивные отходы (РАО): непригодные к использованию материалы, содержащие радиоактивные вещества в количествах, превышающих допустимые концентрации этих веществ для воды.

Оглавление

Введение	14
1 Производство радиоизотопов и их применение в медицине.....	16
1.1 Способы производства радиоизотопов.....	16
1.1.1 Получение радиоизотопов на ядерных реакторах	17
1.1.2 Получения радиоизотопов на ускорителях.....	19
1.2 Применение радиоизотопов в медицине	22
1.2.1 Радиоизотопы в диагностике	23
1.2.2 Радиоизотопы в терапии.....	29
1.3 Технеций в медицине и диагностические радиофармацевтические препараты с технецием	31
2 Производство молибдена и генератор технеция	36
2.1 Производство молибдена	37
2.1.1 Получение молибдена на ускорителях заряженных частиц	39
2.1.2 Получение молибдена на реакторах	40
2.2 Генератор технеция.....	46
3 Обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными материалами при использовании генератора технеция	50
3.1 Организация работ при использовании генератора технеция	50
3.2 Радиационная безопасность в медицинском учреждении при работе с радиоактивными веществами и радиационными источниками.....	53
3.3 Процедуры учета, контроля и физической защиты радиоактивных веществ.....	56
3.3.1 Учет и контроль радиоактивных веществ	56
3.3.2 Организация физической защиты радиоактивных веществ	58
4 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	62
4.1 Предпроектный анализ.....	62
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	62

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	63
4.1.3 SWOT – анализ	64
4.2 Планирование научно-исследовательских работ	68
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	68
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ.....	70
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	71
4.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	75
4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	81
5 Социальная ответственность.....	84
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	84
5.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ.....	86
5.2.1 Организационные мероприятия.....	86
5.2.2 Технические мероприятия.....	86
5.2.3 Условия безопасной работы	88
5.3 Электробезопасность.....	90
5.4 Пожарная и взрывная безопасность	92
Заключение	95
Список публикаций.....	97
Список использованных источников	98
Приложение А.....	102

Введение

Изучение возможностей применения искусственных радиоактивных изотопов в области биохимических исследований и в ядерной медицине началось вскоре после открытия искусственного превращения элементов, с момента открытия ^{30}P Жолио – Кюри в 1934 г. За последние десятилетия использование радиоактивных изотопов и меченных ими соединений, специально синтезируемых для медико – биологических исследований, получило широкое распространение, обусловленное как постоянным усовершенствованием методов получения, так и развитие техники детектирования *in-vivo* распределения радионуклидов в организмах человека и животных. В различных ядерных центрах, имеющих ускорительные комплексы или реакторы, разработаны программы получения радионуклидов, основанные на результатах исследования применительно к возможностям конкретной лаборатории.

В настоящее время известно свыше 2300 радионуклидов, из которых более 200 применяются в различных областях науки, техники, медицины. Эти радионуклиды имеют преимущественно искусственное происхождение в результате образования в реакциях взаимодействия заряженных частиц или нейтронов с веществом мишени, осуществляемых на ускорителях или в ядерных реакторах [1].

В последнее время широкое применение в медицинской практике для радиационной диагностики нашел короткоживущий изотоп технеция $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Широкое применение $^{99\text{m}}\text{Tc}$ в ядерной медицине обусловлено уникальной совокупностью ядерно-физических и химических свойств. Малый период полураспада, отсутствие корпускулярного излучения, оптимальная для сканирования энергия фотонного излучения обеспечивают достаточную радиационную безопасность др [2].

Радионуклиды применяются в медицине классифицируют по группам как диагностические и терапевтические. Дальнейшее развитие радиоизотопной

диагностики и терапии связано с увеличением производства и расширением номенклатуры изотопов медицинского назначения, особенно короткоживущих радиоизотопов. Человек создал несколько сотен искусственных радионуклидов и использует их в медицине и других областях. Такие радионуклиды и их препараты как радиационные источники и радиоактивные вещества соответственно. Излучения радиоактивных веществ оказывает не только во внешнем воздействии на человека, но и в проникновении их в организм. Таким образом, безопасность персонала и пациентов – один из важнейших вопросов при использовании радионуклидов в медицине [3].

Исходя из этого целью данной работы являются изучение вопросов получения и применение радиоизотопов в медицине и обеспечения безопасности при обращении с радиоактивными веществами. Для выполнения цели работы необходимо было решить такие задачи:

- рассмотрение технологий производства радиоизотопов и их применение в медицине;
- анализ особенностей производства радиоизотопов на основе генератора технеция;
- формирование требований по обеспечению безопасности при использовании генератора технеция;
- разработка процедур и мероприятий по вопросам учета и контроля радиоактивных веществ и радиационных источников.

1 Производство радиоизотопов и их применение в медицине

Производство изотопов – эффективная отрасль экономики во всем мире. Потребность радионуклидов для медицины постоянно возрастает. На данный момент около 50 стран мира имеют производства радионуклидов, применяемых в медицине. В мире имеется более 3000 специализированных онкологических центров, где ежегодно проводят до 50000 процедур внутри тканевого облучения злокачественных опухолей. Сегодня 70% производимых в мире стабильных изотопов и 50% радиоактивных используется в медицине. Интерес врачей к изотопам объясняется высокой эффективностью их применения в медицине.

Помимо производства изотопов идет производство радиофармацевтических препаратов (РФП) на их основе. В последнее время широко применяются РФП на основе ^{99m}Tc . Соединения ^{99m}Tc являются эффективными ингибиторами коррозии. ^{99m}Tc в форме пертехната $\text{Na}^{99m}\text{TcO}_4$ применяют в медицине. ^{99m}Tc в форме различных РФП используют для визуализации различных органов человека.

1.1 Способы производства радиоизотопов

Производство радиоизотопов медицинского назначения – активно развивающийся раздел современной ядерной индустрии. Оно включает выпуск изотопов – γ -, β -излучателей (долгоживущие изотопы), применяемых для лучевой терапии, в брахитерапии и внутрисполостной терапии и α -, мягкого β – излучения, позитронов, оже – электронов и электронов конверсии (короткоживущие и ультракороткоживущие изотопы)– для сцинтиграфии, однофотонной компьютерной томографии, позитронной томографии и радионуклидной терапии.

Их получают на ядерных реакторах и мощных ускорителях [4].

1.1.1 Получение радиоизотопов на ядерных реакторах

Величина плотности потока нейтронов, как и их энергия являются критическими факторами в производстве радионуклидов. Ядерный реактор, используемый для производства радионуклидов должен обладать достаточно высокой плотностью потока нейтронов и возможностью использования как тепловых, так и быстрых нейтронов.

Ядерный реактор используется для производства радионуклидов в результате ядерных реакций: (n,γ) , (n,p) , а также процесса ядерного деления (n,f) [5].

Количество произведённых радионуклидов в перечисленных выше реакциях зависит от числа ядер – мишеней, вероятности протекания реакций (эффективное сечение), плотности потока нейтронов, времени (облучения) и постоянной распада нарабатываемого радионуклида. Обратите внимание на то, что число атомов – мишеней уменьшается в процессе облучения благодаря тому, что мишень «сгорает». Заметим так же, что плотность потока нейтронов может быть ниже для внутренней части мишени чем для наружной.

Один из примеров реакций для производства радионуклидов на реакторах нейтрон – гамма (n,γ) . Тепловые нейтроны поглощаются ядром материала мишени, и при этом излучается гамма радиация. Образовавшийся нуклид, как правило, нестабилен и в конечном итоге распадается с испусканием бета/гамма излучения. В Таблице 1.1 даны примеры радионуклидов обычно получаемых в результате (n,γ) реакций.

Таблица 1.1 – Примеры радионуклидов, полученных в результате (n,γ) реакций

Продукт	Нуклид-мишень	Материал мишени	Реакция
^{60}Co	^{59}Co	Кобальт-металл	(n,γ)
^{24}Na	^{23}Na	Na содержащая смесь	(n,γ)

Продолжение таблицы 1.1

^{64}Cu	^{63}Cu	Сu содержащая смесь	(n, γ)
^{131}I	^{130}Te	Te содержащая смесь	(n, γ) конечный продукт получают в результате бета – распада ^{131}Te
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	^{98}Mo	Mo содержащая смесь	(n, γ) конечный продукт получают в результате бета – распада ^{99}Mo

Второй пример реакций для производства радионуклидов на реакторах реакции деления. Она происходят в ядерных реакторах при взаимодействии ядер ^{235}U с тепловыми нейтронами с последующим выделением дополнительных нейтронов. Реакция обозначается следующим образом (n,f).

В число продуктов деления урана входит более 360 радионуклидов, почти половины элементов периодической таблицы. Многие из этих продуктов деления являются полезными радиоизотопами, применяемыми в практической деятельности. Нарботка конкретного радионуклида зависит от выхода продуктов ядерного деления, числа атомов ^{235}U в мишени, плотности потока нейтронов, времени облучения и констант радиоактивного распада продуктов ядерного деления.

Мишень может содержать набор различных нуклидов, полученных в результате как деления, так и захвата нейтронов.

Протон – нейтронных реакций (n,p) тоже один пример для получения радионуклидов на реакторах. Данная реакция часто применяется для получения радиоизотопов для использования в качестве трассеров при различных исследованиях. Таким образом, с использованием быстрых и тепловых нейтронов производят ^{32}P из серной мишени (95% ^{32}S), ^{14}C из ^{14}N или ^{35}S из ^{35}Cl .

Иногда реакторы используются для получения радиоизотопов с нехваткой нейтронов. Например, ^{18}F обычно производится в ускорителе, но он может быть получен и в реакторе с использованием мишени из карбоната

лития. Литий – 6 обстреливается нейтронами с получением альфа частицы и ядер трития (^3T). Это нейтрон альфа реакция (n, α). Тритий затем вступает во взаимодействие с ^{16}O и образует ^{18}F и нейтрон. Это тритий–нейтрон реакция (T,n).

Это показывает, что интересующий радионуклид может быть получен различными способами, хотя часто на практике один метод проще и эффективнее чем остальные.

1.1.2 Получения радиоизотопов на ускорителях

Далеко не все изотопы можно получать в атомных реакторах по ядерным реакциям с участием тепловых нейтронов. Многие радионуклиды синтезируют на ускорителях протонов и тяжёлых ионов, например, на циклотронах. На циклотроне ускоряются до высоких энергий протоны, дейтроны и другие лёгкие ионы [5].

На циклотроне осуществляют ядерные реакции: (p,n) (например, $^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$, $^{127}\text{J}(\text{p},\text{n})^{127}\text{Xe}$, $^{127}\text{J}(\text{p},6\text{n})$), (d,n) (например, $^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$) и (p, α) (например, $^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$) и тд. Важно учитывать, что сечения таких реакций экстремально зависят от энергии бомбардирующей частицы (таблица 1.2).

Большинство получаемых на циклотронах радионуклидов являются нейтронообеднёнными и поэтому претерпевают либо позитронный распад, либо электронный захват.

Однако не все радионуклиды медицинского назначения выпускаются на мощных циклотронах, а РФП на их основе – в хорошо оборудованных радиохимических лабораториях. Связано это с тем, что для снижения токсичности и дозовой нагрузки на пациента, радионуклид должен обладать небольшим периодом полураспада, сравнимым с длительностью процесса применения. Препараты, меченные изотопами с периодами полураспада менее суток, не имеет смысла производить в ядерных центрах, т.к. за время доставки в госпиталь, они почти полностью распадутся.

Поэтому изотопы с $T < 7$ дней производят на компактных «медицинских» ускорителях, расположенных непосредственно на территории медицинского учреждения.

В ниже таблице 1.2 приведены примеры получения некоторых изотопов с помощью электронных ускорителей.

Для наработки медицинских радионуклидов используется не только циклотроны, но и другие типы ускорителей, например, линейные ускорители электронов, генерирующие жёсткое γ – излучение. На таком ускорителе осуществляется, например, ядерная реакция $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$.

В таблице 1.3 приведены примеры несколько радионуклидов, полученных на электронных ускорителях.

Таблица 1.2 – Примеры радионуклидов, полученных на протонных циклотронах и энергии протонов, необходимые для их производства

Энергия, МэВ	Изотопы
≥ 30	^{124}I , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{11}C , ^{15}O , ^{82}Sr , ^{68}Ge
17-30	^{124}I , ^{13}N , ^{15}O , ^{22}Na , ^{48}V , ^{201}Tl
11-16	^{15}O , ^{11}C , ^{18}F , ^{13}N
0-10	^{18}F , ^{15}O

Таблица 1.3 – Примеры радионуклидов, полученных на электронных ускорителях

Изотоп	$T_{1/2}$ (м)	Реакция
^{11}C	20,38	$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$ $^{16}\text{O}(\gamma, n\alpha)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(\gamma, t)^{11}\text{C}$

Продолжение таблицы 1.3

^{13}N	9,98	$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(\gamma, t)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(\gamma, nd)^{13}\text{N}, ^{16}\text{O}(\gamma, p2n)^{13}\text{N}$
^{15}O	4,07	$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$
^{18}F	109,8	$^{23}\text{Na}((\gamma, n\alpha)^{18}\text{F}$ $^{20}\text{Ne}((\gamma, d)^{18}\text{F}, ^{20}\text{Ne}((\gamma, pn)^{18}\text{F}$
^{47}Sc	0,114	$^{48}\text{Ti}((\gamma, d)^{47}\text{Sc}$
^{57}Co	9,06	$^{58}\text{Ni}((\gamma, d)^{57}\text{Co}$
^{67}Cu	0,086	$^{68}\text{Zn}((\gamma, d)^{67}\text{Cu}$
^{99}Mo	0,092	$^{100}\text{Mo}((\gamma, n)^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$
^{111}In	0,094	$^{112}\text{Sn}((\gamma, p)^{111}\text{In}$ $^{112}\text{Sn}((\gamma, n)^{111}\text{Sn} \rightarrow ^{111}\text{In}$
^{123}I	0,018	$^{124}\text{Xe}((\gamma, n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$

Радиоактивные изотопы применяются в медицине как для постановки диагноза, так и для терапевтических целей. С помощью радиоизотопов были раскрыты механизмы развития ряда заболеваний, их применяют также для изучения обмена вещества и диагностики многих заболеваний. В дальней части рассмотрим конкретно их применение.

1.2 Применение радиоизотопов в медицине

В настоящее время лечения и исследования на основе радионуклидных методов широко применяются в различных областях медицины [6].

Ниже перечислим несколько основных критерий выбора радионуклидов:

- он должен быстрый распад нуклида (обеспечение безопасностью при применении);
- удобного при регистрации;

– в РФП на основе радионуклидов не существуют токсических примесей;

– РФП на основе радионуклидов позволяет получить максимум информации при применении. Желательно выбирать РФП быстро выводиться и поступает в исследуемый орган.

В таблице 1.4 приведены примеры некоторых радиоизотопов, применяемых в медицине.

Радионуклиды и РФП на их основе, применяемые в медицине классифицируют как диагностические и терапевтические группы. (на рисунке 1.1).



Рисунок 1.1 – Классификация радионуклидов, используемых в медицине

Таблица 1.4 – Примеры радионуклидов, применяемых в медицине

радионуклиды	$T_{1/2}$ (г)	активность (Ки)	применение
^{60}Co	5	15 000	терапия рака
^{192}Ir	0,2	100	Ind.рентгенографии
^{90}Sr	29	0,1	глазная терапия
^{131}I	0,02	0,0015	Ядерная медицина
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	0,0007	0,0025	Диагностическое изображение

1.2.1 Радионуклиды в диагностике

Радионуклидная диагностика – метод диагностики, основанный на введении пациенту РФП, обладающего тропностью (сродством) к исследуемому органу или ткани и наличием меченого радионуклида, позволяющего определить количество РФП с помощью датчика ионизирующего излучения. РФП вводится в организм при помощи инъекции, ингаляции или перорально. Фотонное излучение, выходящее из тела пациента, даёт информацию о состоянии различных органов и возможных их патологиях. Получение информации другими методами требует хирургического вмешательства или дорогостоящего исследования. Поскольку излучение поступает из диагностируемого органа, а не транслируется извне, то появляется возможность его детального исследования: полученная картина отображена не только биологические процессы, но и анатомические аномалии [7].

Преимущество радионуклидной диагностики – её универсальность. Она используется для определения анатомических, функциональных и биохимических изменений в организме человека, возникающих при заболеваниях, и для выявления многих проявлений болезни. К преимуществам радионуклидной диагностики относят также физиологичность исследований; высокую информативность, позволяющую получать диагностическую картину на ранних этапах развития заболевания; атравматичность; отсутствие осложнений; не продолжительность исследований; хорошую переносимость и безопасность; низкие лучевые нагрузки; отсутствие необходимости предварительной подготовки пациента к исследованиям. Возрастных противопоказаний нет.

В таблице 1.5 приведены несколько радиоизотопов, используемых в диагностике.

Таблица 1.5 – Радиоизотопы, используемые в диагностике

Изотоп	$T_{1/2}$ (ч)	Применение
^{99}Mo	66	Изготовление РФП на основе $^{99\text{m}}\text{Tc}$ для диагностики
^{67}Ga	78,3	Томография опухолей мягких тканей
^{166}Ho	26	Для диагностики и лечения ревматоидного артрита
^{131}I	192	Диагностика и лечение функциональных нарушений щитовидной железы
^{201}Tl	73,5	Визуализация перфузии миокарда

В зависимости от типа излучения радионуклиды для диагностики классифицируют по группам [8]:

- радионуклиды для ОФЭКТ (однофотонная эмиссионная компьютерная томография);
- радионуклиды для ПЭТ (позитронно–эмиссионная томография).

Рассмотрим первую группу однофотонную эмиссионную компьютерную томографию.

ОФЭКТ – томограф предназначен для ранней диагностики функциональных нарушений в жизнедеятельности внутренних органов и систем человека. Диагностика достигается за счёт визуализации распределения физиологически активных РФП, меченных γ –излучающими радионуклидами, и их перераспределения в организме пациента [9].

ОФЭКТ – исследования начинаются с введения РФП, обычно с помощью инъекции. При этом используются практически те же РФП, что и при скинтиграфии. Далее аппаратура начинает детектировать и записывать интенсивность γ –излучения, испускаемого радионуклидом. Из–за требования радиационной безопасности, используются сравнительно небольшие удельные активности: обычно $\sim 10^4$ имп/(с·см³) исследуемой ткани. Следовательно, для сбора данных требуется довольно много времени. Например, ОФЭКТ–исследование сердца занимает 20 мин.

В состав аппаратуры для ОФЭКТ входит: детектор гамма-камеры; программно управляемое штативноповоротное устройство; электронный блок гамма-камеры; комплект коллиматоров; стол для размещения пациента; тележка для смены коллиматоров; система сбора, обработки и архивирования получаемой информации на основе портативного компьютера; комплект приспособлений; комплект соединительных кабелей; программное обеспечение для исследования сердечно-сосудистой системы; мочеполовой системы; системы пищеварения; исследования щитовидной железы; головного мозга; костной системы; системы дыхания.

В таблице 1.6 приведены некоторые изотопы, используемые в ОФЭКТ.

Таблица 1.6 – Некоторые изотопы, производимые на протонных циклотронах, используемые в ОФЭКТ

Изотопы	$T_{1/2}$ (сут)	Тип распада	Диапазон энергий протонов (MeV)	Использование
^{51}Cr	27,7	γ	2-30	томосцинтиграфия
^{67}Ga	3,3	γ	14-33	томосцинтиграфия лимфом
^{111}In	2,8	γ	13-31	томосцинтиграфия эндокринных опухолей
^{123}I	0,55	γ	13-30	томосцинтиграфия
^{201}Tl	3,0375	γ	20-40	томосцинтиграфия

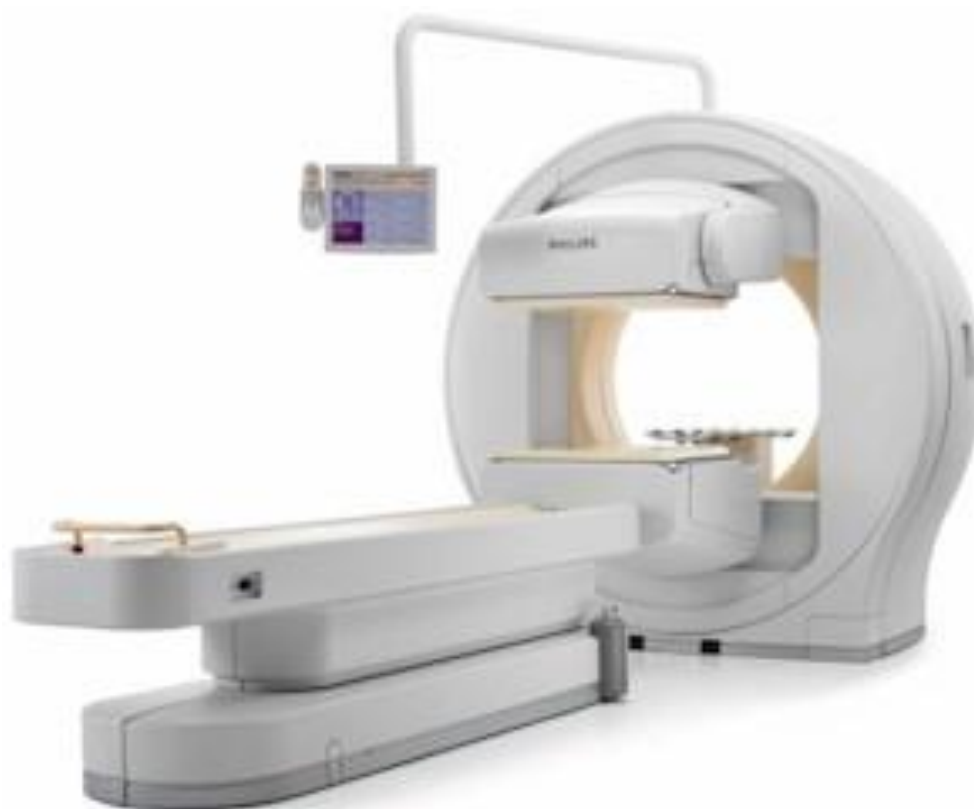


Рисунок 1.2 – Однофотонный эмиссионный компьютерный томограф

Качество ОФЭКТ – изображения зависит от целого ряда факторов: характера орбиты вращения детектора, типа коллиматора, размера матрицы изображения и количества проекций.

Вторая группа радионуклидов диагностического назначения – позитронно – эмиссионная томография.

Метод позитронно – эмиссионной томографии позволяет при помощи детектирующего оборудования (ПЭТ – сканера) отслеживать распределение в организме биологически активных соединений, меченных позитрон – излучающими радионуклидами и получать объёмные (томографические) изображения зон интереса. ПЭТ представляет собой неинвазивный метод определения концентраций соединений, меченных позитронными эмиттерами, в биологических тканях [10].

ПЭТ – метод трёхмерной лучевой визуализации, основанный на способности радионуклида, накопленного в тканях, обладающих высокой активностью (рисунок 1.3). Метод ПЭТ выявляет участки с повышенной активностью обмена веществ, которые свойственны злокачественным опухолям. Благодаря этому свойству опухоли становятся заметными на изображениях ПЭТ – сканах. ПЭТ используется в клинической медицине для получения изображений, как отражающих анатомическое строение ткани, так и отражающее их физиологические функции.

К преимуществам ПЭТ относится количественная оценка параметров физиологических и биохимических процессов, высокая чувствительность и хорошая разрешающая способность метода, а также малая радиационная нагрузка на пациента.

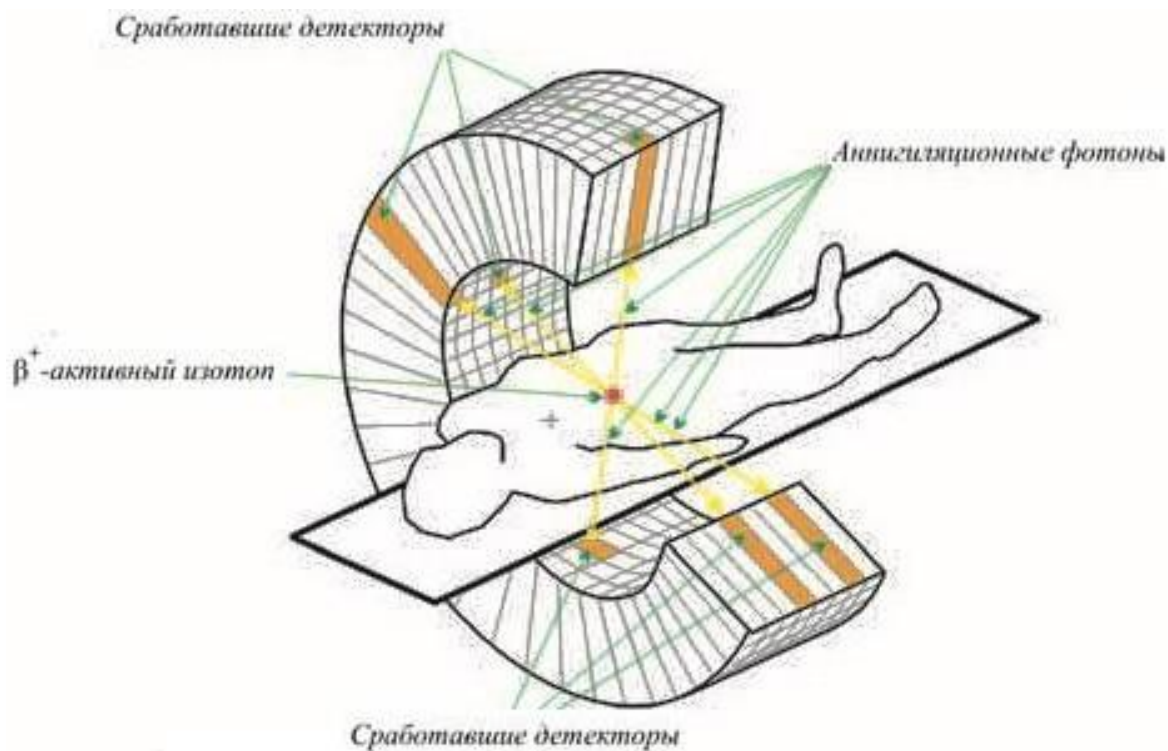


Рисунок 1.3– Схематическое изображение ПЭТ

В таблице 1.7 приведены некоторые изотопы, используемые в ПЭТ.

Таблица 1.7 – Некоторые изотопы, производимые на протонных циклотронах, используемые в ПЭТ

Изотоп	$T_{1/2}$ (м)	Тип распада	Диапазон энергий протонов (MeV)	Использование
^{11}C	20,4	β^+	6-25	показателей клеточной активности
^{15}O	2,1	β^+	5-21	Индикатор некроза опухоли
^{18}F	109	β^+	3-20	Метаболизм глюкозы
^{81}Rb	0,0064	β^+	>20	Миокард и мозг

1.2.2 Радиоизотопы в терапии

Радионуклидная терапия активно развивающееся направление ядерной медицины. При борьбе со злокачественными новообразованиями используют методы адресной доставки лекарственного средства, содержащего радионуклид, к пораженному органу. Данная технология позволила перейти от облучения всего тела к избирательному уничтожению опухолей [11].

В настоящее время радионуклидная терапия рассматривается как метод уничтожения блуждающих по организму раковых клеток и небольших по размерам метастаз. С большими опухолями и метастазами борются хирургическими способами, внешним облучением или химиотерапией, и только оставшиеся после таких воздействий одиночные клетки опухолей «добивают» методами радионуклидной терапии.

В радионуклидной терапии используются изотопы, претерпевающие α -излучатели (с линейной передачей энергии ЛПЭ ~ 100 кэВ/мкм и пробег 50–100 мкм) или β^- излучатели (энергия β^- в 200–2000 кэВ). Наиболее перспективными считаются радионуклиды, испускающие электроны Оже или электроны внутренней конверсии.

При радионуклидной терапии РФП вводят в тело пациента внутривенной инъекцией в жидкой или агрегатной форме, как компонент пищи, путём ингаляции в виде газа или аэрозоля, или инъекцией микрокапсулированного радионуклида. Некоторые методы требуют меченя радионуклидами собственных кровяных клеток пациента (лейкоцитов и красных кровяных клеток). Процедура радионуклидной терапии реализуется в двух режимах: госпитализация больных в «активные» палаты с пребыванием в них на закрытом режиме в течение определённого времени или амбулаторный режим, когда пациента не госпитализируют, а после введения РФП сразу или после непродолжительной выдержки в отделении радионуклидой терапии отпускают домой.

К преимуществам радионуклидной терапии относится избирательность повреждения опухоли или патологического очага при высокой толерантности нормальных биологических тканей; возможность формирования в патологических очагах больших поглощённых доз (до 1000 Гр); хорошая переносимость процедуры терапии, незначительные побочные эффекты; относительно короткое время госпитализации; возможность использования для лечения тяжелобольных.

Техника безопасности включает контроль очаговых доз облучения, дозиметрическую аппаратуру, оснащение для работы с источниками излучения, приборы радиационного контроля. Радиоэкологическое обеспечение радионуклидной терапии состоит из системы очистки жидких радиоактивных отходов, установок для вентиляции, а также для сбора, хранения и удаления твёрдых радиоактивных отходов. Радиационно – гигиеническое обеспечение отвечает за радиационную безопасность пациентов и персонала. Требование радиационной безопасности населения предусматривает амбулаторный режим применения РФП и противоаварийную защиту[12].

В таблице 1.8 представлены некоторые изотопы, используемые в терапии в онкологии.

Таблица 1.8 – Некоторые изотопы, используемые в терапии в онкологии

Изотопы	T _{1/2} (сут)	Тип распада	РФП	Использование
¹³¹ I	8,04	β, γ	¹³¹ I как йодид	дифференцированный рак щитовидной железы
⁹⁰ Y	2,7	β	⁹⁰ Y - микросфер	метастазы в печеньгепатоцеллюлярной карциномы
⁹⁰ Y	2,7	β	⁹⁰ Y- зевалин	неходжкинские лимфомы
¹³¹ I	8,04	β, γ	¹³¹ I- бексар	неходжкинские лимфомы
⁸⁹ Sr	50,5	β	⁸⁹ Sr хлорид	боли в костях

1.3 Технеций в медицине и диагностические радиофармацевтические препараты с технецием

В последнее время большинство процедур в диагностике (~80%) с техниками ОФЭКТ осуществляли с помощью препаратами на основе ^{99m}Tc .

Технеция ^{99m}Tc – зонд, перемещение которого по организму и накопление в исследуемом органе легко фиксируется аппаратурой. Он обладает коротким периодом полураспада ($T = 6,04$ часа, за 24 часа распадается 94% этого изотопа) и малым периодом полувыведения из организма (менее суток для большинства соединений), поэтому он оказывает сравнительно небольшое вредное воздействие на здоровые органы обследуемого человека и позволяет проводить повторное обследование одного и того же объекта через короткие промежутки времени, не допуская его переоблучения; малой энергией γ – излучения (140 кэВ), которая тем не менее обладает достаточно высокой проникающей способностью, что обеспечивает необходимую глубину анализа; «внятной» спектральной линией, которую даёт накопившийся в аномальных участках органов радиоактивный изотоп и которую хорошо коллимирует диагностическая аппаратура, что обеспечивает хорошее разрешение получаемого изображения. ^{99m}Tc применяют для диагностики различных органов человека (печени, почек, щитовидной железы тд) [13].

Таблица 1.9 – Мощность дозы, получаемая пациентами после введения РФП– ^{99m}Tc (на расстоянии 1 метр и 0.3 метров от типичного пациента)

процедура	А (МВк)	мощность дозы(мкГр/ч)	
		0.3 м	1м
Сцинтиграфия костей	740	9.8	3
Радионуклидное сканирование печени	37	0.5	0.15
Определение кровяногодепа	740	9.8	3

В таблице 1.10 представлены некоторые диагностические РФП на основе ^{99m}Tc [14].

Таблица 1.10 – РФП на основе ^{99m}Tc , используемые в диагностических исследованиях

РФП	Рекомендации для исследований
Меченые частицы	
^{99m}Tc – макроагрегаты альбумина, 10...50 мкм (Макротех)	перфузия легких
^{99m}Tc – серный коллоид, 0,1...1,0 мкм	печень, селезенка, костный мозг
^{99m}Tc – отфильтрованный, 0,1...0,3 мкм	Лимфатический коллекторы, рак молочной железы (РМЖ), меланома
^{99m}Tc – HAS (нанокolloид) 0,02 мкм	«сторожевые» лимфатические узлы, РМЖ, меланома
Радиоактивные газы	
^{99m}Tc – технегаз, 0,004...0,250 мкм	вентиляция легких
^{99m}Tc – ЭТРА, аэрозоль, 1...4 мкм	вентиляция легких
Меченые хелаты	
^{99m}Tc – MDP, HDP	метастазы опухолей в кости, остеосаркома, нейробластома
^{99m}Tc – DTPA	опухоли головного мозга, почечный кровоток и сцинтиграфия почек
^{99m}Tc – MAG3	сцинтиграфия почек
Меченые хелаты	
^{99m}Tc – DMSA	сцинтиграфия почек, медуллярная карцинома щитовидной железы
^{99m}Tc – Cerelec (HMPAO)	перфузия головного мозга
^{99m}Tc – Sestamibi и tetrafosmin (Технетрил)	перфузия миокарда, РМЖ, опухоли головного мозга

Продолжение таблицы 1.10

Клетки крови, меченые радионуклидами	
^{99m}Tc – эритроциты	злокачественные опухоли толстого кишечника
Радиофармпрепараты для связывания с рецепторами	
^{99m}Tc – P829, Neotec	злокачественные опухоли легких, нейроэндокринные опухоли
^{99m}Tc – P280	визуализация тромбов, диагностика тромбоза глубоких вен
^{99m}Tc – Disofenin и Choletec	гепатобилисцинтиграфия

В России основным производителем наборов реагентов для производства ^{99m}Tc является ООО «Диамед», созданное на базе отдела радиофармпрепаратов Института биофизики МЗ СССР. За рубежом подобную продукцию производят фирмы Amercham, Malincrodt и др. На сегодняшний день в России производятся несколько лиофилизатов для приготовления ^{99m}Tc –РФП (таблица 1.11).

Таблица 1.11 – Лيوфилизаты для приготовления РФП на основе ^{99m}Tc

Препарат	Составы	Применение
Технефор	^{99m}Tc представляет собой комплекс ^{99m}Tc с оксабифором(окса-бис-(этиленнитрило)тетраметилефосфоновой кислотой)	для сцинтиграфии и скеннирования скелета с целью диагностики патологических изменений различной этиологии.
Технефит	^{99m}Tc представляет собой коллоидный раствор технеция ^{99m}Tc на основе фитина (солей инозитгексафосфорной кислоты)	для сцинтиграфии и скеннирования печени и селезенки с целью определения их формы, размеров и нарушений анатомо-морфологической структуры при опухолях, циррозах, гепатитах и других заболеваниях.

Продолжение таблицы 1.11

Технемек	^{99m}Tc представляет собой комплекс технеция ^{99m}Tc с димеркарбонатной кислотой	для сцинтиграфии и скеннирования почек с целью определения их формы, размеров, положения, аномалий развития и наличия органических и функциональных поражений.
Бромезида	^{99m}Tc представляет собой комплекс технеция ^{99m}Tc с 2,4,6-триметил-3-бромфенилкарбамоилметилиминодиуксусной кислотой	для динамической сцинтиграфии печени, желчного пузыря, желчевыводящих путей, при заболеваниях желтухой различной этиологии и других поражениях панкреато-дуоденальной зоны.
Технемаг	^{99m}Tc представляет собой комплекс технеция ^{99m}Tc с меркаптоацетилтриглицином	для оценки функционального состояния почек и мочевыделительной системы.
Пирфотех	^{99m}Tc представляет собой комплекс технеция ^{99m}Tc с пирофосфатом натрия	для сцинтиграфии скелета с целью определения в нем патологических изменений различной этиологии, для сцинтиграфического выявления инфаркта.
Технетрил	^{99m}Tc представляет собой комплекс технеция ^{99m}Tc с 2-метоксиизобутилонитрилом (МИБИ)	для оценки перфузии миокарда при различных патологических процессах, приводящих к нарушению его кровоснабжения (коронарный атеросклероз, острый инфаркт миокарда, постинфарктный и постмиокардитический кардиосклероз, ишемическая болезнь сердца), а также для визуализации злокачественных новообразований легких и молочной железы.

Продолжение таблицы 1.11

Фосфотех	^{99m}Tc представляет собой комплекс технеция ^{99m}Tc соксиэтилидендифосфоновой кислотой)	для сцинтиграфии скелета с целью выявления очагов патологических изменений различного происхождения и распространенности.
Макротех	^{99m}Tc представляет собой макроагрегат ывальбумина, меченные ^{99m}Tc	для сцинтиграфии легких.

^{99m}Tc продукт β – распада материнского изотопа ^{99}Mo . Отделение ^{99m}Tc от ^{99}Mo специальными устройствами, называемыми генераторами технеция.

В следующей части рассмотрим вопрос методов получения ^{99}Mo и производство радиоизотопов на генераторах, а именно генератор ^{99m}Tc .

2 Производство молибдена и генератор технеция

Если медицинское учреждение находится вдали от ядерных реакторов и ускорителей заряженных частиц или куда затруднена регулярная доставка РФП, тогда прибегают к использованию изотопных генераторов. На изотопных генераторах производство РФП ведётся сочетанием радионуклидов с набором реагентов. На генераторах получение короткоживущих радионуклидов является задачей несложной и безопасной для персонала, генераторы транспортабельны, что даёт возможность наработки изотопа непосредственно в медицинских клиниках. При этом получение РФП стремятся вести на полностью автоматизированных установках с минимальным участием (или без всякого участия) радиохимика – фармацевта.

Генератор радиоизотопов работает на основе системы двух генетически связанных между собой радионуклидов, причём один из них – более короткоживущий (дочерний) постоянно образуется в результате распада другого (материнского), имеющего больший период полураспада. дочерний нуклид при распаде превращается в стабильный или весьма долгоживущий изотоп. При этом целевой нуклид, являющийся изотопом другого (по сравнению с материнским) элемента, может быть быстро и многократно извлечён из лабораторного генератора, например, посредством пропускания жидкости (элюата) определенного состава через генератор[15].

В большинстве случаев генератор представляет собой колонку, заполненную сорбентом и оборудованную фильтром, предотвращающим вымывание исходного нуклида. Элюат должен быть стерилен, не содержать материнского нуклида и иметь химическую форму, пригодную для непосредственного применения в клинике. Генератор обеспечен защитным свинцовым кожухом и системой коммуникаций. Он прост и безопасен в эксплуатации в условиях больницы. Активность дочернего нуклида при элюировании из генератора определяется общими закономерностями, обусловленными кинетикой накопления и распада нуклидов.

В настоящее время для целей радионуклидной диагностики чаще всего используются генераторы технеция $^{99}\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$, индия $^{113}\text{Sn}-^{113\text{m}}\text{In}$, рения $^{188}\text{W}-^{188}\text{Re}$ и галлия $^{68}\text{Ge}-^{68}\text{Ga}$. Особенно $^{99\text{m}}\text{Tc}$ он играет важную роль в медицине. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ и РФП на его основе широко используются в медицине в области диагностики [16].

2.1 Производство молибдена

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ – дочерний изотоп ^{99}Mo ($T_{1/2}=66$ часов). В медицине широко применяется генератор $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, имеющий идеальный для сцинтиграфии моноэнергетический спектр γ – излучения 140 кэВ (89%). Большая разница периодов полураспада $^{99\text{m}}\text{Tc}$ и ^{99}Mo позволяет использовать генератор для периодического получения технеция. На рисунке 2.1 приведенная схема распада в цепочке $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Ru}$ [17].

^{99}Mo , используемый в генераторе $^{99\text{m}}\text{Tc}$, могут быть получены с использованием исследовательских реакторов или ускорителей. Первичный метод производства ^{99}Mo с помощью процесса деления ^{235}U на исследовательских реакторах. Другие производственные процессы в малом масштабе используются сегодня, а другие находятся в стадии разработки.

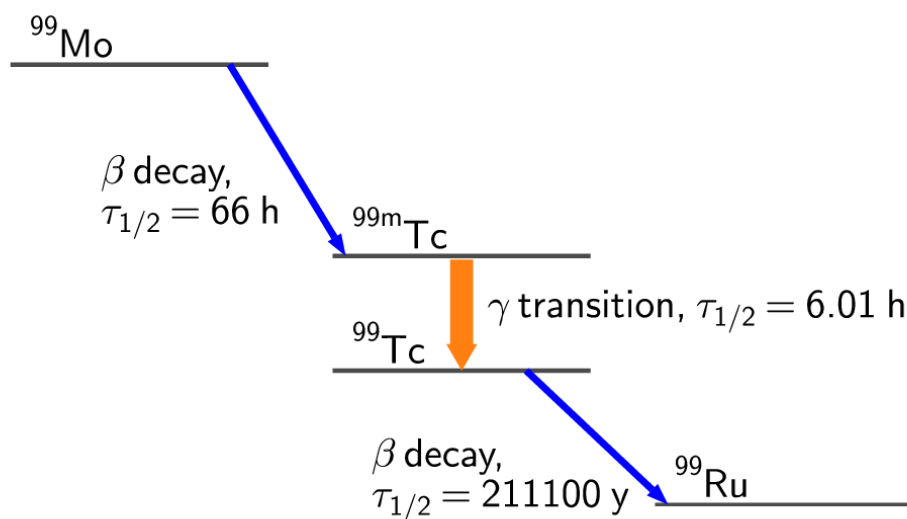


Рисунок 2.1 – Схема распада в цепочке $^{99}\text{Mo}-^{99}\text{Ru}$

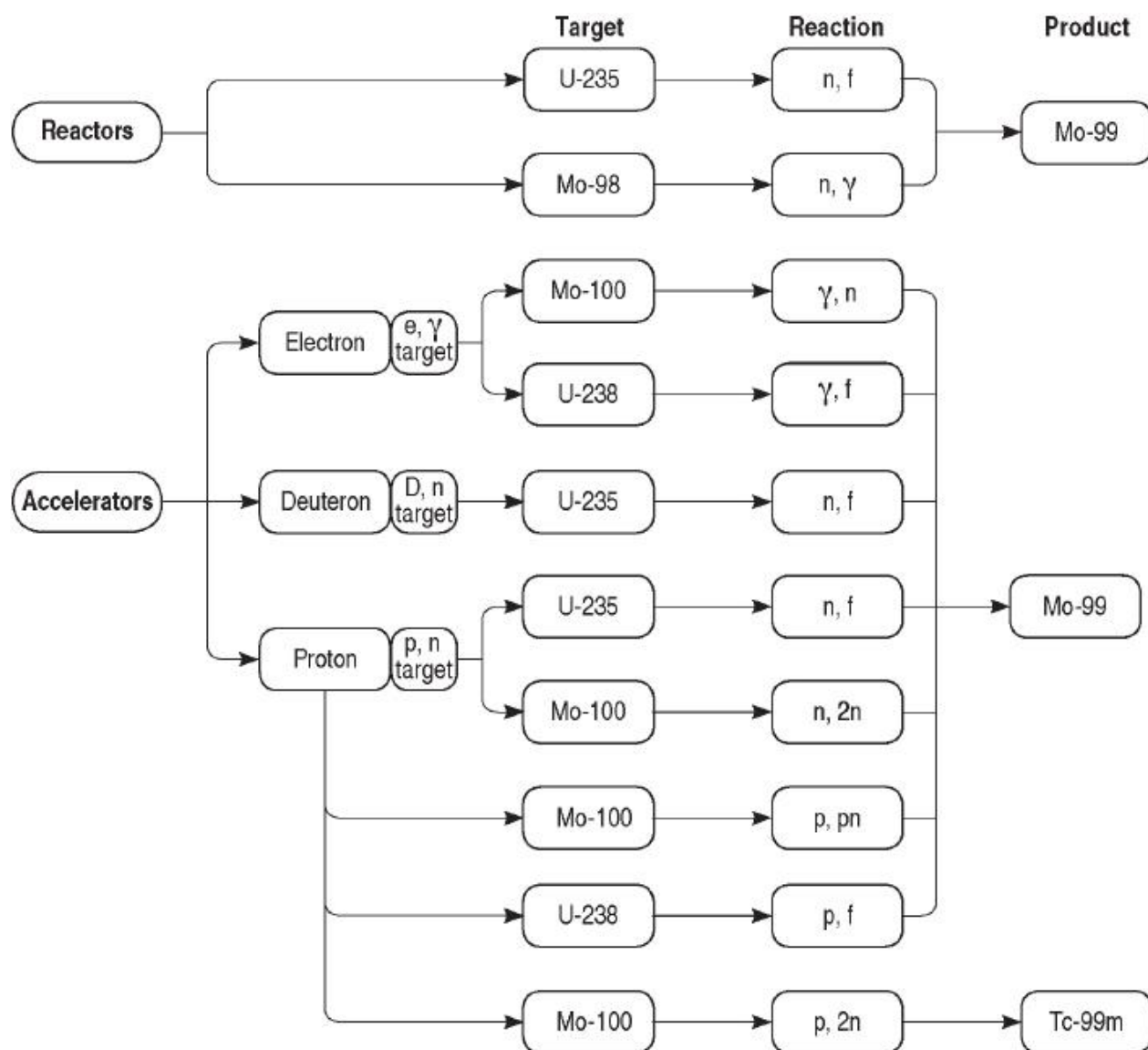


Рисунок 2.2 – Методы производства ^{99}Mo на ядерных реакторах и мощных ускорителях

Полное перечисление производственных процессов ^{99}Mo показан на рисунке 2.2. Эти процессы могут быть разделены на две группы:

- производственные процессы на основе реакторах;
- производственные процессы на основе ускорителей.

2.1.1 Получение молибдена на ускорителях заряженных частиц

В некоторых ускорителях технологии получения молибдена ^{99}Mo производится непосредственно взаимодействием бомбардирующих частиц с материалами мишеней. В других ускорителях первичные ускоренные заряженные частицы (электроны, протоны, дейтроны и т.д.) используются для производства энергетических вторичных частиц (фотоны, нейтроны), которые затем взаимодействуют с материалами мишеней для производства ^{99}Mo .

Получение ^{99}Mo возможно по фотоядерной реакции $^{100}\text{Mo}(\gamma, n)^{99}\text{Mo}$ на ускорителе электронов с удельным выходом порядка 90 Бк/мкА.ч.мг ^{100}Mo . При облучении 100г мишени обогащенного молиблена ^{100}Mo (95–98 %) током электронов 20 – 25 мкА с энергией 20 МэВ в течение 100 ч можно наработать около $7,4 \cdot 10^9 - 1,1 \cdot 10^{10}$ Бк (37–56 Бк/мкА.ч.мг) ^{99}Mo [18].

Также одним из перспективных направлений получения ^{99}Mo является применение сильноточных линейных ускорителей дейтронов и использования прямой ядерной реакции (d,p) на мишени из молибдена. Требуемая реакция $^{98}\text{Mo}(d, p)^{99}\text{Mo}$ молибден идет на естественном изотопе ^{98}Mo . Применение мишеней, обогащенных изотопом ^{98}Mo , позволяет увеличить выход генератора почти в 4 раза в зависимости от степени обогащения, поскольку содержание данного изотопа в естественной смеси составляет 23,78%.

Достижения в технике линейных ускорителей позволяют построить радиационно чистый ускоритель дейтронов на средний ток $I = 1$ мА и энергию частиц $V = 10$ МэВ, длиной не более 10 м. На таком ускорителе для природной мишени скорость выхода ^{99}Mo составляет около 3 ГБк/ч, а мишень представляет собой фольгу, толщиной порядка длины пробега дейтронов в молибдене (0,16 мм). При коэффициенте использования ускорителя 0,5 и учитывая, что минимальная активность по молибдену поставляемой стандартной кассеты составляет 3,7 ГБк, выход предукции может составлять приблизительно 10 кассет в сутки или 3500– в год.

2.1.2 Получение молибдена на реакторах

^{99}Mo производится на реакторах основными двумя способами: ^{99}Mo как одного из продуктов деления ^{235}U и возможно получение по реакции захвата нейтрона на ^{98}Mo (на рисунке 2.3). Сечение этих реакций, соответственно, равны 582,6 и 0,136 барн.

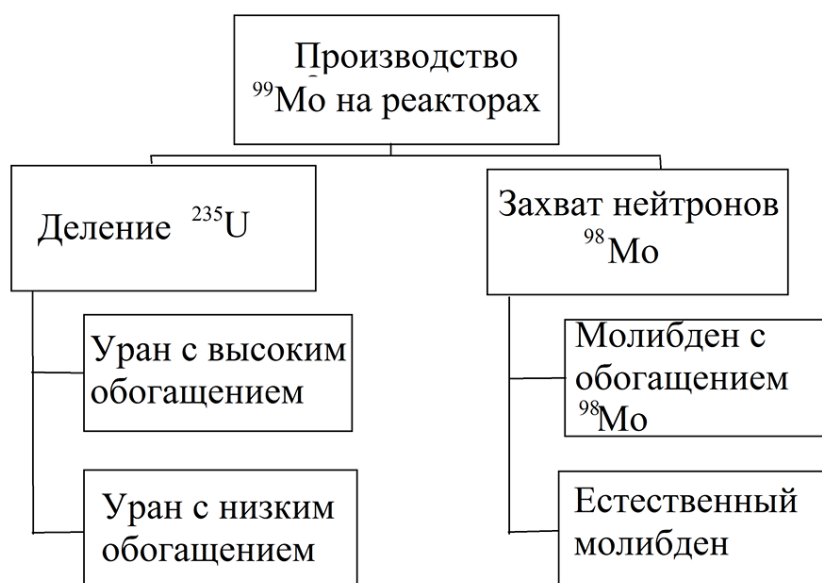


Рисунок 2.3 – Технология производства ^{99}Mo на основе реакторов

Наиболее просто ^{99}Mo получать в ядерном реакторе известен метод производства ^{99}Mo в результате радиационного захвата нейтрона $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$.

Мишень, содержащую естественный или обогащенный по изотопу ^{98}Mo молибден, облучают в потоке нейтронов реактора, а затем подвергают радиохимической переработке. Однако этот метод имеет малую производительность, а полученный ^{99}Mo характеризуется низкой удельной активностью из-за присутствия в конечном продукте изотопного носителя ^{98}Mo . Сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ на тепловых нейтронах невелико и составляет 0,13 барн. Вследствие этого выбора места облучения в активной зоне реактора может существенно повысить активацию ^{98}Mo . В большинстве случаев

эффективное сечение составляет около 0,5 барн. В некоторых реакторах удается реализовать эффективное сечение, равно 0,7–0,8 барн [19].

Даже при использовании обогащенной по изотопу ^{98}Mo мишени удельная активность ^{99}Mo на момент выгрузки из реактора с плотностью потока нейтронов $10^{14}/\text{н}(\text{см}^2\cdot\text{с})$ после облучения в течение 6 сут не превысит 20 Ки на грамм Мо [20]. Это накладывает ограничение на использование молибдена такого качества в адсорбционных генераторах. Кроме того, при облучении молибденовой мишени в нейтронном потоке реактора в урановом топливе накапливается большое количество радиоактивных осколков, утилизация которых встречает большие трудности.

Производство генераторов технеция « $^{99\text{m}}\text{Tc}$ –ГТ–ТОМ» в Томске создано на базе исследовательского водно – водяного реактора ИРТ – Т. При работе реактора на мощности 6 МВт в центральных каналах ЦК–1 и ЦК–2 достигается максимальная плотность потока тепловых нейтронов $1,1\cdot 10^{14} \text{ н/см}^2\cdot\text{с}$, а быстрых – $2\cdot 10^{13} \text{ н/см}^2\cdot\text{с}$.

Геометрия облучения оксида молибдена, обогащенного по ^{98}Mo до 98,6%, была следующей: Оксид молибдена помещали в ампулу из кварцевого стекла и герметично заваривали в алюминиевый пенал диаметром 22 мм и высотой 115 мм. При облучении оксид молибдена находится в центре активной зоны на дне ампулы и пенала. Таким образом, вода в канале над оксидом молибдена была максимально вытеснена пеналом. Под оксидом молибдена в одних случаях вода была вытеснена алюминиевым стаканом диаметром 28 мм, в других – не вытеснена. Кроме того, для уменьшения самопоглощения резонансных нейтронов, оксид молибдена в порошкообразном виде был либо равномерно размазан по поверхности кварцевой ампулы на высоту 4,5–5,0 мм, либо не размазан. Масса навески по молибдену составляла от 0,33 г до 1,68 г. Время облучения – от 97 до 112 часов на мощности реактора ИРТ–Т 6 МВт.

Молибденовые мишени MoO_3 с обогащением ^{98}Mo более 98 % массой 1 – 2 г облучают в центральном канале реактора в потоке тепловых нейтронов $1,1\cdot 10^{14} \text{ н/см}^2\cdot\text{с}$. За счет высокого содержания в нейтронном спектре

резонансных нейтронов достигается сечение реакции $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ на уровне 700 мб, что позволяет нарабатывать удельную активность ^{99}Mo порядка 12 Ки/г.

Получение ^{99}Mo как одного из осколков деления ^{235}U также одним из способов получения ^{99}Mo на реакторах. Такой способ производства ^{99}Mo , основанный на делении урана под действием нейтронов, в котором мишень с обогащением уровня по изотопу ^{235}U до 90% и выше. Мишени выпускаются различной формы – пластины, стержни и т.п. Их материалом могут быть металлический уран, оксиды урана, сплавы урана (почти всегда с алюминием). Как правило, мишени помещаются внутрь оболочек из алюминия или нержавеющей стали. Иногда в конструкции предусматриваются промежуточные барьеры из алюминия или никеля для отделения ^{235}U от материала оболочки [21].

Мишени, применяющиеся при производстве ^{99}Mo , фабрикуются таким образом, чтобы соблюсти пять основных принципов:

- геометрически они должны быть требуемым образом установлены в облучательном канале реактора;
- они должны содержать требуемое количество ^{235}U , чтобы обеспечить выход желаемого количества ^{99}Mo ;
- они должны обладать хорошей теплопроводностью, чтобы избежать перегрева в процессе облучения;
- мишень должна представлять собой барьер, не допускающий выхода радиоактивных изотопов;
- материал мишени должен соответствовать химическим процессам, используемым в горячей лаборатории для выделения и очистки ^{99}Mo .

Выход ^{99}Mo в реакции $^{235}\text{U}(n,f)$ достигает $\approx 6\%$ на акт деления. Из продуктов деления выделяют радиоизотоп ^{99}Mo , удельная активность которого достигает нескольких десятков килоюри на грамм молибдена. При плотности потока нейтронов порядка 10^{14} н/(см²×с), максимум накопления ^{99}Mo наблюдается в момент 5–7 суток с начала облучения мишени. В этот момент в

мишени используется не более 3% от исходно загруженного ^{235}U . Оставшийся после облучения уран трактуется как отходы.

После извлечения мишени из реактора, она охлаждается водой в течение полусуток и транспортируется в горячую лабораторию. Выделение ^{99}Mo из мишени должно производиться как можно быстрее, так как после облучения ежечасно теряется до 1% ^{99}Mo вследствие его распада.

В горячей лаборатории материал мишени растворяется, после чего производится химическое выделение ^{99}Mo . Основных способов два – щелочное и кислотное [15].

При щелочном выделении весь материал мишени, включая оболочку, растворяется в NaOH . В полученном растворе NaAlO_2 содержится молибдат натрия Na_2MoO_4 с небольшими примесями осколков деления и плутония, а уран и другие материалы выпадают в твёрдые осадки. В дальнейшем после фильтрации из раствора выделяется молибдат. Эффективность восстановления таким методом составляет по ^{99}Mo 85 – 90%.

Кислотное выделение применяется для металлических и окисных мишеней. Для него требуется предварительная механическая обработка мишени, в частности, отделение материала мишени от оболочки. Материал мишени растворяется в азотной кислоте, а затем различными методами из полученного раствора восстанавливается ^{99}Mo с эффективностью 85 – 90%.

Оба процесса выделения ^{99}Mo имеют свои плюсы и минусы и позволяют получать конечный продукт примерно с одной и той же степенью чистоты. В Аргентине продемонстрировано, что щелочной процесс применим к мишеням из низкого обогащенного урана, и ведутся необходимые исследования по его оптимизации для таких мишеней. В щелочном процессе образуются твёрдые отходы, более удобные для захоронения, но общее количество отходов больше, чем у кислотного. Кроме того, кислотный метод быстрее в реализации, что позволяет сократить потери из-за распада ^{99}Mo за время выделения.

Одним из наиболее серьезных недостатков метода производства ^{99}Mo , основанный на делении урана под действием нейтронов, получения

осколочного молибдена является необходимость утилизации большого количества радиоактивных отходов, поскольку помимо ^{99}Mo при делении урана образуются другие осколки, суммарная активность которых на момент окончания облучения на два порядка превышает активность ^{99}Mo . Суточная выдержка облученных урановых мишеней приводит к ослаблению общей активности примерно на порядок, в то время как активность ^{99}Mo падает лишь на 22%. Оптимальное время выдержки составляет двое суток. Однако и в этом случае активность отходов превышает активность ^{99}Mo в шесть-семь раз [22]. Таким образом, проблема обращения с долгоживущими продуктами деления является главным сдерживающим фактором при производстве радиоизотопа ^{99}Mo данным способом.

Наиболее близким к заявляемому является способ получения и выделения осколочного ^{99}Mo из жидкой гомогенной фазы, содержащей уран, облученной в ядерном реакторе [23]. Жидкая гомогенная фаза представляет собой расплав соли урана, которая циркулирует в основном контуре реактора. Параллельно основному контуру циркуляций существует малый байпасный контур, где организуется химическая переработка солевого расплава.

Для получения и выделения ^{99}Mo данным методом объем активной зоны герметизируют и присоединяют к газовому контуру. В результате деления ^{235}U или других расщепляющихся материалов в расплаве соли нарабатывается ^{99}Mo , который, не образуя устойчивых растворимых соединений, быстро мигрирует к границе раздела соль – газ и переходит в газовую фазу над поверхностью солевого расплава, отделившись от топливной композиции, содержащей основную массу осколков и делящихся материалов. Происходит самопроизвольная сепарация осколков деления. Процесс выделения ^{99}Mo может быть интенсифицирован за счет барботирования через расплав соли инертного газа (гелий, аргон и т.п.). Поскольку генератором осколочного молибдена является вся активная зона реактора, то считается, что в целом установка будет характеризоваться высокой производительностью по ^{99}Mo .

Процесс выделения ^{99}Mo в жидкосолевом ядерном реакторе осуществляется автоматически без переработки солевого расплава с сохранением подавляющего количества осколков в реакторе. В жидкосолевом реакторе, предназначенном для производства ^{99}Mo , топливная композиция подбирается таким образом, чтобы исключить химическую переработку в течение всего времени функционирования реактора (за исключением выведения газообразных осколков и легколетучих фторидов).

Недостатками этого метода получения ^{99}Mo являются: неполное использование урана при получении ^{99}Mo , сложный процесс выделения ^{99}Mo из фильтров, наличие радиоактивных отходов, высаждающихся на газовом тракте от ядерного реактора до фильтров, подлежащих дальнейшей утилизации, необходимость иметь достаточно высокую мощность реактора.

Таблица 2.1 – Сравнение способов получения ^{99}Mo с помощью процессов деления ^{235}U и захвата ^{98}Mo

$^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f}) ^{99}\text{Mo}$	$^{98}\text{Mo}(\text{n}, \gamma) ^{99}\text{Mo}$
Продукты с высокой удельной активностью ^{99}Mo (>100000 Ки/г)	Продукты с низкой удельной активностью ^{99}Mo (<15 Ки/г)
Требование обогащенной мишени ^{235}U	Требование обогащенной мишени ^{98}Mo
Сложная химическая обработка	Простая химическая обработка
Требование к специальному оборудованию обработки	Требование к высокому потоку источника нейтронов
Радиоактивные отходы высокого уровня	Минимальное количество радиоактивных отходов

В 20–килограммовом генераторе содержится обычно от 0,5 до 5 Кюри (20–120 ГБк) активно распадающегося молибдена. Средний диагностический тест требует примерно 250 МБк (0,06 Ки) ^{99m}Tc и приводит к получению дозы в 50 мЗв (5 бэр) – примерно одна предельно допустимая годовая доза для персонала АЭС.

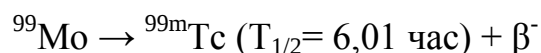
На рисунке 2.4 приведена цепочка производства ^{99}Mo в реакторе.



Рисунок 2.4 – Цепочка производства ^{99}Mo в реакторе

2.2 Генератор технеция

Технеций (^{99m}Tc) образуется путем бета – распада материнского радиоизотопа молибдена (^{99}Mo) через 66 ч.



Для отделения ^{99m}Tc от ^{99}Mo используются специальные устройства и установки, называемые генераторами технеция. Исходя из применяемого метода разделения, генераторы подразделяются на три основных типа: сорбционные (хроматографические), сублимационные и экстракционные

[24]. Также для получения ^{99m}Tc могут использоваться установки, сочетающие в себе несколько методов.

Принцип работы сублимационного генератора основан на различии температур возгонки (летучести) соединений ^{99m}Tc и ^{99}Mo .

Простейший сублимационный генератор представляет собой нагреваемую трубу с помещенной в ней облученной мишенью ^{99}Mo . Через трубу пропускают газ-носитель (влажный воздух, кислород и т.д.). На выходе трубы устанавливают охлаждаемый конденсор для улавливания технеция. По [25] в качестве мишенного материала использовали молибдат, ^{99}Mo натрия, нанесенный на стеклянную подложку. Сублимацию осуществляли в диапазоне температур от 500°C до 700°C . Простота сублимационной установки и отсутствие необходимости использования при этом процессе каких-либо других реагентов, особенно органических, снижает вероятность образования восстановленных или комплексных форм ^{99m}Tc , присущих хроматографической технологии, что обеспечивает получение продукта с высокой радиохимической и радионуклидной чистотой.

Основным недостатком сублимационного метода является низкая эффективность выделения ^{99m}Tc по сравнению со всеми другими методами, применяемыми в настоящее время.

Экстракционные генераторы, как правило, представляют собой стационарные установки, способные обеспечивать потребность в ^{99m}Tc достаточно больших городов.

Традиционная технологическая схема экстракционного получения ^{99m}Tc включает следующие основные операции: растворение облученной мишени ^{99}Mo в растворе КОН или NaOH с последующим введением карбоната калия в качестве высаливателя, экстракцию ^{99m}Tc с органическим экстрагентом, дистилляцию экстрагента и растворение сухого остатка, содержащего ^{99m}Tc , в физиологическом растворе. Часто экстракционное разделение совмещают с хроматографической очисткой органической фазы на оксиде алюминия. По оценкам разных исследований, выход ^{99m}Tc составляет 63–79% [26].

В качестве элюента для извлечения ^{99m}Tc чаще всего применяется этилметилкетон с температурой дистилляции $76\text{--}78^\circ\text{C}$, который сравнительно легко поддается очистке с целью повторного использования.

По объему выпуска и применения в мировой медицине такие генераторы занимают главенствующие позиции. Это, в первую очередь, обусловлено их компактностью и возможностью безопасной транспортировки на большие расстояния от места производства. Кроме того, они отличаются стабильным выходом ^{99m}Tc на уровне 90 % в сочетании с простотой эксплуатации.

Сорбционный генератор представляет собой хроматографическую колонку, заполненную сорбентом или ионообменной смолой, с подсоединенным к ней коммуникациями для подачи элюента и отбора элюата, и помещенную в защитный контейнер (на рисунке 2.5).

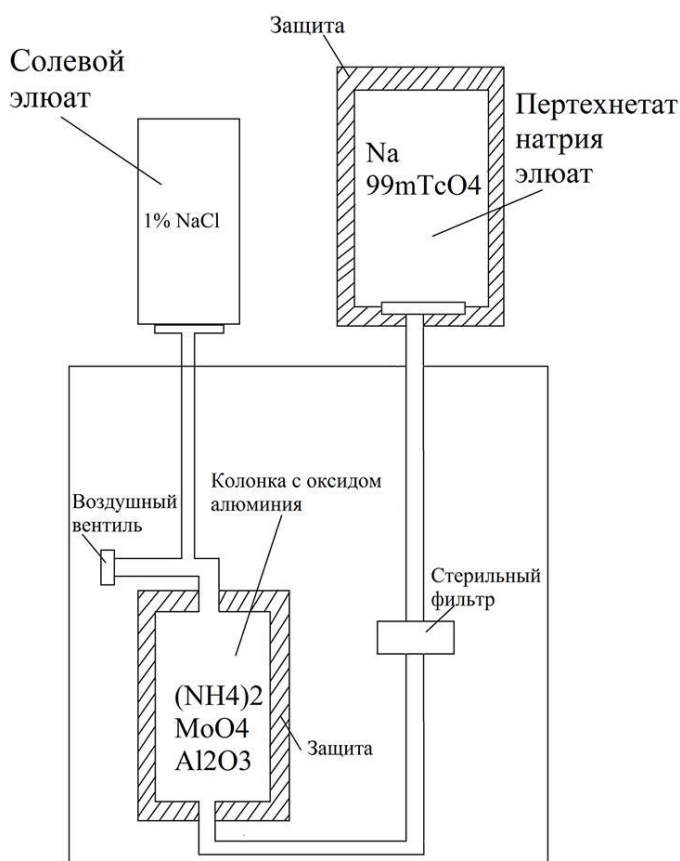


Рисунок 2.5 – Схема медицинского генератора технеция

Генератор представляет собой стеклянную колонку, заполненную сорбентом. Нерастворимые соединения молибдена, включающие молибдатион

$^{99}\text{MoO}_4^{2-}$ достаточно прочно фиксированы на оксиде алюминия. Колонка заполнена стерильным физиологическим раствором. При β -распаде 87% ^{99}Mo образуется $^{99\text{m}}\text{Tc}$ в форме водорастворимых ионов пертехната (TcO_4^-). Количество $^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ в колонке постепенно возрастает. В дальнейшем уровни $^{99\text{m}}\text{Tc}$ в генераторе зависят как от распада ^{99}Mo и самого $^{99\text{m}}\text{Tc}$, так от интенсивности элюирования последнего для последующего использования.

При промывании колонки раствором хлорида натрия происходит обмен между ионами хлора и TcO_4^- , в результате которого образуется пертехнетат натрия, $\text{Na}(^{99\text{m}}\text{TcO}_4)$. Элюирующий физиологический раствор вымывает технеций, но оставляет на месте молибден [26].

Для генераторной пары $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ выполняются следующие соотношения:

$$(N_2)_t = \frac{0,875\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (N_1)_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}),$$

$$(A_2)_t = \frac{0,875\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (A_1)_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}),$$

где N_1 , N_2 и A_1 , A_2 – количества ядер и активности ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$, соответственно; λ_1 и λ_2 – постоянные распада ^{99}Mo и $^{99\text{m}}\text{Tc}$; t – время распада; $(A_1)_0$ – исходная активность ^{99}Mo . Продолжительность максимального накопления $^{99\text{m}}\text{Tc}$ в такой системе $t_{\text{max}} = 22,89$ ч, что и определяет периодичность его отделения от материнского изотопа.

Однако, поскольку только 87,5% ^{99}Mo переходит в $^{99\text{m}}\text{Tc}$, то равновесная активность $^{99\text{m}}\text{Tc}$ будет равна лишь 95% от активности ^{99}Mo . За 23 часа (около четырех периода полураспада $^{99\text{m}}\text{Tc}$), максимальная активность скачиваемого $^{99\text{m}}\text{Tc}$ равна 84% от активности ^{99}Mo .

Максимальное накопление $^{99\text{m}}\text{Tc}$ в генераторе $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ происходит через 23 часа после каждой операции отделения изотопа от материнского ^{99}Mo , однако уже через 6 часов содержание технеция составляет половину от максимального. Это позволяет проводить выделение $^{99\text{m}}\text{Tc}$ несколько раз в день.

4 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для того, чтобы узнать в каком направлении проводить исследования, был произведен анализ потребителей. В качестве потребителей были выбраны основные радионуклиды, использующие в медицине для диагностики. Вторым критерием был выбран, органы диагностики на основе их препаратов.

На рисунке 4.1 представлена карта сегментирования рынка радионуклидов.

		Органы диагностики			
		мозг	лёгкое	почка	сердце
Основные радионуклиды, использующие в медицине для диагностики	^{201}Tl				
	^{123}I				
	$^{99\text{m}}\text{Tc}$				

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по радионуклидов

В данной работе рассмотрен сорбционный генератор технеция ($^{99\text{m}}\text{Tc}$). Конкурентами данного генератора технеция являются сублимационный генератор технеция и экстракционный генератор технеция. Не стоит забывать, что любой генератор технеция – это конкурент.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Для анализа конкурентных технических решений стоит рассмотреть генератор технеция наиболее близкие по способу решения задачи производства препараты на основе ^{99m}Tc . В качестве конкурирующих разработок были приняты: К1 – экстракционный генератор технеция, К2 – сублимационный генератор технеция. 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. Оценочная карта анализа представлена в таблице 4.1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i – го показателя.

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

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{K1}	B_{K2}	K_{ϕ}	K_{K1}	K_{K2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации	0,2	5	4	3	1	0,8	0,6
2. Удобство в доставке	0,1	5	3	4	0,5	0,3	0,4
3. Простота эксплуатации	0,2	5	4	3	1	0,8	0,6
4. Надежность	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
5. Безопасность	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
6. Функциональная мощность	0,15	4	4	4	0,6	0,6	0,6

Продолжение таблицы 4.1

Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
2.Уровень проникновения на рынок	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
Итого	1	36	31	29	4,60	3,90	3,50

Удобство эксплуатации генератора – критерий обеспечивающий наиболее мобильное использование данного генератора.

Удобство в доставке – критерий, описывающий, насколько снижаются стоимости при доставке данного генератора в медицинском учреждении.

Простота эксплуатации – критерий, оценивающий насколько просто используется данный генератор.

Надежность – критерий оценивающий насколько данный генератор не подвержено повреждениям и, как следствие замене.

Безопасность использования данного генератора – критерий оценивающий насколько данный вид генератора безопасен в доставке и эксплуатации.

Выше представлен анализ конкурентоспособности генераторов технеция, представленной в данной работе, среди отечественных разработок экстракционный генератор технеция (B_{K1}) и сублимационный генератор технеция (B_{K2}). Из анализа видно, что преимущество разрабатываемого генератора особенно заметно в простоте эксплуатации и удобство в эксплуатации, что является одной из главных причин повышения эффективности работы продукта. В остальных генераторах имеют показатели несколько хуже. Это связано с конструкцией генераторов, а также условия, при которых работают генераторы.

4.1.3 SWOT – анализ

SWOT – анализ представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT – анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильными сторонами разрабатываемого генератора технеция можно назвать следующие свойства и особенности:

- возможность получения ^{99m}Tc с выходом на уровне 90%;
- может послужить заменой хроматографическую генератору в странах с развитой ядерной индустрией;
- быстро отделение ^{99m}Tc ;
- простота эксплуатации;
- возможность безопасной транспортировки на большие расстояния от место производства.

Слабыми сторонами разрабатываемого генератора технеция можно назвать следующие свойства и особенности:

- высокая стоимость;
- требуется ^{99}Mo с высокой удельной активностью;
- срок годности не длинный;
- нет возможности ремонта генератора.

К возможностям данного генератора технеция можно отнести:

- снижение стоимости процедуры диагностики с помощью технеция;
- предоставление дополнительных рабочих мест;
- возможность появления новых условий разработки;
- поддержка атомной промышленности со стороны государства.

К угрозам можно отнести:

- природные катаклизмы;
- снижение государственного финансирования развития ядерной медицины;
- диверсионные действия.

Таблица 4.2 –Матрица SWOT

Сильные стороны 1. Возможность получения ^{99m}Tc с выходом на уровне 90%. 2. Может послужить заменой хроматографическую генератору в странах с развитой ядерной индустрией. 3. Простота эксплуатации.	Слабые стороны 1. Высокая стоимость. 2. Требуется ^{99}Mo с высокой удельной активностью. 3. Срок годности не длинный.
Возможности 1. Снижение стоимости процедуры диагностики с помощью технеция. 2. Предоставление дополнительных рабочих мест. 3. Поддержка атомной промышленности со стороны государства.	Угрозы 1. Природные катаклизмы. 2. Снижение государственного финансирования развития ядерной медицины. 3. Диверсионные действия.

В таблице 4.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 4.3 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
Возможности проекта		C1	C2	C3
	B1	+	+	+
	B2	-	+	-
	B3	+	+	+

Таблица 4.4 – Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	+	+	-
	B2	-	+	-
	B3	0	+	-

Таблица 4.5 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта				
Угрозы проекта		C1	C2	C3
	У1	0	-	-
	У2	0	+	0
	У3	+	-	-

Таблица 4.6 – Интерактивная матрица проекта

Слабые стороны проекта				
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	-	+	-
	У2	+	+	0
	У3	-	+	-

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В таблице 4.7 представлен SWOT–анализ виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что преимущества хроматографического генератора значительно преобладают над недостатками. Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

Характер НТР говорит о том, что наиболее оптимальной стратегией выхода разработки на рынок является стратегия совместной предпринимательской деятельности, т.е. разработка стратегии, которая основана на соединении общих усилий фирмы с коммерческими предприятиями страны-партнера для создания производственных и маркетинговых мощностей. Данная стратегия выбрана ввиду того, что

предприятие, заинтересованное в использовании радионуклидов в медицине на российском рынке, одно – компания «Диамед».

Таблица 4.7 – SWOT–анализ

	Сильные стороны научно исследовательского проекта: C1. Возможность получения ^{99m}Tc с выходом на уровне 90%. C2. Может послужить заменой хроматографическую генератору в странах с развитой ядерной индустрией. C3. Простота эксплуатации.	Слабые стороны научно – исследовательского проекта: Сл1. Высокая стоимость. Сл2. Требуется ^{99}Mo с высокой удельной активностью. Сл3. Срок годности не длинный.
Возможности: B1. Снижение стоимости процедуры диагностики с помощью технеция. B2. Предоставление дополнительных рабочих мест. B3. Поддержка атомной промышленности со стороны государства.	По результатам анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности» можно сделать вывод о том, что сильные стороны проекта тесно связаны с его возможностями. Возможность получения ^{99m}Tc с выходом на уровне 90%. приведет к еще более сильному снижению цен на процедуры диагностики с помощью технеция и увеличит рабочие места.	По результатам анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности» можно сделать вывод о том, что высокая стоимость и требование ^{99}Mo с высокой удельной активностью не отразится на снижении стоимости процедуры диагностики с помощью технеция.

Продолжение таблицы 4.7

Угрозы: У1.Природные катаклизмы. У2.Снижениегосударствен ного финансирования развития ядерной медицины. У3.Диверсионныедействия.	По результатам анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы» можно сделать вывод о том, что природные катаклизмы резко появляется и снижение государственного финансирования развития ядерной медицины имеет слабое соответствие с сильными сторонами работы.	Высокая стоимость и срок годности не длинный существенно снижает интерес государства к данному генератора и снижение государственного финансирования развития ядерной медицины.
---	---	--

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Изучение проблемы и материалов по теме	Магистр
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, магистр
	4	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Магистр
	6	Оценивание правильности полученных характеристик сравнивая их с характеристиками существующего аналога	Руководитель, Магистр
Оформление отчета по НИР	7	Составление пояснительной записки	Магистр
	8	Подготовка к защите темы	Руководитель, магистр

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко – днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожд}$ используется следующая формула:

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

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

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

$t_{\text{max}i}$ – 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_p , 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 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i}, \quad (3)$$

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

$t_{\text{ож}i}$ – 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

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i – й работы в календарных днях;
 T_{pi} – продолжительность выполнения i – й работы в рабочих днях;
 $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;
 $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;
 $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 102 - 16} = 1,48,$$

$$t_{\text{min}1} = 1,$$

$$t_{\text{max}1} = 2,$$

$$t_{\text{ожс}1} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 2}{5} = 1,4,$$

$$T_{pi} = \frac{1,4}{1} = 1,4,$$

$$T_{ki} = 1,4 \cdot 1,48 = 2.$$

Все значения полученные выше, были сведены в таблицу 4.10.

Таблица 4.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ						Длительность в раб.днях, T_{pi}		Длительность Работ в календарных днях, T_{ki}	
	$t_{min},$ чел-дни		$t_{max},$ чел-дни		$t_{ожі},$ чел-дни					
	Д	Р	Д	Р	Д	Р				
	Д	Р	Д	Р	Д	Р				
1. Составление и утверждение технического задания	–	1	–	2	–	1,4	–	1,4	–	2
2. Подбор и изучение материалов по теме	4	–	6	–	4,8	–	4,8	–	7	–
3.Выбор направления исследований	1	1	2	2	1,4	1,4	0,7	0,7	1	1
4.Календарное планирование работ по теме	–	1	–	5	–	2,6	–	2,6	–	4
5.Проведение теоретических расчетов и обоснований	15	–	30	–	21	–	21	–	31	–
6.Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	2	–	3	–	2,4	–	2,4	–	4	–
7.Оценка достоверности полученных характеристик, путем сравнения их с характеристиками существующего аналога	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
8.Определение целесообразности проведения ОКР	–	1	–	2	–	1,4	–	1,4	–	2
9.Разработка принципиальной схемы	10	–	25	–	16	–	16	–	24	–
10.Разработка чертежей	2	–	3	–	2,4	–	1,2	–	2	–

Продолжение таблицы 4.10

8	Определение целесообразности проведения ОКР	Р	1															
9	Выбор и расчет конструкции	Д	24															
10	Разработка чертежей	Д	2															
11	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	Д	3															
12	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Д	9															
13	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Д, Р	1, 1															
14	Представление разработки заинтересованной компании	Д, Р	1, 1															

 студент;  руководитель;

На основе таблицы 4.9 строится календарный планграфик. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно–исследовательского проекта и представлен в таблице 4.10 с разбивкой по месяцам и неделям за период времени дипломирования.

4.2.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

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

- материальные затраты НТИ;

- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

4.2.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$З_{\text{м}} = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m \Pi_i \cdot N_{\text{расх}i}, \quad (6)$$

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

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

Π_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.

Значения цен на материальные ресурсы могут быть установлены по данным, размещенным на соответствующих сайтах в Интернете предприятиями – изготовителями (либо организациями – поставщиками).

Материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 5.4.

Отсутствие в таблице разделения на источники финансирования говорит о том, что источник один. Источник финансов в данной работе – студент.

Основные работы для ВКР проводились за персональным компьютером (ноутбуком) в комнате жилого дома. Время, проведенное работой у компьютера, примем равным 800 часам. Мощность ноутбука: 0,9 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 5,8 \cdot 0,9 \cdot 800 = 4176, \quad (7)$$

где $C_{\text{эл}}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5,8 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

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

Затраты на электроэнергию составили 4176 рублей.

Таблица 4.11 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З _м), руб.
1. Бумага	шт.	200	0,4	80
2. Печать на листе А4	шт.	200	2	400
3. ручки	шт.	2	15	30
4. Доступ в интернет	месяц	4	350	1400
5. Учебная литература	шт.	2	300	600
6. Электроэнергия	кВт·ч	720	5,8	4176
7. Герератор технеция	шт.	1	50000	50000
Итого				56686

4.2.4.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно–технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из

трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20–30 % от тарифа или оклада.

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

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп}, \quad (8)$$

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

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12–20 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата ($З_{осн}$) руководителя (лаборанта, студента) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (9)$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (таблица 5.3);

$З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}, \quad (10)$$

где $З_m$ – 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_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.12).

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	118	118
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	56	48
Действительный годовой фонд рабочего времени	191	199

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot k_{\text{р}}, \quad (11)$$

где $З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

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

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$З_{\text{внеб}} = 0,3 \cdot (14.8936 + 1.787) = 5.004 \text{ руб.}$$

Накладные расходы в ТПУ составляют 12–16 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы.

Примем коэффициент накладных расходов равный 15 %.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$С_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,15 \cdot (14.8936 + 1.787 + 5.004) = 3.253 \text{ руб.},$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов, равный 15 %.

Расчёты основной заработной, дополнительной заработной плат, а также величина отчислений во внебюджетные фонды приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Расчёт основной заработной, дополнительной заработных плат, а так же величина отчислений во внебюджетные фонды

Исполнители	З _{тс} , тыс. руб.	k _р	З _м , тыс. руб.	З _{дн} , тыс. руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , Тыс. руб.	З _{доп} , руб.	З _{внеб} , руб.
Руководитель	26,300	1,3	34,190	1,8617	8,0	14,8936	1,787	5,004
Магистр	1,750	1,3	2,275	0,119	55,6	6,6164	–	1,9849
Итого З_{осн}						21,51		

4.2.4.3 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на научно – исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.14.

Накладные расходы в ТПУ составляют 15 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнение темы.

Таблица 4.14 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.
1. Материальные затраты НТИ	56,686
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	21,51
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	1,787
4. Отчисления во внебюджетные фонды	5,004
5. Накладные расходы	3,253
Бюджет затрат НТИ	88,240

4.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

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

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат нескольких вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{фин_i} = \frac{\Phi_{p_i}}{\Phi_{max}}, \quad (12)$$

где $I_{фин_i}$ – интегральный финансовый показатель;

Φ_{p_i} – стоимость i – го варианта исполнения разработки;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно–исследовательского проекта.

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки (при полученном значении больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{фин_p} = \frac{\Phi_p}{\Phi_{max}} = \frac{88,240}{88,240} = 1.$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{фин_{a_1}} = \frac{\Phi_{a_1}}{\Phi_{max}} = \frac{99,711}{88,240} = 1,13; I_{фин_{a_2}} = \frac{\Phi_{a_2}}{\Phi_{max}} = \frac{105,006}{88,240} = 1,19.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{рес_i} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i \quad (13)$$

где $I_{рес_i}$ – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы (таблица 4.15).

Таблица 4.15 – Оценка характеристик исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Безопасность	0,20	5	4	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	4	4
3. Помехоустойчивость	0,15	4	3	3
4. Удобство в доставке	0,15	4	3	4
5. Надежность	0,25	5	3	3
6. Материалоемкость	0,1	3	2	4
Итого:	1			

$$I_{pec_p} = 5 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 = 4,35;$$

$$I_{pec_{a1}} = 4 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,25 + 2 \cdot 0,1 = 3,25;$$

$$I_{pec_{a2}} = 4 \cdot 0,20 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,25 + 4 \cdot 0,1 = 3,60.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\varepsilon\phi_i} = \frac{I_{pec_i}}{I_{фин_i}}. \quad (14)$$

Таким образом, для разработки и аналогов:

$$I_{\varepsilon\phi_p} = \frac{4,35}{1} = 4,35; I_{\varepsilon\phi_{a1}} = \frac{3,25}{1,13} = 2,88; I_{\varepsilon\phi_{a2}} = \frac{3,60}{1,19} = 3$$

Сравнение интегральных показателей эффективности разработки и возможных аналогов позволяет определить сравнительную эффективность проекта:

$$\varepsilon = \frac{I_{\varepsilon\phi_p}}{I_{\varepsilon\phi_{a_i}}}. \quad (15)$$

Результаты вычисления интегральных показателей представлены в таблице 4.16.

Удобство в эксплуатации – насколько данный проект удобно использовать для различных генераторов.

Безопасность – насколько проект безопасен в использовании для персонала.

Удобство в доставке – критерий, описывающий, насколько снижаются стоимости при доставке данного генератора в медицинском учреждении.

Помехоустойчивость – критерий, оценивающий способность эксплуатации противостоять искажающему действию помех.

Надёжность проекта характеризует способность проекта претерпевая нагрузки, оставаться трудоспособным.

Материалоёмкость – Показатель расхода материальных ресурсов в проекте.

Таблица 4.16 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,00	1,13	1,19
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,35	3,25	3,60
3	Интегральный показатель эффективности	4,35	2,88	3
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,51	1,45

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности. Но т.к. задача имеет довольно строгие условия, решение имеет лишь один вариант [33].

Список публикаций

1. Фам, У.Т. Методы получения радионуклидов / У.Т. Фам // Международная научно–практическая конференция физико-технические проблемы в науке промышленности и медицине. – 2016. – № 8. – С. 138-139.